



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

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

TEMA:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CODO Y MUÑECA PARA EL
BRAZO ROBÓTICO “UTN”**

AUTOR: CARLOS ANDRÉS ENDARA VEGA

DIRECTOR: ING. COSME MEJÍA

IBARRA - ECUADOR

2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO	
Cédula de Identidad	100294388-2
Apellidos y Nombres	Carlos Andrés Endara Vega.
Email	caendarav@utn.edu.ec
Teléfono Fijo	062535118
Teléfono Móvil	0985754501

DATOS DE LA OBRA	
Título	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CODO Y MUÑECA PARA EL BRAZO ROBÓTICO “UTN”
Autor	Carlos Andrés Endara Vega.
Fecha	Septiembre del 2017
Programa	Pregrado
Título por el que aspira	Ingeniero en Mecatrónica
Director	Ing. Cosme Mejía.

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Carlos Andrés Endara Vega, con cédula de identidad N° 100294388-2, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad de material y como apoyo a la educación, investigación y extensión, en concordancia con la Ley de educación Superior Artículo 144.

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asumo la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamos por parte de terceros.

Ibarra, a los 18 días del mes de Septiembre del 2017

EL AUTOR:



Firma

Nombre: Carlos Andrés Endara Vega.

Cédula: 100294388-2



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A
FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Yo, Carlos Andrés Endara Vega, con cédula de identidad N°. 100294388-2, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, Artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor del trabajo de grado denominado:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CODO Y MUÑECA PARA EL BRAZO ROBÓTICO UTN” que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi calidad de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en el formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, 18 de Septiembre del 2017

Firma

Nombre: Carlos Andrés Endara Vega.

Cédula: 100294388-2



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente Trabajo de Grado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CODO Y MUÑECA PARA EL BRAZO ROBÓTICO UTN”, fue desarrollado por el egresado Carlos Andrés Endara Vega, bajo mi supervisión, lo cual certifico en honor a la verdad.

Ing. Cosme Mejía

DIRECTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Yo, Carlos Andrés Endara Vega declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que este no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Carlos Andrés Endara Vega.

C.I. 100294388-2

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por brindarme su apoyo incondicional, a lo largo de todos estos años de estudio.

A la Universidad Técnica del Norte, pilar fundamental en mí como profesional y persona.

Al personal docente y administrativo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, en especial al Ingeniero Cosme Mejía por sus conocimientos compartidos, además del apoyo brindado durante el desarrollo del proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres Silvio Endara y Lucía Vega por su apoyo incondicional, por la confianza depositada en mí, por sus consejos, motivación y palabras de aliento brindadas, siempre estuvieron a mi lado en todo momento.

Carlos.

RESUMEN

Este proyecto presenta el diseño y construcción de un antebrazo robot, conformado por articulaciones de codo y muñeca, además puede ser controlado a través de instrucciones generadas por computador, y será capaz de ensamblarse con el resto de componentes que conforman un brazo robótico.

La ejecución del proyecto inicia con la investigación bibliográfica sobre los diferentes tipos de robots, morfología y tipos de articulaciones usadas en los mismos, de donde se selecciona el tipo de robot a realizarse.

El antebrazo robot se desarrolló mediante cálculos matemáticos, se obtuvo la resistencia del diseño y se comprobó su fiabilidad mediante simulaciones por computador. Para la selección correcta de los actuadores del antebrazo se realizó un análisis cinemático y dinámico del robot mediante la ayuda de MATLAB®, donde se obtuvieron los datos precisos para la selección de los actuadores.

Una vez validado el diseño del antebrazo robot se procede a elaborar los planos mecánicos del mismo, desarrollados bajo la norma INEN de dibujo mecánico. A continuación se realiza el mecanizado y ensamblaje de los elementos que conforman el antebrazo, y se elabora el sistema de control del robot.

La funcionalidad del diseño se comprueba mediante el ensamble completo del brazo robot, observando su correcto funcionamiento y verificando que cumpla los requerimientos del proyecto.

ABSTRACT

This project presents the design and construction of a forearm robot, made up of elbow and wrist joints, can be controlled through computer generated instructions, and may be able to be assembled with the rest of components that make up a robotic arm.

The execution of the project initiated with the bibliographical research on the different types of robots, the morphology and the types of joints used in them, from where the type of robot to be realized is selected.

The forearm robot was developed by means of static calculations where the resistance of the design was obtained and its reliability was verified by means of computer simulations. For the correct selection of the actuators of the forearm, a kinematic and dynamic analysis of the robot was carried out with the help of MATLAB®, where precise data were obtained for the selection of the motors.

Once the forearm robot design is validated, proceed to elaborate drawing the mechanical planes of the same, developed under the standard INEN of mechanical drawing. Then proceed with the machining and assembly of the elements that make up the forearm, and the robot control system is performed.

The functionality of the design is checked with the complete assembly of the robot arm, observing its correct operation and verifying that it meets the requirements of the project.

CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD.....	IV
CONSTANCIAS	IV
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	IV
CERTIFICACIÓN.....	V
DECLARACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCCIÓN.....	XX
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	XX
OBJETIVO GENERAL.....	XXI
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XXI
ANTECEDENTES	XXI
JUSTIFICACIÓN	XXIII
ALCANCE	XXIV
LIMITACIÓN.....	XXIV
 CAPÍTULO I	
MARCO TEÓRICO	1
1. GENERALIDADES DE LOS ROBOTS.	1
1.1. DEFINICIÓN DE ROBOT INDUSTRIAL.....	1
1.2. DEFINICIÓN DE ROBOT MANIPULADOR	1
1.3. TIPOS DE CONFIGURACIONES MORFOLÓGICAS.....	2
1.4. ESLABÓN ANTEBRAZO	3
1.4.1. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL ANTEBRAZO ROBOT.	4

1.5.	SELECCIÓN DE LA MORFOLOGÍA A USAR EN EL BRAZO ROBOT “UTN”	4
1.5.1.	CARACTERÍSTICAS DEL BRAZO ROBOT “UTN”	5
1.5.2.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES MORFOLÓGICAS.	5
1.5.3.	SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN MORFOLÓGICA.	6
1.6.	CARACTERÍSTICAS DE LOS ROBOTS MANIPULADORES.....	7
1.7.	TIPOS DE ARTICULACIONES.....	8
1.8.	ACTUADORES.....	9
1.8.1.	SELECCIÓN DEL ACTUADOR.	9
1.9.	SENSORES DE POSICIÓN	11
1.10.	TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	13
1.11.	MATERIAL.....	14
 CAPÍTULO II		
2.	METODOLOGÍA.....	16
2.1.	INVESTIGACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.2.	SELECCIÓN DE MATERIALES.....	16
2.3.	MODELADO DEL DISEÑO.....	16
2.4.	DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y PROGRAMACIÓN.	17
2.5.	ENSAMBLAJE DEL MECANISMO	17
2.6.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	17
2.7.	DESARROLLO DEL MARCO METODOLÓGICO.....	17
2.7.1.	PARÁMETROS DE DISEÑO	17
2.7.2.	DISEÑO DEL ANTEBRAZO.....	18
2.7.3.	CÁLCULO DEL ESPESOR DE PLANCHA PARA EL DISEÑO.	23
2.7.4.	DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	27
2.7.5.	DISEÑO DEL EJE PARA EL CODO.....	31
2.7.6.	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	39
2.7.7.	ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.....	41

2.7.8.	CINEMÁTICA.....	44
2.7.9.	MODELO DINÁMICO	53
2.7.10.	DETERMINACIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT UTILIZANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®.	58
2.7.11.	DETERMINACIÓN DEL MODELO DINÁMICO DEL ROBOT UTILIZANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®.	62
2.7.12.	COMPROBACIÓN DEL ANÁLISIS DINÁMICO DEL BRAZO ROBOT MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE DE MATLAB®.	65
2.7.13.	DISEÑO DE CONTROL.....	68
2.7.14.	PROGRAMACIÓN.	76
 CAPÍTULO III		
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
3.1.	DISEÑO MECÁNICO.....	78
3.2.	MATERIAL.....	78
3.3.	CINEMÁTICA.....	79
3.4.	DINÁMICA	79
3.5.	MANUFACTURA.....	80
3.6.	ENSAMBLAJE.....	82
3.7.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	84
3.8.	AUTOMATIZACIÓN	86
3.9.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	87
3.9.1.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA ARTICULACIÓN DE CODO.....	88
3.9.2.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA ARTICULACIÓN DE MUÑECA.	90
 CAPÍTULO IV		
	CONCLUSIONES	94
	RECOMENDACIONES.....	95
	BIBLIOGRAFÍA	96
	ANEXOS.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0.1. a) Robot Cincinnati Milacron. b) Robot de la serie PUMA 560	XXII
Figura 0.2. Brazos robóticos para procesos de pintura y suelda.	XXII
Figura 1.1. Robot Industrial.	1
Figura 1.2. Estructura básica de un robot manipulador.	2
Figura 1.3. Configuraciones morfológicas en robots industriales.	3
Figura 1.4. Codificador óptico (encoder)	12
Figura 1.5. Esquema de funcionamiento de un resolver.	12
Figura 2.1. Diagrama de cuerpo libre del elemento final.	19
Figura 2.2. Diagrama de cuerpo libre del antebrazo robot.	22
Figura 2.3. Fuerzas que actúan sobre los pernos del codo en el antebrazo robot.	24
Figura 2.4. Diagrama de cuerpo libre para identificar fuerzas actuantes en los pernos del codo.	24
Figura 2.5. Junta de aplastamiento.	25
Figura 2.6. Eje para el codo	31
Figura 2.7. Diagrama de cuerpo libre del eje del codo.	31
Figura 2.8. Fuerzas en la transmisión sinfín y corona.	32
Figura 2.9. Diagramas de cortes y momentos plano XY	35
Figura 2.10. Diagrama de cortes y momentos plano XZ.	36
Figura 2.11. Cargas y restricciones	41
Figura 2.12. Análisis de convergencia.	42
Figura 2.13. Análisis de von Mises	43
Figura 2.14. Desplazamiento.	43
Figura 2.15. Factor de seguridad	44
Figura 2.16. Relación entre cinemática directa e inversa.	44
Figura 2.17. Robot planar de 2 GDL.	46
Figura 2.18. Marco de referencias para el brazo robot UTN.	48
Figura 2.19. DCL de la cinemática inversa	51

Figura 2.20. Diagrama superior solución codo arriba.	51
Figura 2.21. Diagrama lateral solución codo arriba.	52
Figura 2.22. Relación entre dinámica directa e inversa.....	53
Figura 2.23. DCL de la dinámica inversa.....	54
Figura 2.24. Proyección en un plano de la dinámica inversa.....	55
Figura 2.25. Parámetros del robot en MATLAB®.....	59
Figura 2.26. Representación gráfica del Robot UTN	60
Figura 2.27. Posición del elemento final en el punto p0.....	61
Figura 2.28. Robot en movimiento a través de trayectorias establecidas.	63
Figura 2.29. Curvas de torques en las articulaciones del antebrazo robot.	64
Figura 2.30. Diagrama de bloques del modelo CAD del brazo robot.....	65
Figura 2.31. Bloques de programación adicionales.....	66
Figura 2.32. a) Torque en la articulación de codo. b) Torque en la a. de muñeca. c) Torque en la a. para el giro de gripper.....	67
Figura 2.33. Posición alcanzada por el brazo UTN.....	68
Figura 2.34. Driver TB6560.....	71
Figura 2.35. Puente H con transistores.....	72
Figura 2.36. Sistema de control en lazo cerrado.....	72
Figura 2.37. Curva de respuesta a la variación de posición.....	73
Figura 2.38. Estimación del sistema de control en Ident	74
Figura 2.39. Gráfica de la función de transferencia.....	75
Figura 2.40. Diagrama de bloques.	75
Figura 2.41. Respuesta de control en lazo abierto.....	76
Figura 2.42. Interfaz gráfica del programa de control del brazo robot UTN.	77
Figura 3.1. Circuito de control.	85
Figura 3.2. Puente H implementado.....	85
Figura 3.3. Control articulación de muñeca implementado.....	86

Figura 3.4. Programa para controlar la articulación de codo.....	87
Figura 3.5. Programación para el control de la articulación de muñeca.	87
Figura 3.6. Mediciones de posicionamiento el codo.	89
Figura 3.7. Mediciones de posicionamiento de la articulación de codo en levantamiento.	91
Figura 3.8. Mediciones de posicionamiento de la muñeca en giro.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características del brazo robot UTN.	5
Tabla 1.2. Ventajas y desventajas de las configuraciones morfológicas.	6
Tabla 1.3. Lista de control de cumplimiento de las características requeridas en brazo "UTN".....	7
Tabla 1.4. Características de las articulaciones y grados de libertad.....	8
Tabla 1.5. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de motores.....	10
Tabla 1.6. Características del actuador.....	10
Tabla 1.7. Lista de control para selección del actuador.....	11
Tabla 1.8. Comparación entre los sensores de posición angular.	13
Tabla 1.9. Ventajas y desventajas de los sistemas de transmisión.....	14
Tabla 1.10. Propiedades de los materiales	15
Tabla 2.1. Cálculos para el diámetro del eje.	39
Tabla 2.2. Datos rodamiento SKF 6001	40
Tabla 2.3. Condiciones para el análisis de elementos finitos.	41
Tabla 2.4. Análisis del error frente a esfuerzos.	42
Tabla 2.5. Parámetros Denavit-Hartenberg	47
Tabla 2.6. Parámetros D-H para el robot UTN.	48
Tabla 2.7. Parámetros D-H a utilizarse en Robotics Toolbox de MATLAB®	58
Tabla 2.8. Secuencia de paso sencillo	69
Tabla 2.9. Secuencia de paso normal.	70
Tabla 2.10. Secuencia de paso medio.	70

Tabla 2.11. Valores de posición ingresados y resultantes.	73
Tabla 3.1. Resultados cinemáticos	79
Tabla 3.2. Resultados dinámicos.....	79
Tabla 3.3. Procesos de fabricación para el antebrazo robot.....	80
Tabla 3.4. Ensamblaje del antebrazo robot	82
Tabla 3.5. Proceso de ensamblaje	83
Tabla 3.6. Prueba de funcionamiento en la articulación de codo.	88
Tabla 3.7. Prueba de funcionamiento en la articulación de muñeca.....	90
Tabla 3.8. Prueba de funcionamiento en la articulación de muñeca rotando al gripper.....	92

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Momento.	19
Ecuación 2. Cálculo del torque de un objeto rotando sobre un eje sólido.	20
Ecuación 3. Velocidad angular	20
Ecuación 4. Inercia	21
Ecuación 5. Sumatoria de momentos.	23
Ecuación 6. Fuerza.....	24
Ecuación 7. Perímetro de un círculo.	25
Ecuación 8. Área de aplastamiento.	26
Ecuación 9. Esfuerzo.	26
Ecuación 10. Esfuerzos.....	26
Ecuación 11. Relación de amplificación.	28
Ecuación 12. Ángulo de avance.	29
Ecuación 13. Avance.	30
Ecuación 14. Paso circular.	30
Ecuación 15. Fuerza tangencial de un engrane.....	33
Ecuación 16. Fuerza axial de un engrane.	33
Ecuación 17. Fuerza radial.....	34

Ecuación 18. Resistencia real a la fatiga.	37
Ecuación 19. Calcular diámetro de eje.	38
Ecuación 20. Vida del rodamiento.	40
Ecuación 21. Matriz de transformación homogénea	45
Ecuación 22. Producto de matrices	47
Ecuación 23. Producto de matrices	47
Ecuación 23. Análisis geométrico, Pitágoras.	52
Ecuación 24. Análisis geométrico, Ángulo θ_1	52
Ecuación 25. Análisis geométrico, Distancia F.	52
Ecuación 26. Análisis geométrico, Distancia e	52
Ecuación 27. Análisis geométrico, Ángulo β	52
Ecuación 28. Análisis geométrico, Hipotenusa c	52
Ecuación 29. Análisis geométrico, Ángulo φ	52
Ecuación 30. Análisis geométrico, Ángulo η	53
Ecuación 31. Análisis geométrico, Ángulo θ_2	53
Ecuación 32. Análisis geométrico, Ángulo θ_3	53
Ecuación 33. Energía cinética en la base del robot.	55
Ecuación 34. Energía potencial en la base.	55
Ecuación 35. Energía cinética en el hombro.	55
Ecuación 36. Energía potencial en el hombro.	56
Ecuación 37. Energía cinética en el codo.	56
Ecuación 38. Energía potencial en el codo.	56
Ecuación 39. Energía cinética en la muñeca.	56
Ecuación 40. Energía potencial en la muñeca.	56
Ecuación 41. Lagrangiano.	57
Ecuación 42. Ecuación de Lagrange.	57
Ecuación 43. Sumatoria de energías.	57
Ecuación 44. Ecuación lineal.	74

¡Error! Marcador no definido. **ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1. Material	99
Anexo 2. Motor paso a paso.....	100
Anexo 3. Transmisión sinfín-corona.....	101
Anexo 4. Eje	102
Anexo 5. Rodamientos.....	103
Anexo 6. Driver motor paso a paso.....	105
Anexo 7. Motor DC.	106
Anexo 8. Encoder	107
Anexo 9. Programación en Matlab para el análisis cinemático-dinámico.	109
Anexo 10. Diagrama de bloques en Simulink para el análisis Cinemático-Dinámico.....	113
Anexo 11. Programación en LabVIEW	114
Anexo 12. Puente H.....	116
Anexo 13. Arduino Mega 2560.....	117
Anexo 14. Poleas dentadas	118
Anexo 15. Manual de Usuario	119
Anexo 16. Planos	126

INTRODUCCIÓN

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La revolución industrial vino dada por la explotación de obreros a los cuales se les obligaba a trabajar en procesos en serie durante largas horas y con salarios muy bajos. Todos estos procesos dieron un giro de 360 grados cuando nació la Robótica y con ella la utilización de los Brazos Robóticos que controlen procesos en cadena durante horas y a velocidades mayores sin la necesidad de salarios o vacaciones.

El uso de sistemas robóticos en la industria, para cumplir funciones que requieren extrema precisión ha ido en ascenso en las últimas décadas. El desarrollo de estos sistemas se ha enfocado en mejorar ciertos aspectos como resistencia para trabajar en diferentes condiciones, precisión con la que se realizan movimientos, multifuncionalidad (manipulación, corte, perforación, etc.), adaptabilidad en diferentes entornos de trabajo y la independencia en su funcionamiento, es decir que tenga la capacidad de tomar decisiones respecto a su actuación (Alonzo, 2014).

La problemática que se pretende satisfacer, es la necesidad de generar diseños propios u originales de sistemas de Brazo Robótico, que puedan ser empleados en la enseñanza y en la investigación para la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte, realizando un estudio detallado para entregar un prototipo funcional y de calidad.

Los alumnos a través de este Brazo Robótico con fines didácticos pueden aprender a desempeñar tareas como cálculos cinemáticos, programación y sistemas de control así como las relacionadas con las cadenas de producción y la logística empleada en dicho proceso.

OBJETIVO GENERAL

Construir las articulaciones del codo y la muñeca para el prototipo del brazo robótico, para el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros y requisitos de funcionamiento del codo y de la muñeca para el Brazo Robótico “UTN”
- Diseñar las articulaciones del codo y la muñeca con su respectivo sistema de control para el Brazo Robótico “UTN”
- Construir el codo y la muñeca del Brazo Robótico “UTN”
- Ensamblar el codo y la muñeca del Brazo Robótico “UTN”
- Realizar pruebas de funcionamiento y ajustes pertinentes.

ANTECEDENTES

El robot industrial es un manipulador de uso general controlado por computador, consiste en algunos elementos rígidos conectados en serie mediante articulaciones ya sean estas prismáticas o de revolución. El final de la cadena de eslabones está fijo a una base soporte, mientras el otro extremo está libre y equipado con una herramienta para manipular objetos o realizar las tareas que se requieran. Mecánicamente, un robot industrial se compone de un brazo más una herramienta. Estos conceptos se ilustran para el robot Cincinnati Milacron y el robot PUMA de Unimation, que se muestra en la *Figura 0.1*. (FU, GONZALEZ, & LEE, 1988)

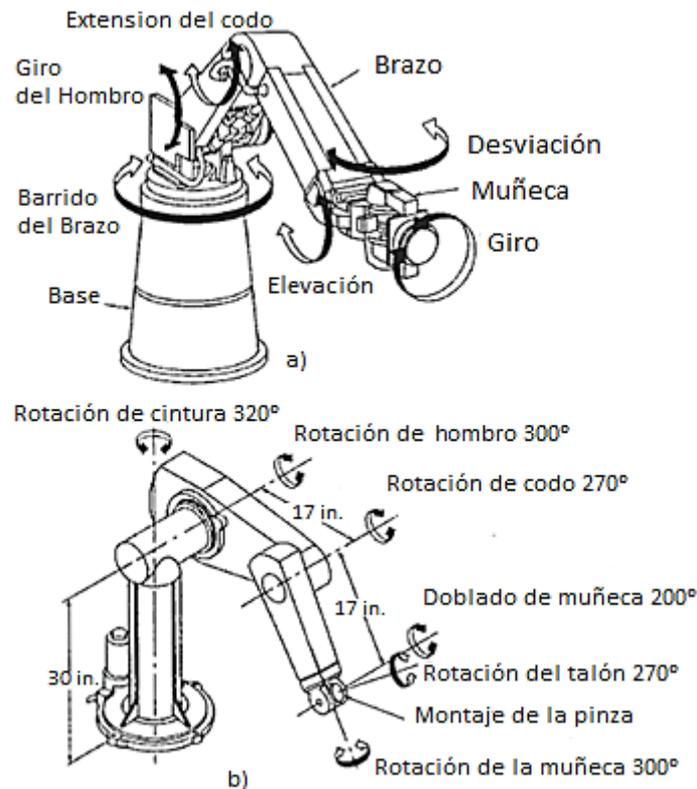


Figura 0.1. a) Robot Cincinnati Milacron. b) Robot de la serie PUMA 560

Fuente: (FU, GONZALEZ, & LEE, 1988)

BRAZOS ROBÓTICOS INDUSTRIALES.

Existen varias compañías que diseñan y construyen robots industriales, entre las más importantes se encuentran FANUC, ABB, KUKA, MOTOMAN, EPSON; cuentan con variados modelos de robots para diferentes aplicaciones industriales, como por ejemplo brazos robot para procesos de pintura y soldadura como se ve en la *Figura 0.2.* (Reyes Cortés, 2011)



Figura 0.2. Brazos robóticos para procesos de pintura y suelda.

Fuente: (Reyes Cortés, 2011)

BRAZOS ROBÓTICOS EN EL ECUADOR

El desarrollo de brazos robóticos en el Ecuador se ha visto frenado debido a los altos costos que suponen la investigación y desarrollo de los mismos.

Los brazos robóticos elaborados en el país son en su mayoría de carácter académico como por ejemplo, el caso del “Brazo Robot, para el Reconocimiento y Manipulación De Objetos, Controlado mediante Inteligencia Artificial, como complemento de Tecnología Robótica En La Carrera De Electrónica Y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península De Santa Elena Año 2014.” En este trabajo se presenta la implementación de un brazo robot, para el reconocimiento y manipulación de objetos, controlado mediante inteligencia artificial.(De La Rosa Mejillón, 2014)

Otro brazo robótico desarrollado en el Ecuador es el realizado en la Universidad San Francisco de Quito, titulado “Diseño, construcción y control de un brazo robótico”. El proyecto consiste en el diseño, construcción y control de un brazo robótico automatizado con cuatro grados de libertad.(Alonzo & Bravo, 2014)

La empresa Soft Tetratonic es una de las empresas reconocidas por la distribución de brazos robóticos en el país, fundada por Fausto Amaguaña, Óscar Molina y Andrés Freire, en el año 2007 en la ciudad de Quito, y se convirtió en distribuidor autorizado de la firma Alemana Kuka, una de las más reconocidas en robótica industrial.(COMERCIO, 2010)

JUSTIFICACIÓN

El uso de brazos robóticos es muy común en las industrias por la precisión con la que cuentan, y/o para la ejecución de actividades que presentan un riesgo para los operadores.

El diseño y construcción de un brazo robótico articulado, de fácil uso y adaptación, ayudará a comprender su funcionamiento y servirá de apoyo para futuros proyectos de los estudiantes de

la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, en dónde ellos pueden aprender a desempeñar tareas relacionadas con las cadenas de producción y la logística empleada en un proceso.

La elaboración de este proyecto abarca varios conocimientos que se fueron adquiriendo a lo largo de la estancia en la Universidad, cabe recalcar que no influye, deteriora o contamina el medio ambiente y constará de dispositivos disponibles en el mercado.

ALCANCE

La construcción de un brazo robot articulado, será realizada de tal manera que el usuario pueda asignar tareas para que el manipulador las ejecute. La información para poder realizar una tarea será administrada a través de un computador y estará constituida por coordenadas iniciales, en las que se encuentra el objeto o pieza que se desea mover, y las coordenadas finales, el lugar hacia el cual se desea mover la pieza de trabajo.

El brazo robótico estará diseñado en su conjunto para trabajar con una capacidad de carga máxima de un kilogramo y será capaz de alcanzar objetos en una distancia de entre 70 a 100cm desde su base. El movimiento de las articulaciones se lo realizará con la ayuda de motores que garanticen la precisión en los movimientos.

El codo del robot será realizado de tal forma que este soporte el peso del antebrazo y del objeto a movilizar, así como también deberá asegurar un movimiento fluido y continuo de dicha articulación. El diseño de la muñeca será realizado de tal manera que esta permita el montaje y desmontaje del elemento final, además deberá ser capaz de generar un movimiento cilíndrico al mismo.

LIMITACIÓN

Disponibilidad de materiales en el país

En el Ecuador no existen empresas que se dedican al diseño y construcción de motores paso a paso y/o micro motorreductores siendo esto uno de los principales inconvenientes a la hora de

realizar un proyecto de esta clase, por lo que se genera la necesidad de importar estos productos del extranjero y esto a su vez provoca que el tiempo de ejecución del proyecto se alargue y su costo incremente.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. GENERALIDADES DE LOS ROBOTS.

1.1. DEFINICIÓN DE ROBOT INDUSTRIAL

Un robot industrial es un robot de uso general, controlado generalmente por computador. La definición exacta de Robot industrial la podemos encontrar en el libro de (Barrientos, 1997).

La *Figura 1.1* muestra la estructura básica de un robot industrial.

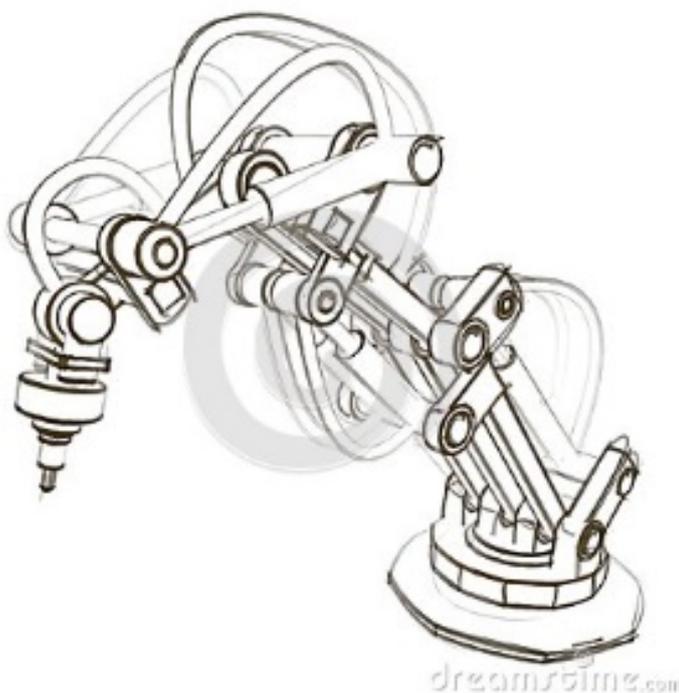


Figura 1.1. Robot Industrial.

1.2. DEFINICIÓN DE ROBOT MANIPULADOR

El robot manipulador es un sistema conformado por eslabones y articulaciones. Podemos encontrar su definición exacta en el texto de (Barrientos, 1997). La *Figura 1.2* indica la estructura básica de un manipulador.

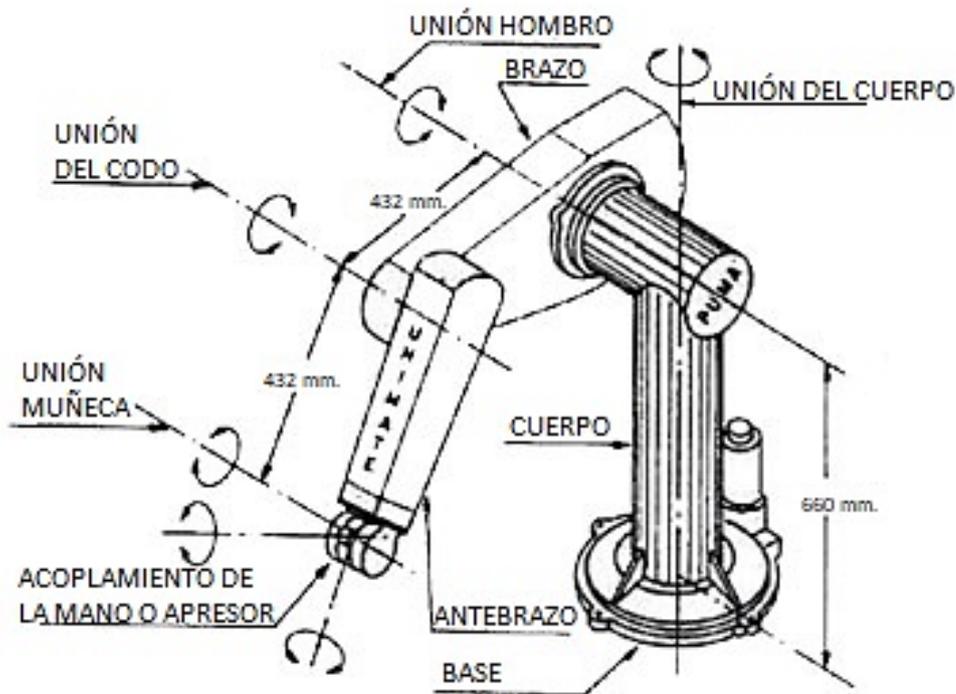


Figura 1.2. Estructura básica de un robot manipulador.

Fuente: (González Zambrano, 2009)

1.3. TIPOS DE CONFIGURACIONES MORFOLÓGICAS.

Los robots manipuladores se clasifican morfológicamente de acuerdo a la configuración de su brazo y de acuerdo a (Olier Caparroso, Avilés, & Hernández Bello, 1999) están clasificados dentro de los siguientes cinco tipos:

- Configuración cartesiana.
- Configuración cilíndrica.
- Configuración esférica.
- Configuración articulada.
- Configuración SCARA.

Las configuraciones morfológicas mencionadas pueden ser apreciadas en la *Figura 1.3*.

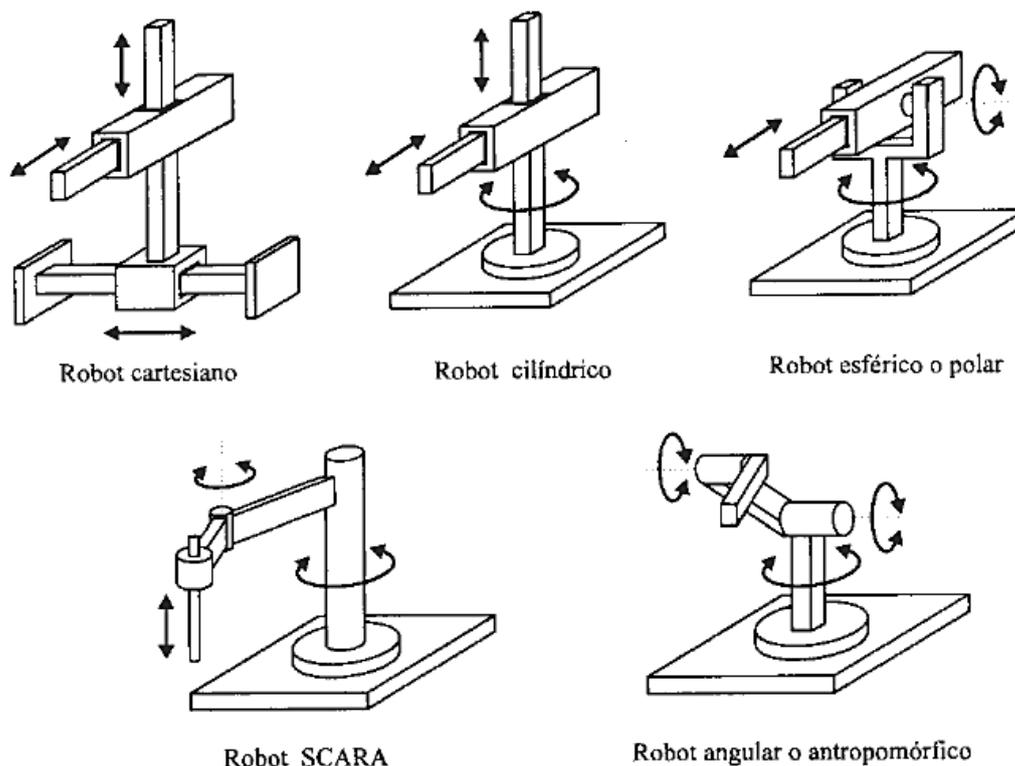


Figura 1.3. Configuraciones morfológicas en robots industriales.

Fuente: (Barrientos, 1997)

1.4. ESLABÓN ANTEBRAZO

El antebrazo de un robot manipulador es un componente estructural que por lo general ha sido realizado en base a dos configuraciones geométricas específicas con respecto a su fabricación. La primera es de un antebrazo con geometría cilíndrica y la segunda es rectangular.

El antebrazo está formado por dos articulaciones que son:

- Articulación de codo.
- Articulación de muñeca.

Las articulaciones mencionadas serán las encargadas de unir al antebrazo del manipulador con el resto de eslabones que lo componen (brazo y elemento final), así como también, de permitir el movimiento entre y con los mismos.

1.4.1. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL ANTEBRAZO ROBOT.

El antebrazo robot conformado por las articulaciones de codo y muñeca requiere tomar en cuenta varias consideraciones para su funcionamiento como lo son:

Funcionabilidad: El antebrazo consta de dos articulaciones rotacionales en sus extremos, como son: Articulación de muñeca y articulación de codo.

Capacidad: La articulación de codo debe asegurar el levantamiento de 1 Kg de peso, adicional al peso propio del antebrazo y del gripper

La articulación de muñeca levanta 1 Kg de peso más el del gripper. También presenta movimiento rotacional en dos ejes, uno para el levantamiento del peso y otro para realizar la rotación sobre el eje del gripper.

Longitud: La longitud del antebrazo es de 30 centímetros más o menos.

Manufactura: La fabricación del antebrazo robot es de una geometría rectangular y debe ser de un bajo nivel de dificultad, asegurando un fácil mantenimiento de sus partes.

Velocidad: La velocidad está dentro de un rango aceptable que garantice la precisión de los movimientos y está regulada por las características de los actuadores empleados.

Sistema de transmisión: El sistema de transmisión se escoge de acuerdo a las necesidades del proyecto y al espacio donde se requiera su aplicación.

1.5. SELECCIÓN DE LA MORFOLOGÍA A USAR EN EL BRAZO ROBOT “UTN”.

Para proceder con la selección de la morfología del manipulador, primero se realiza una comparación de las morfologías existentes y se analiza cual es la mejor opción.

1.5.1. CARACTERÍSTICAS DEL BRAZO ROBOT “UTN”

Las características que debe cumplir el brazo robot “UTN”, se establecen de acuerdo a las principales características que presentan los brazos robot existentes según el texto de (Barrientos, 1997), y son las que se detallan a continuación en la *Tabla 1.1*.

Tabla 1.1.
Características del brazo robot UTN.

<i>CARACTERÍSTICAS DEL BRAZO ROBOT UTN</i>			
No.	Característica.	Valoración	
1	6 Grados de libertad	5	
2	Espacio de trabajo	Longitud: Entre 70 a 100cm	2,5
		Giro: Entre 0° y 180°	2,5
3	Capacidad de carga (1Kg.).	5	
4	Precisión	4	
5	Repetibilidad	3	
6	Fácil programabilidad.	3	

La valoración de la *Tabla 1.1* se establece en relación a la importancia de las características que se busca obtener en la selección de la configuración morfológica del brazo robot UTN, siendo 5 la valoración de mayor nivel y 1 la de menor.

1.5.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES MORFOLÓGICAS.

En la *Tabla 1.2* se encuentran algunas ventajas y desventajas para cada una de las configuraciones morfológicas que puede obtener un robot manipulador.

Tabla 1.2.
Ventajas y desventajas de las configuraciones morfológicas.

<i>CONFIGURACIONES MORFOLÓGICAS</i>		
CONFIGURACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CARTESIANA	Sus movimientos son por trayectorias	Solo permite realizar movimientos lineales
ARTICULADA	Sus movimientos pueden ser lineales a rotacionales. Ideales para trabajos en espacios pequeños.	El modelo cinemático se vuelve complejo. El control de un movimiento lineal es difícil.
CILÍNDRICA	El robot se ajusta bien a los espacios de trabajo redondos.	Las máquinas que trabajen con este robot deben estar colocadas cilíndricamente alrededor de este.
ESFÉRICA	Sus movimientos permiten al robot apuntar en muchas direcciones	Complejo control y funcionamiento.
SCARA	Puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance.	Desplazamiento en el eje "Z" limitado

1.5.3. SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN MORFOLÓGICA.

Para la correcta selección de la morfología a aplicarse se realiza una lista de control como se muestra en la *Tabla 1.3*, donde se lleva a cabo una validación de cumplimiento de las características establecidas en la *Tabla 1.1* acerca del brazo robot "UTN".

Tabla 1.3.
Lista de control de cumplimiento de las características requeridas en brazo "UTN"

<i>Selección de la morfología del brazo robot.</i>									
No	Tipo de configuración	6 Grados de libertad	Espacio de trabajo.		Capacidad de carga (1Kg)	Precisión	Repetibilidad.	Fácil programabilidad	Puntaje final
			Longitud: entre 70 a 100 cm.	Giro: entre -170° y 170°					
1	Cartesiana		X		X	X	X	X	17,5
2	Articulada	X	X	X	X	X	X	X	25
3	Cilíndrica		X	X	X	X	X	X	20
4	Esférica		X	X	X	X	X		17
5	SCARA		X	X	X	X	X		17

De acuerdo a la puntuación obtenida en la *Tabla 1.3*, y a las ventajas que se muestran en la *Tabla 1.2* se realiza la selección de la configuración morfológica que se establece en el presente proyecto; siendo LA CONFIGURACIÓN ARTICULADA la que se incorpora en el brazo robot "UTN", por ser la más óptima y la que cumple con todos los parámetros básicos requeridos en el proyecto.

1.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS ROBOTS MANIPULADORES.

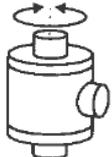
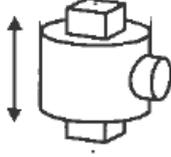
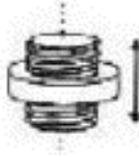
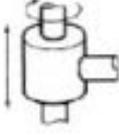
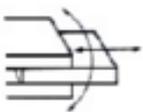
Las características más importantes de los robots manipuladores son las que se describen a continuación, según (González Zambrano, 2009):

- Grados de libertad.
- Velocidad.
- Tipo de actuadores.
- Espacio de trabajo.
- Programabilidad.
- Precisión de movimientos.
- Capacidad de carga.

1.7.TIPOS DE ARTICULACIONES.

Las articulaciones son aquellas que permiten el movimiento de dos eslabones que se encuentran unidos entre sí mediante ella, los diferentes tipos de articulaciones se pueden observar en la *Tabla 1.4*, según (Ollero Baturone, 2001).

Tabla 1.4.
Características de las articulaciones y grados de libertad.

<i>TIPOS DE ARTICULACIONES.</i>			
ARTICULACIÓN	CARACTERÍSTICA	ESQUEMA	GRADOS DE LIBERTAD.
Rotación o Revolución.	Rotación alrededor del eje de la articulación.		1
Prismática.	Traslación a lo largo del eje de la articulación.		1
Tornillo	Permite una rotación y una traslación respecto a la rotación.		1
Cilíndrica	Permite una rotación y una traslación.		2
Planar	Movimiento de desplazamiento en un plano.		2
Esférica(Rotula)	Permite el giro en tres direcciones en el espacio.		3

Fuente: (Ollero Baturone, 2001)

En la *sección 1.5.3* de este capítulo se establece que la configuración a realizarse en el brazo robot UTN es la morfología articulada, por lo cual se implementan articulaciones de revolución en el proyecto.

1.8. ACTUADORES

Un actuador es un dispositivo que convierte una fuente de energía en movimiento; existen actuadores neumáticos, hidráulicos y eléctricos.

1.8.1. SELECCIÓN DEL ACTUADOR.

La selección del actuador se realiza únicamente con los de tipo eléctrico, debido a las características del robot citadas en la *Tabla 1.1*.

1.8.1.1. TIPOS DE ACTUADORES ELÉCTRICOS.

Dentro de los actuadores eléctricos encontramos:

- Motor DC.
- Motor AC.
- Servomotor.
- Motor paso a paso.

De los motores mencionados se excluye al motor AC de la selección ya que este es de gran tamaño y no es aplicable en el presente proyecto.

En la *Tabla 1.5* se encuentran unas cuantas ventajas y desventajas que presentan los diferentes actuadores eléctricos.

Tabla 1.5.
Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de motores.

MOTOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS	IMAGEN
MOTOR DC	Potencias altas Regulación de rpm Robustos.	Alto consumo de corriente No tan precisos Requiere un circuito de control.	
MOTOR PASO A PASO	Alta precisión Bajo consumo de corriente Necesitan controladores más sencillos.	Circuito de control externo. Bajas potencias. Bajas velocidades.	
SERVOMOTOR	Altos pares Gran precisión Estabilidad de velocidad	Alto costo. Servomotores de gran potencia Requieren drivers de alto valor económico.	

Fuente:(Lovine, 2002)

1.8.1.2. CARACTERÍSTICAS DESEADAS EN EL ACTUADOR.

Las características que se buscan obtener de la selección del actuador son las que se detallan a continuación en la *Tabla 1.6*.

Tabla 1.6.
Características del actuador.

CARACTERÍSTICAS DEL ACTUADOR		
No.	Característica.	Valoración
1	Bajo costo	3
2	Fácil Programabilidad.	3
3	Precisión	3
4	Alto torque	4
5	Baja velocidad	2
6	Fácil control de posición.	2
7	Bajo consumo de corriente.	3

La valoración de la *Tabla 1.6* se establece en relación a la importancia de la característica que se busca obtener en la selección del actuador, siendo 4 la valoración de mayor nivel y 1 la de menor.

1.8.1.3. SELECCIÓN DEL ACTUADOR ELÉCTRICO.

El actuador eléctrico debe cumplir con las características mencionadas en la *Tabla 1.6*, se realiza a continuación una lista de control en la que se puede apreciar de mejor manera el actuador que conviene elegir.

Tabla 1.7.

Lista de control para selección del actuador.

Selección del actuador.

No.	Motor	Torque alto.	Baja velocidad.	Bajo costo.	Bajo consumo de corriente.	Precisión	Fácil control de posición.	Fácil Programabilidad	Puntaje final
1	Motor DC	x							4
2	M. paso a paso	x	x	x	x	x	x	x	17
3	Servomotor	x	x		x	x	x	x	14

Luego de analizar los resultados obtenidos en la *Tabla 1.7*, se establece que el mejor actuador eléctrico a incorporar en el antebrazo robot será el motor paso a paso, debido a que sus características son las óptimas para la realización de este proyecto.

1.9. SENSORES DE POSICIÓN

En el control de posición angular se emplean fundamentalmente los denominados encoders y resolvers. Los potenciómetros presentan bajas prestaciones por lo que no se emplean salvo en contadas ocasiones.

-ENCODERS.- Los codificadores ópticos o encoders constan en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas colocadas radial y equidistantemente entre sí; de un sistema de iluminación en el que la luz es enviada y recibida en forma paralela, desde un elemento fotorreceptor como se aprecia en la *Figura 1.4.*(Barrientos, 1997)

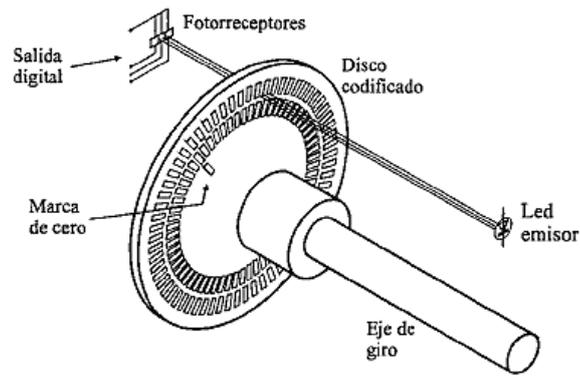


Figura 1.4. Codificador óptico (encoder)

Fuente:(Barrientos, 1997)

-RESOLVERS.- Los resolvers o sincro resolvers son captadores analógicos con resolución teóricamente infinita. Su funcionamiento se basa en la utilización de una bobina solidaria al eje excitada por una portadora, generalmente a 400Hz y por dos bobinas fijas situadas a su alrededor, tal como se aprecia en la *Figura 1.5.*(Barrientos, 1997)

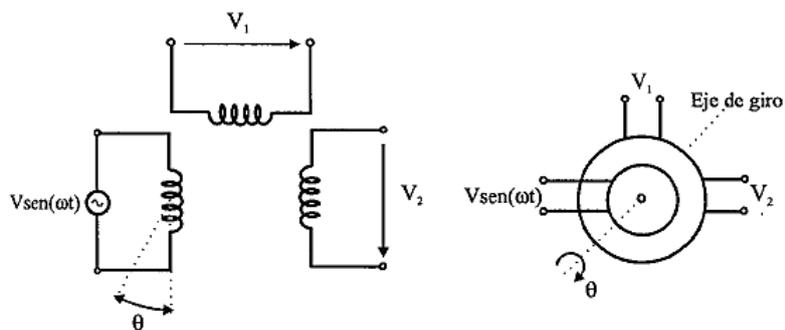


Figura 1.5. Esquema de funcionamiento de un resolver.

Fuente:(Barrientos, 1997)

A continuación se presenta una tabla donde se muestra una comparación entre los distintos de sensores de posición angular, de acuerdo a diversos parámetros de funcionamiento, en donde, se mencionan las prestaciones de estos sensores.

Tabla 1.8.
Comparación entre los sensores de posición angular.

Sensores de posición angular.

	Robustez Mecánica	Rango Dinámico	Resolución	Estabilidad Térmica
Encoder	mala	media	buena	buena
Resolver	buena	buena	buena	buena
Potenciómetro	regular	mala	mala	mala

Fuente:(Barrientos, 1997)

1.10. TRANSMISIÓN DE POTENCIA.

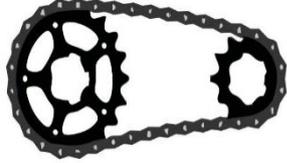
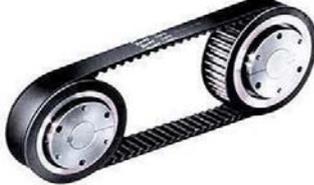
Se incorpora una transmisión de potencia en el proyecto para asegurar el correcto movimiento de las articulaciones del eslabón antebrazo, mediante su aplicación se logra reducir la velocidad y generar el alto torque que se necesita en el proyecto.

Existen varios tipos de transmisión de potencia, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Cadenas.
- Correas de transmisión.
- Engranajes.
- Tornillo sinfín.

El uso y aplicación de estos sistemas de transmisión se lo realiza de acuerdo a los requerimientos del sistema, en la *Tabla 1.9* se puede apreciar las ventajas y desventajas que presenta el uso de las diferentes transmisiones.

Tabla 1.9.
Ventajas y desventajas de los sistemas de transmisión.

SISTEMA DE TRANSMISIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	IMAGEN
CADENAS.	Largas distancias. Pares altos. No hay deslizamiento.	Ruido.	
CORREAS DE TRANSMISIÓN.	Largas distancias. Bajo costo. Silenciosas.	No se puede obtener pares muy altos.	
ENGRANAJES.	Pares altos. No hay deslizamiento. Bajo mantenimiento.	Holgura. Alto costo. Ruido.	
SINFÍN.	Pares altos. Poca holgura. Capacidad de auto bloqueo.	Rozamiento.	

1.11. MATERIAL

El material a utilizar en el antebrazo robot es elegido en base a criterios específicos que requiere el proyecto, buscando que brinden dureza, menor peso y bajo costo al proyecto. Se realiza una comparación entre varios materiales como se detallan a continuación:

- Madera.
- Acero ASTM A36.
- Aluminio ASTM A1200.
- PVC.

- Hierro.

Se elabora una comparación de los diversos materiales analizando su dureza, densidad, precio y su maquinabilidad.

Tabla 1.10.
Propiedades de los materiales

Material	Dureza [HV]	Densidad [Kg/m ³]	Precio[USD/Kg]	Maquinabilidad
Madera	3-9	700-800	1-1.5	5
Acero ASTM A36	130-570	7600-8100	2-8.5	2-3
Aluminio ASTM A1200	60-150	2500-2900	1-2	4-5
PVC	10.6-15.6	1300-1580	1-1.5	3-4
Hierro	90-310	7050-7250	0.5-0.8	4

Fuente:(Granta, 2005)

Es importante aclarar que en maquinabilidad, 1 corresponde a regular (malo) y 5 a excelente.

Como se puede apreciar en la *Tabla 1.10* el material que mejores prestaciones presenta es el aluminio ASTM A1200 debido a que presenta una dureza, peso y precio satisfactorios con respecto a los demás materiales con los que se lo comparó; además que es un material de maquinabilidad excelente. *Ver Anexo 1*

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1. INVESTIGACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

BIBLIOGRÁFICA.

El desarrollo del proyecto empieza con la búsqueda y recopilación de información que se pueda encontrar de trabajos realizados en artículos científicos, revistas especializadas, avances tecnológicos, libros, tesis, entre otros.

Se realiza la investigación acerca de los robots manipuladores existentes en el mercado, sus usos, el tipo de morfología que los caracterizan, además de sus grados de libertad y características.

Se elaboran tablas de comparación de manipuladores y se escoge el de mejores prestaciones para incorporarlo en el proyecto.

2.2. SELECCIÓN DE MATERIALES.

Se realiza una selección del material a utilizarse en el antebrazo robot. La selección de los materiales permite conocer de forma cercana el peso y tamaño que el antebrazo tiene, como también permite obtener cálculos más precisos en el diseño del modelo.

2.3. MODELADO DEL DISEÑO.

Con la información recopilada de los diferentes tipos de manipuladores existentes y conociendo los materiales y componentes que se usan en el proyecto se procede a realizar el modelado CAD de las articulaciones de codo y muñeca así como el eslabón del antebrazo robot.

Posteriormente se procede a realizar el ensamblaje de las articulaciones y el eslabón, para luego realizar una simulación del modelo donde se comprueba que resiste las cargas a las que se encuentra sometido, asegurando la fiabilidad del diseño.

Una vez se verifica el diseño se procede a la adquisición de los materiales necesarios para la elaboración del proyecto.

2.4. DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y PROGRAMACIÓN.

Se eligen los actuadores que se incorporan dentro del proyecto y se procede a la elaboración de las placas electrónicas que sirven para controlar el movimiento de los mismos.

Una vez seleccionado los actuadores y fabricadas las placas de control, se procede a la programación de las articulaciones del antebrazo.

2.5. ENSAMBLAJE DEL MECANISMO

Posteriormente a la fabricación de todas las partes mecánicas y electrónicas del antebrazo robot se procede a realizar el ensamble de todo el mecanismo verificando su buen funcionamiento y correcta colocación.

2.6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.

Se realiza pruebas de funcionamiento para verificar que todos los componentes trabajen correctamente.

2.7. DESARROLLO DEL MARCO METODOLÓGICO

2.7.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

Se recuerda que la morfología escogida para la elaboración del proyecto fue la articulada.

A continuación se detallan algunas especificaciones que debe cumplir el antebrazo robot:

Funcionabilidad: El antebrazo consta de dos articulaciones en sus extremos, siendo estas: Articulación de muñeca y articulación de codo, las cuales realizan movimientos de rotación.

Peso: El antebrazo debe ser capaz de levantar 1Kg de peso del objeto a manipular, más el peso del gripper y su propio peso.

Longitud: La longitud aproximada del antebrazo será de 30 centímetros.

Manufactura: Los procesos de manufactura deben ser de bajo nivel de dificultad, asegurando un fácil mantenimiento de sus partes.

Velocidad: La velocidad es de un rango aceptable que garantice la precisión de los movimientos.

2.7.2. DISEÑO DEL ANTEBRAZO

El diseño del antebrazo es realizado de tal forma que este disponga de dos articulaciones rotacionales en sus extremos:

Articulación de muñeca.

Articulación de codo.

2.7.2.1. DISEÑO DE LA ARTICULACIÓN DE MUÑECA

La muñeca se encuentra sometida a una carga que produce una flexión ocasionada por el peso mismo del elemento final y el peso del objeto a levantarse, además una torsión al realizar la rotación del gripper.

Los parámetros necesarios para el diseño son:

- El peso propuesto a levantarse es de 1kg.
- El peso del elemento final es de 0,6 kg.
- La longitud del elemento final es de 0,25 m.
- Rotación del giro de la muñeca es de 360 grados.
- Rotación de la elevación de la muñeca es de 180 grados.
- Radio del gripper más el objeto a levantar es de 0.2 m.

El diagrama de cuerpo libre de la *Figura 2.1* representa las fuerzas que actúan sobre el elemento final, las mismas que tiene que soportar la muñeca.

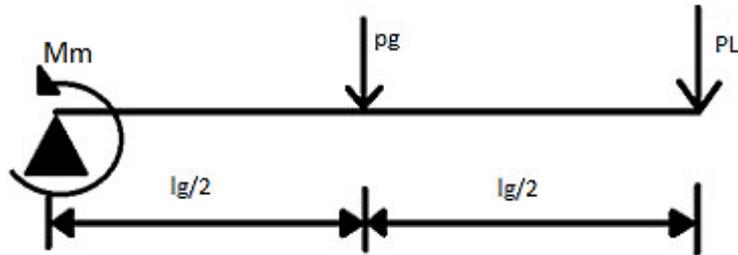


Figura 2.1. Diagrama de cuerpo libre del elemento final.

donde:

$p_g = 0.6 \text{ Kg}$. Peso propio del elemento final.

$PL = 1 \text{ Kg}$. Peso del objeto a levantar.

$l_g = 0,25 \text{ m}$. Longitud del elemento final.

Se toma en cuenta el efecto que tiene el elemento final (gripper) en la articulación de muñeca, se utiliza el método de traslación de fuerzas, el mismo que genera un momento en la muñeca M_m , para facilitar los cálculos se cambian las unidades de kg a N.

Ecuación 1. Momento.

$$M = F * d$$

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

donde:

$M =$ Momento resultante del traslado de fuerzas hacia la muñeca.

$F =$ Fuerza ejercida sobre el elemento final.

$d =$ Distancia desde la fuerza hasta el punto de apoyo

$$M_m = PL(l_g) + p_g(l_g/2)$$

$$M_m = 3,19 \text{ N.m}$$

A este resultado se le asigna un factor de seguridad de 1,5 para brindar mayor seguridad al diseño y despreciar el rozamiento existente.

$$Mm * 1,5 = 4,78 \text{ N.m}$$

Dando como resultado el torque necesario para la selección del motor de la muñeca que se encarga de levantar el gripper y el objeto que va a manipular.

Para el cálculo de rotación del giro de la muñeca se analiza al elemento final más el objeto a levantar como un disco sólido, con la ayuda de la *Ecuación 2*.

Ecuación 2. Cálculo del torque de un objeto rotando sobre un eje sólido.

$$\tau = I * \alpha$$

Fuente: (Serway. Raymond & Jewett. Jhon, 2008)

Donde:

I= Inercia.

α = Aceleración angular.

La aceleración angular se calcula a partir de la velocidad del motor, se emplea la *Ecuación 3*:

Ecuación 3. Velocidad angular

$$\omega = \omega_0 + \alpha.t$$

Fuente: (Serway. Raymond & Jewett. Jhon, 2008)

donde:

ω = 10 rpm Velocidad final. (Velocidad máxima que puede tener el giro)

ω_0 = 0 rpm Velocidad inicial.

t= 0.1 s Tiempo. (Tiempo de aceleración de la mayoría de motores a pasos)

Reemplazando los valores en la ecuación y despejando la aceleración angular se tiene:

$$\alpha = \frac{\omega}{t}$$

$$\alpha = 10,47 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Luego de obtener la aceleración angular se procede a calcular la inercia, la masa a calcular es el resultado de la suma de la masa del objeto a levantar más la masa del gripper, Por lo tanto:

$$m = m_g + m_l$$

donde:

m_g = Masa del gripper.

m_l = Masa del objeto a levantar.

$$m = m_g + m_l$$

$$m = 1.6 \text{ kg}$$

Con los datos necesarios se procede a calcular la inercia que existe en la rotación de la muñeca mediante el uso de la *Ecuación 4*.

Ecuación 4. Inercia

$$I = \frac{1}{2} m * r^2$$

Fuente:(Serway.Raymond & Jewett.Jhon, 2008)

Donde:

I = Inercia.

m = masa del gripper y el objeto.

r = Radio del gripper.

Al reemplazar los valores en la ecuación se obtiene el torque del actuador para el giro de la muñeca:

$$I = 0.032 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\tau = I * \alpha$$

$$\tau = 0.34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Se asigna un factor de seguridad de 3 debido a que existe incertidumbre en las cargas aplicadas.(Mott, 2006)

$$\tau * 3 = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

2.7.2.2. DISEÑO DE LA ARTICULACIÓN DE CODO.

Los parámetros necesarios para el diseño son:

- La longitud del antebrazo es de 0.3 m.
- El peso del antebrazo es de 3.5 kg como máximo.
- Se trasladan la fuerza y el momento que se genera en el gripper al punto final del antebrazo.

El diagrama de cuerpo libre que se muestra en la *Figura 2.2*, representa las fuerzas que actúan sobre el elemento final y las que soporta el antebrazo.

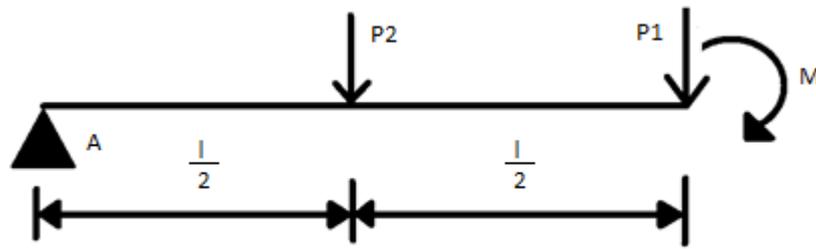


Figura 2.2. Diagrama de cuerpo libre del antebrazo robot.

donde:

$P1 =$ Fuerza resultante del análisis de la muñeca.

$P2 =$ Peso del antebrazo.

datos:

$M = 4,78 \text{ N.m}$ (Momento en la muñeca)

$\frac{l}{2} = 0.15 \text{ m}$

$P1 = 17.7 \text{ N}$

$$P2=24.5 \text{ N}$$

En base al diagrama de cuerpo libre de la *Figura 2.2* se procede a realizar el cálculo del momento en el punto A, para encontrar el torque que se necesita en la articulación de codo.

Así:

Ecuación 5. Sumatoria de momentos.

$$\sum +\Sigma MA = 0$$

Fuente:(Mott, 2006)

$$MA = -M - P1(l) - P2\left(\frac{l}{2}\right)$$

$$MA = 11.57 \text{ N.m}$$

Para brindar mayor seguridad en la selección del motor se añade un factor de seguridad de 1.5 al resultado, dando:

$$MA * 1.5 = 17.36 \text{ N.m}$$

2.7.3. CÁLCULO DEL ESPESOR DE PLANCHA PARA EL DISEÑO.

El cálculo del espesor se realiza en la unión del codo ya que este lugar es el que soporta todas las cargas del diseño y por lo tanto es el punto que tiene más probabilidades de fallar, se recuerda que el material que se utiliza en el diseño es un Aluminio ASTM A1200.

Se tiene como datos de diseño la separación de los 2 pernos que se encuentran en la junta del codo, la distancia es de 40 mm el uno del otro; además del valor del diámetro de los pernos a utilizar que es de 5/32 de pulgada o 4 milímetros.

En la *Figura 2.3* se aprecian dos eslabones que facilitan la interpretación y realización de los cálculos necesarios, se establece al “eslabón a” como fijo y que el “eslabón b” se encuentra soportando el peso del antebrazo, gripper y objeto a levantar.

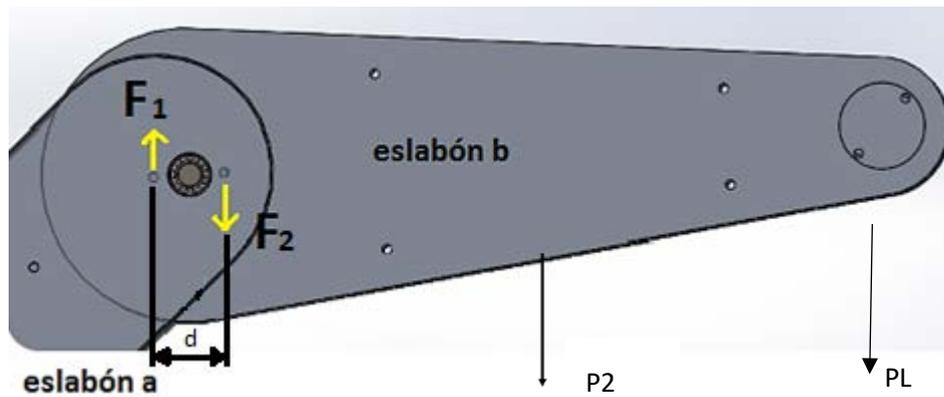


Figura 2.3. Fuerzas que actúan sobre los pernos del codo en el antebrazo robot.

Se realiza el diagrama de cuerpo libre para mejor comprensión:

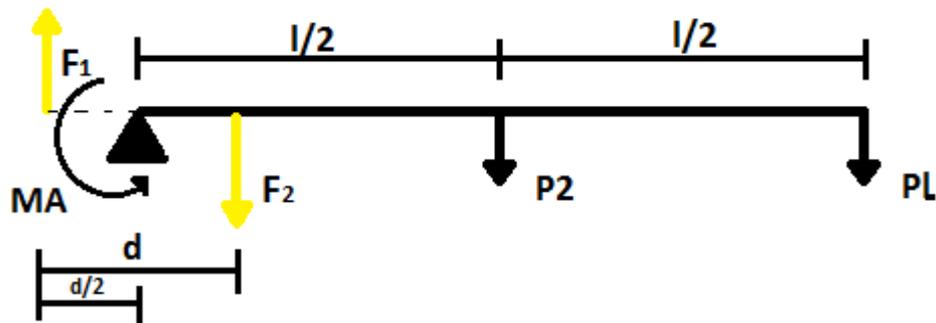


Figura 2.4. Diagrama de cuerpo libre para identificar fuerzas actuantes en los pernos del codo.

Se procede a calcular la fuerza F para lo cual las fuerzas actuantes en la *Figura 2.4*, se pueden encontrar en la *sección 2.7.2* de este capítulo.

Así:

$$F_1 = F_2 = F$$

Ecuación 6. Fuerza.

$$F = \frac{MA}{\frac{d}{2}}$$

Fuente:(Mott, 2006)

$$F = 868 \text{ N}$$

Obtenidos todos los datos necesarios para desarrollar los cálculos, se procede a realizar el análisis de diseño de junta.

2.7.3.1. DISEÑO DE LA JUNTA DE APLASTAMIENTO.

Se determina el perímetro del área aplastada, de acuerdo al diámetro del perno a colocarse.

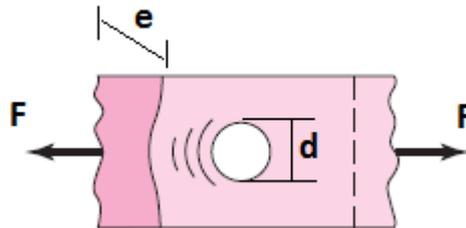


Figura 2.5. Junta de aplastamiento.

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

Se procede a encontrar las variables presentes en la *Figura 2.5*.

donde:

P= Perímetro de la zona de aplastamiento.

d= Diámetro del perno a colocarse.

A= Área de aplastamiento.

e= Espesor.

Para encontrar el perímetro de la zona de aplastamiento se hace uso de la *Ecuación 7*.

Ecuación 7. Perímetro de un círculo.

$$P = \pi \frac{d}{2}$$

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

Como los pernos a utilizar son de 4mm de diámetro, se obtiene un perímetro de:

$$P = 6.28 \text{ mm}$$

Luego de determinar el perímetro se procede a calcular el área de aplastamiento mediante la *Ecuación 8*.

Ecuación 8. Área de aplastamiento.

$$A = P * e$$

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

Para determinar el espesor (e) es necesario calcular la resistencia a la compresión del material a través de la *Ecuación 9*.

Ecuación 9. Esfuerzo.

$$\sigma = \frac{Sy}{fs}$$

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

donde:

σ = Esfuerzo.

Sy = Resistencia a la fluencia.

fs = Factor de seguridad.

La ecuación de esfuerzo se iguala con la ecuación de esfuerzo en perforaciones

Ecuación 10. Esfuerzos

$$\sigma = \frac{F}{nA} = \frac{Sy}{fs}$$

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

La *Ecuación 10* se reemplaza en la *Ecuación 7* y se despeja el espesor (e), así:

$$e = \frac{F * fs}{n * Sy * P}$$

donde:

$e =$ Espesor.

$F =$ Fuerza de aplastamiento.

$f_s =$ Factor de seguridad.

$n =$ Número de pernos a colocarse.

$S_y =$ Resistencia a la fluencia.

$P =$ Perímetro.

La resistencia a la fluencia S_y del aluminio ASTM A1200 es un valor medio de 130 MPa. Ver *Anexo 1*.

Se utiliza un f_s de 4 debido a que existen incertidumbre en las cargas aplicadas. (Budynas & Nisbett, 2008)

$$e = 2.13 \text{ mm}$$

El espesor de plancha necesario para la construcción del antebrazo es de 2,13mm. Debido a que en el mercado no existen planchas con el espesor calculado se procede a escoger una plancha de 3 mm de espesor.

2.7.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.

Para el movimiento de las articulaciones de muñeca del antebrazo robot y de acuerdo al análisis realizado en la *sección 1.8.1* del *Capítulo 1*, se escoge un motor a pasos NEMA 17 con caja reductora a razón de 27:1 con un torque igual a 4 N.m, además se utiliza un motorreductor para la articulación del codo, con un torque igual al anterior, pero con una velocidad de 100 rpm.

2.7.4.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PARA LA MUÑECA.

La articulación de muñeca necesita un torque de 4,78 N.m como se puede apreciar en la *sección 2.7.2.1* de este capítulo.

Se escoge un sistema de transmisión por correas con relación de amplificación 2:1 (Ver Anexo 14) por el espacio que se dispone y además porque no se necesita una gran amplificación del torque, se usa la *Ecuación 11*.

Ecuación 11. Relación de amplificación.

$$T2 = mG * T1$$

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

donde:

T1= Torque que ingresa a la polea a.

T2= Torque que sale por la polea b.

mG= Razón de amplificación.

$$T2 = 8 N.m$$

El torque $T2$ es mayor a lo que necesita la articulación de muñeca por lo cual satisface al diseño.

Se escoge un motor a pasos NEMA 17 con caja reductora 27:1 con un torque de 4 N.m. en base a los cálculos realizados. *Ver Anexo 2*.

2.7.4.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PARA EL CODO.

El sistema a utilizarse en el codo es el de tornillo sinfín y corona ya que posee la capacidad de auto bloqueo y permite generar altos pares, como se lo menciona en el texto. (Norton, 2011).

2.7.4.2.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SINFÍN Y CORONA.

La selección del sistema de transmisión por sinfín y corona se lo realiza de acuerdo a ciertos criterios de selección que se indican a continuación:

- La distancia entre el sinfín y el engrane no puede sobrepasar los 80 mm debido al lugar en que se posicionan.
- Debe poseer capacidad de auto bloqueo.
- Tiene que garantizar precisión en el movimiento.

Por lo tanto el sistema de transmisión escogido es uno de relación 1:60 de la compañía Kohara Gear Industry Co. *Ver Anexo 3.*

2.7.4.2.2. CÁLCULOS PARA DETERMINAR SI EL SINFIN ES DE AUTO BLOQUEO.

Si el engranaje es de auto bloqueo no tiene movimiento de retroceso, es decir, el torque aplicado al engrane no hace girar al tornillo sinfin. Generalmente la capacidad de auto bloqueo se presenta en ángulos de avance que están por debajo de los 6°. (Norton, 2011)

Procedemos a realizar los cálculos necesarios para determinar si el ángulo de avance está por debajo de los 6°.

datos:

d= 16 mm.	Diámetro de paso del sinfin.
NG=60	Número de dientes del engrane.
Nw=1	Número de dientes del sinfin.
$n_s=40$	velocidad del sinfin en rpm.
D=60 mm.	Diámetro de paso del engrane.

El ángulo de avance se calcula con la *Ecuación 12.*

Ecuación 12. Ángulo de avance.

$$\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{L}{\pi * d}\right)$$

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

donde:

λ = Angulo de avance.

L= Avance.

Primero se determina el avance (L) mediante el uso de la *Ecuación 13*.

Ecuación 13. Avance.

$$L = px * Nw$$

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

donde:

L= Avance.

px= paso circular axial.

Se obtiene el paso circular con la *Ecuación 14*.

Ecuación 14. Paso circular.

$$px = \frac{\pi * D}{NG}$$

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2008)

$$px = 3.142 \text{ mm}$$

Reemplazando px en la *Ecuación 13* se tiene que:

$$L = 3.142 \text{ mm}$$

Con todos los datos obtenidos se procede a calcular el ángulo de avance, siendo:

$$\lambda = 3,58^\circ$$

El ángulo de avance (λ) es menor a 6° por lo que queda demostrado que la transmisión sinfín-corona es de auto bloqueo.

2.7.4.2.3. CÁLCULOS PARA SABER LA PRECISIÓN DEL SINFÍN Y CORONA.

El engrane tiene 60 dientes por lo cual el sinfín debe impulsar los 60 dientes para obtener un giro de 360 grados, entonces el avance de cada diente se lo determina mediante una regla de tres, resultando 6° de avance por diente.

2.7.5. DISEÑO DEL EJE PARA EL CODO.

Para realizar el diseño del eje para el codo se debe tener en consideración las cargas que este soporta, así como también el torque que transmite el engrane para generar el movimiento del antebrazo. El torque que entrega el motor elegido es de 4 N.m, el mismo que ingresa en el sinfín. En la *Figura 2.6* podemos observar el modelo preliminar del eje.



Figura 2.6. Eje para el codo

Se realiza el diagrama de cuerpo libre que se muestra en la *Figura 2.7* para observar de forma más rápida y simple las cargas y reacciones que intervienen en el diseño del eje.

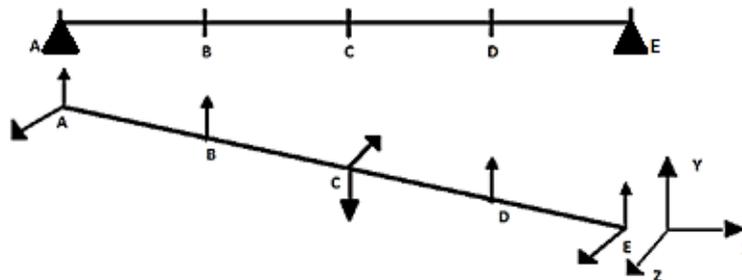


Figura 2.7. Diagrama de cuerpo libre del eje del codo.

Punto A y E

En estos puntos se encuentran las reacciones R_a y R_e .

Puntos B y D

La fuerza actuante en los puntos B y D es la resultante de la suma del peso del antebrazo, el gripper y el objeto a levantar; dando un valor de 42.2 N, la misma que se divide entre dos por el motivo de existir dos apoyos y que solo están presentes en un plano.

Punto C

En el punto *C* se encuentran las fuerzas que entrega el engrane del sistema de transmisión sinfín-corona.

2.7.5.1. FUERZAS EN EL SINFÍN Y ENGRANE.

La *Figura 2.8* muestra las fuerzas actuantes en el sistema y que se proceden a calcular.

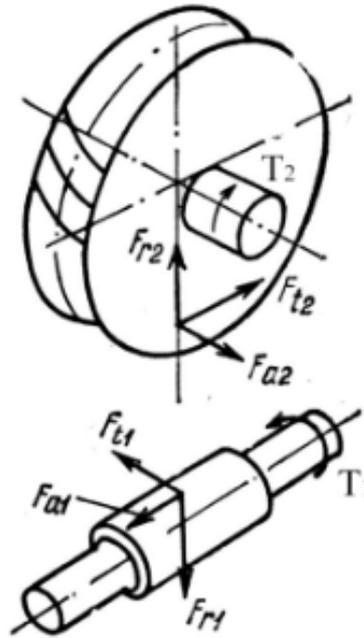


Figura 2.8. Fuerzas en la transmisión sinfín y corona.

Fuente:(Montana et al., 2012)

donde:

F_t = Fuerza Tangencial.

F_a = Fuerza axial.

F_r = Fuerza radial.

Para mayor comodidad en el uso de nomenclatura se cambian los nombres de las fuerzas F_t por W_{tg} , F_a por W_{ag} y F_r por W_r .

La fuerza tangencial (W_{tg}) se calcula con la *Ecuación 15*.

Ecuación 15. Fuerza tangencial de un engrane.

$$W_{tg} = \frac{2 * T_g}{d_g}$$

Fuente:(Norton, 2011)

donde:

W_{tg} = Fuera tangencial.

T_g = Torque sobre el engrane.

d_g = Diámetro del engrane.

Así:

$$W_{tg} = \frac{2 * 17.36 \text{ N.m}}{60 \text{ mm}}$$

$$W_{tg} = 578.67 \text{ N}$$

Para el cálculo de la fuerza axial se emplea la *Ecuación 16*.

Ecuación 16. Fuerza axial de un engrane.

$$W_{ag} = \frac{2 * T_w}{d}$$

Fuente:(Norton, 2011)

donde:

W_{ag} = Fuera axial.

T_w = Torque sobre el sinfín.

d = Diámetro del sinfín.

Así:

$$W_{ag} = \frac{2 * 4 \text{ N.m}}{16 \text{ mm}}$$

$$W_{ag} = 500 \text{ N}$$

La *Ecuación 17* se usa para encontrar la fuerza radial del sistema, teniendo en cuenta que el ángulo de presión ϕ es de 14.5° .

Ecuación 17. Fuerza radial.

$$W_r = W_{tg} * \frac{\tan(\lambda)}{\cos(\phi)}$$

Fuente:(Norton, 2011)

donde:

W_r = Fuerza radial.

W_{tg} = Fuerza tangencial.

λ = Angulo de avance.

ϕ = Angulo de presión.

Así:

$$W_r = 149.94 \text{ N}$$

2.7.5.2. ANÁLISIS EN EL PLANO XY

Con la ayuda de un software se realiza el diagrama de cortes y momentos correspondiente al plano xy, como se muestra en la *Figura 2.9*.

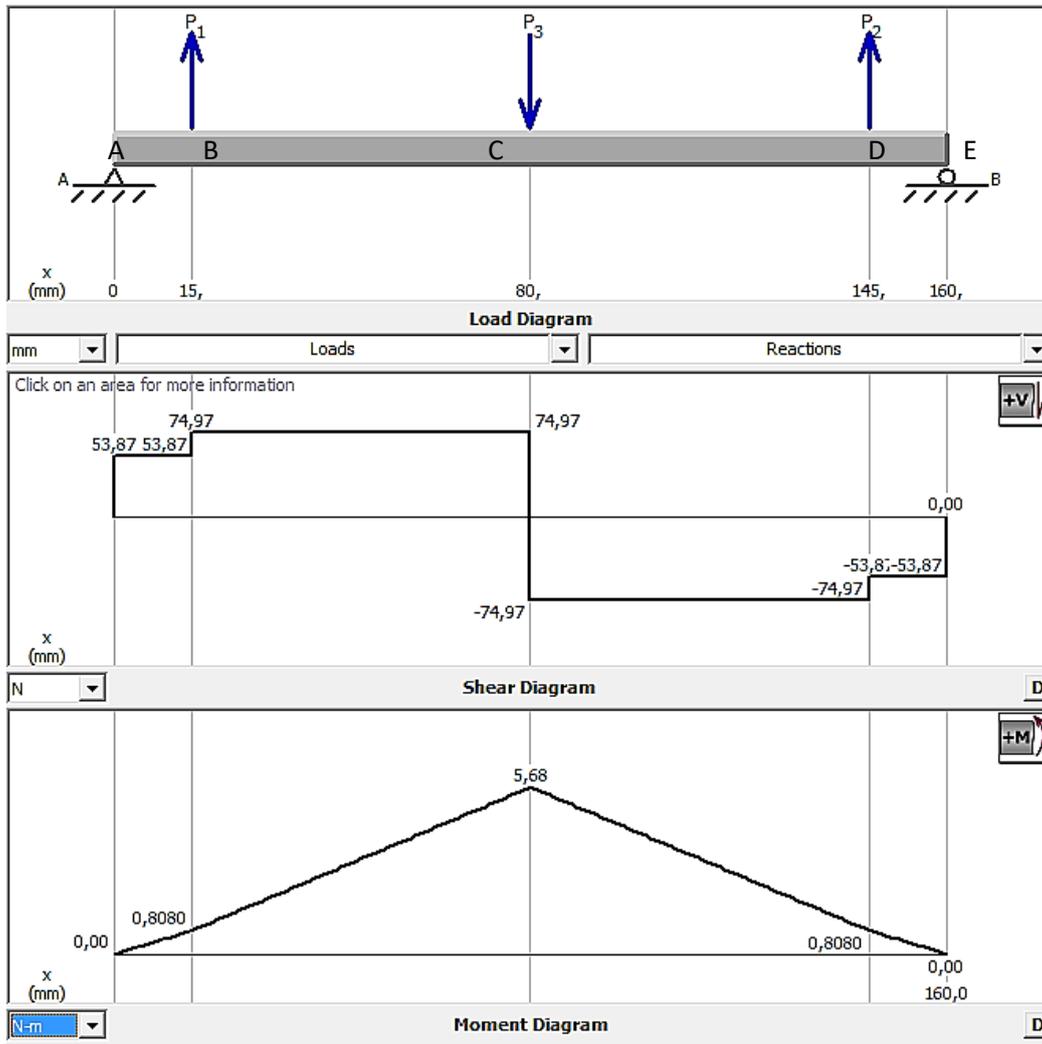


Figura 2.9. Diagramas de cortes y momentos plano XY

$$R_{Ay} = 53.87 \text{ N}$$

$$R_{Ey} = 53.87 \text{ N}$$

2.7.5.3. ANÁLISIS EN EL PLANO XZ

Al igual que en el plano XY se utiliza un software para encontrar de manera fácil y rápida el diagrama de cortes y momentos, como se puede ver en la *Figura 2.10*.

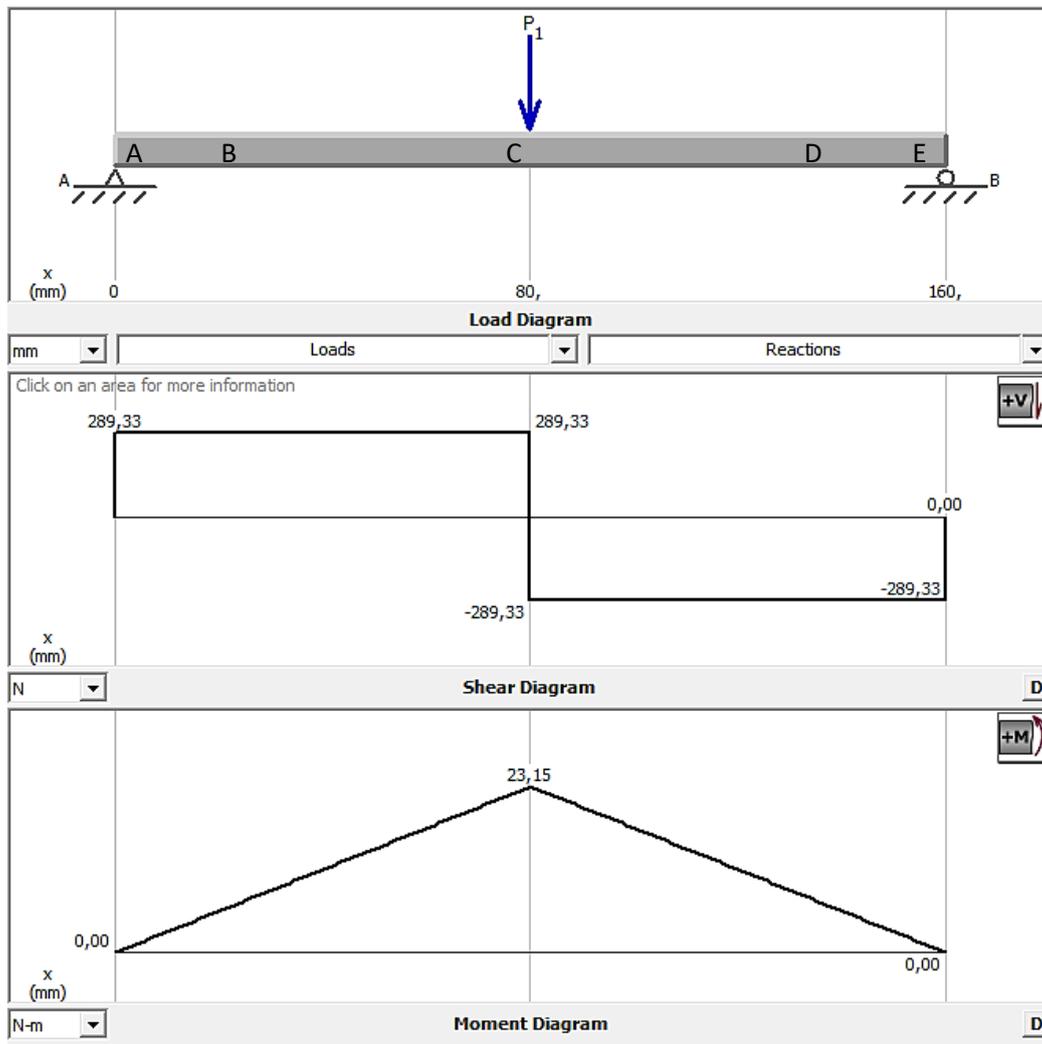


Figura 2.10. Diagrama de cortes y momentos plano XZ.

$$R_{Az} = 289,33 \text{ N}$$

$$R_{Ez} = 289,33 \text{ N}$$

2.7.5.4. DIÁMETROS DEL EJE

Para calcular los diámetros del eje se toman en consideración ciertos parámetros:

El material a utilizarse es un acero AISI 4340 (*Anexo 4*), este material dispone de:

$$S_u = 745 \text{ MPa}$$

$$S_y = 470 \text{ MPa}$$

Se asigna un factor de seguridad $N=3$ ya que existe incertidumbre en las cargas aplicadas en los datos.(Mott, 2006)

El valor de concentración de esfuerzos K_t es de 2.5 por encontrar la presencia de filetes agudos en el eje.(Budynas & Nisbett, 2008)

Es necesario calcular la resistencia real a la fatiga ($S'n$) del material a utilizarse en el diseño del eje mediante la *Ecuación 18*. Los valores que se otorgan a cada variable se encuentran en el libro de diseño de máquinas de Mott. (Mott, 2006)

Ecuación 18. Resistencia real a la fatiga.

$$S'n = S_n * C_m * C_{st} * C_R * C_S$$

Fuente:(Mott, 2006)

donde:

$S'n$ Resistencia real a la fatiga.

$S_n=350\text{Mpa}$ Resistencia a la fatiga.

$C_m=1$ Factor de material.

$C_{st}=1$ Factor de tipo de esfuerzo.

$C_R=0.81$ Factor de confiabilidad.

$C_S=0.93$ Factor de tamaño.

Así:

$$S'n = 263.7 \text{ MPa}$$

Para determinar el diámetro de las diferentes secciones del eje se toma como referencia los datos obtenidos en las *Figuras 2.9* y *2.10*, los cuales se utilizan en la *Ecuación 19*.(Mott, 2006)

Ecuación 19. Calcular diámetro de eje.

$$D = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left[\frac{KtM}{S'n} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{T}{Sy} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Fuente:(Mott, 2006)

donde:

D= Diámetro a calcular.

N= Factor de diseño.

Kt= Concentración de esfuerzo.

M= Momento flector.

T= Torsión.

Sy= Límite de fluencia.

En la *Tabla 2.1* se puede apreciar los diámetros obtenidos luego de utilizar la *Ecuación 19* para cada sección del eje.

Se establece un factor de diseño N=3 debido a que está bajo cargas dinámicas con incertidumbre en las cargas.

Se asigna un factor de concentración de esfuerzo de 2.5 debido a que el diseño se realiza con chaflanes agudos. (Mott, 2006)

Tabla 2.1.
Cálculos para el diámetro del eje.

Punto	Datos	Resultado
A	N=3 M=0 N.m Kt=2.5 S' _n =263.7 MPa. T=17.5 N S _y =470 MPa.	DA=11.3 mm
B	M=0.81 N.m	DB=11.5 mm
C	M=5.68 N.m	DC=14.6 mm
D	M=0.81 N.m	DD=11.5 mm
E	M=0 N.m	DE=11.3 mm

2.7.6. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Luego de calcular el diámetro de las diferentes secciones del eje, se procede a seleccionar los rodamientos que se colocan en el mismo.

Como no existen rodamientos con los diámetros calculados se realiza un ajuste de las medidas del eje, siendo los nuevos diámetros los siguientes:

$$DA=DB=DD=DE= 12 \text{ mm}$$

$$DC=15 \text{ mm}$$

Se escoge el rodamiento de bolas SKF 6001 ya que dispone del diámetro interior requerido en el diseño. Ver *Anexo 5*.

2.7.6.1. VIDA DEL RODAMIENTO

Se espera que el robot funcione 8 horas diarias, con una utilización del 80% de su capacidad. Dando una vida útil del rodamiento comprendida entre 10000 – 25000 horas. ("Catálogo de rodamientos SKF," 2015)

Para una mejor apreciación de la vida del rodamiento se procede a calcular su vida estimada en millones de revoluciones mediante la *Ecuación 20*. (Norton, 2011)

Ecuación 20. Vida del rodamiento.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

Fuente: (Norton, 2011)

donde:

L_{10} = Vida esperada en millones de revoluciones.

C = Carga dinámica básica.

P = Carga constante aplicada.

La carga dinámica básica (C) es un dato que se obtiene del fabricante del rodamiento, los datos más importantes del rodamiento escogido se aprecian en la *Tabla 2.2*.

Tabla 2.2.

Datos rodamiento SKF 6001

<i>Ubicación</i>	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Designación</i>	<i>da (min)</i>	<i>ra (max)</i>
	(<i>mm</i>)	(<i>mm</i>)	(<i>mm</i>)	(<i>kN</i>)	(<i>rpm</i>)		(<i>mm</i>)	(<i>mm</i>)
<i>A</i>	12	28	8	5.4	60000	6001	14	0.3
<i>E</i>	12	28	8	5.4	60000	6001	14	0.3

La carga constante aplicada (P) corresponde a las reacciones en el eje.

$$RA = \sqrt{RAy^2 + RAz^2}$$

$$RA = 0.294 \text{ KN}$$

$$RB = \sqrt{RB_y^2 + RB_z^2}$$

$$RB = 0.294 \text{ KN}$$

Se reemplaza los datos en la *Ecuación 20*, se obtiene:

$$L_{10} = 6177.13$$

2.7.7. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

2.7.7.1. CONDICIONES DE FRONTERA.

El análisis de elementos finitos se lo realiza tomando en cuenta las fuerzas que intervienen en el diseño. Ver *Tabla 2.3*. Se toma en consideración el peso propio del antebrazo, el peso que se traslada del gripper más el objeto a levantar como las fuerzas que intervienen en el análisis y el momento que se genera en la muñeca, como el momento torsor en sentido anti horario.

Tabla 2.3.
Condiciones para el análisis de elementos finitos.

Variable	Valor
Peso del Antebrazo	2,6 Kg
Peso del gripper y objeto a levantar	1,6 Kg
Momento de la muñeca (M)	4,78 N.m
Eje del codo (punto a)	Geometría fija

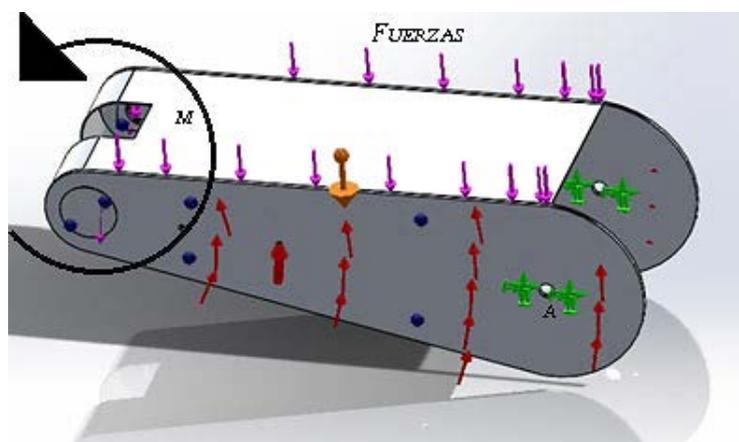


Figura 2.11. Cargas y restricciones

En la *Figura 2.11* se aprecian las flechas de color verde en el punto A, que representan las sujeciones del sistema (Geometría fija). Las fuerzas aplicadas se encuentran representadas con un color violeta y el momento torsor por las flechas de color rojo.

2.7.7.2. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE TENSIÓN VON MISES

El análisis de convergencia se lo realiza en varias iteraciones, cambiando el número de elementos, con la finalidad de encontrar el mejor resultado que se adapte al modelo y que genere el menor error posible frente a sus esfuerzos.

Tabla 2.4.
Análisis del error frente a esfuerzos.

Iteración	N. de Elementos	Esfuerzo [Mpa]	Error [%]
1	14938	14,81	
2	17614	16,238	9,64
3	19287	16,235	0,02
4	20917	15,76	2,93
5	22860	16,43	4,25
6	25069	15,99	2,68
7	29104	14,95	6,51

En la *Tabla 2.4* se aprecian 7 iteraciones diferentes realizadas en el modelo, en donde se puede observar que el menor error frente a los esfuerzos se genera en la iteración número 3. Con los datos obtenidos se procede a realizar el análisis de convergencia como se aprecia en la *Figura 2.12*.

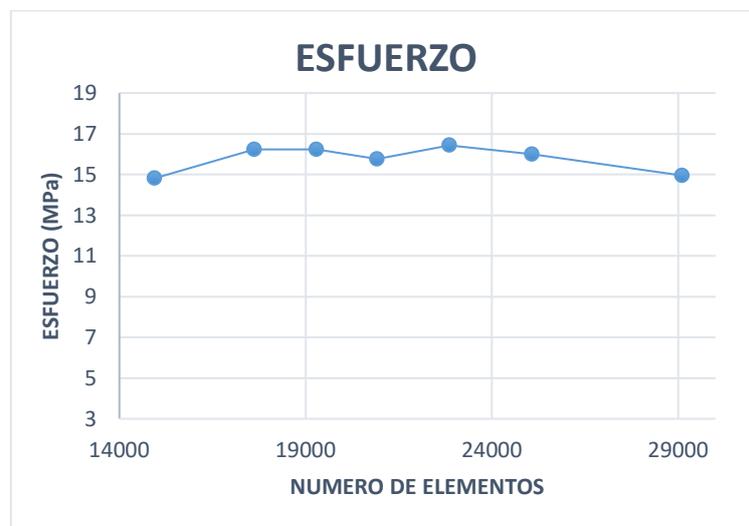


Figura 2.12. Análisis de convergencia.

Entre 14000 y 29000 elementos como se observa en la *Figura 2.12*, se mantiene una curva bastante constante, por lo que se toman estos datos para el análisis estático.

Es importante comprobar que los esfuerzos generados en el análisis de convergencia sean inferiores al límite de fluencia del material, lo que asegura que este no fallará.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis.

En la *Figura 2.13* se aprecia que el esfuerzo mínimo se encuentra en el extremo del brazo en la zona de la muñeca, donde el material no sufre esfuerzo alguno, y a su vez, un esfuerzo máximo de 16.24 MPa en el codo cerca al eje en donde se estableció la sujeción de geometría.

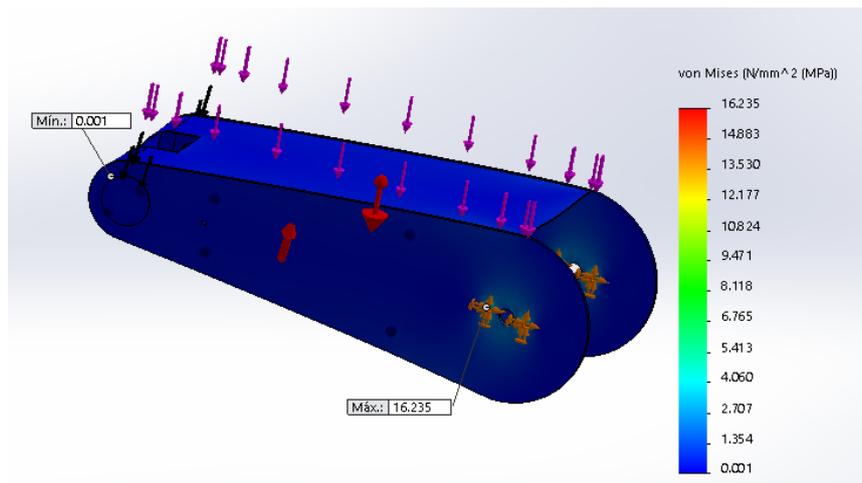


Figura 2.13. Análisis de von Mises

La *Figura 2.14* muestra el máximo desplazamiento que presenta el modelo, siendo este de un valor mínimo, lo que asegura la fiabilidad del diseño.

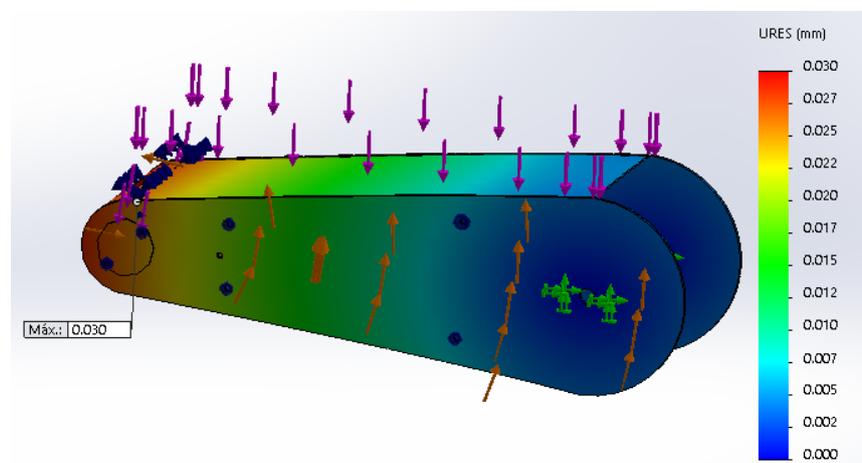


Figura 2.14. Desplazamiento.

En la *Figura 2.15* se puede apreciar el mínimo factor de seguridad, que se encuentra localizado en el codo, siendo este de un valor de 5.54.

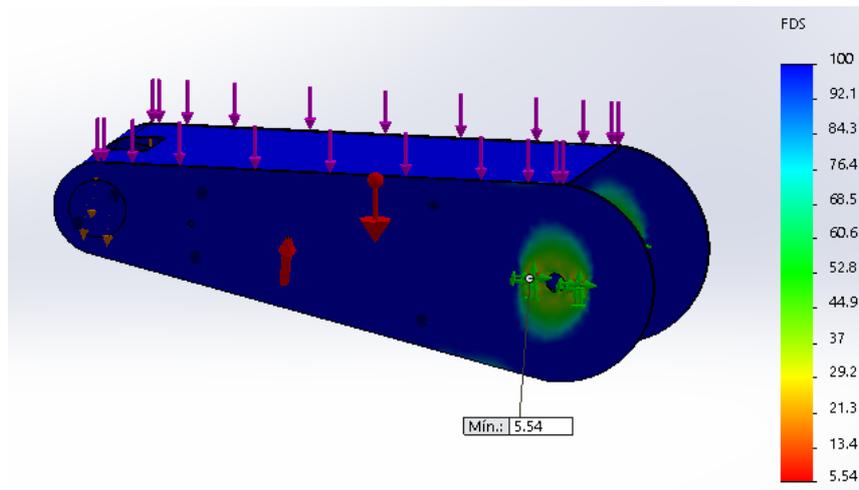


Figura 2.15. Factor de seguridad

2.7.8. CINEMÁTICA

La cinemática de un brazo robot trata acerca de la descripción geométrica de movimiento del manipulador con respecto a un eje de coordenadas de referencia, sin tomar en cuenta las fuerzas que generan el movimiento.(Reyes Cortés, 2011)

Existen dos problemas fundamentales al resolver la cinemática de un brazo robot, ver *Figura 2.16*, uno de ellos se trata de encontrar la posición y orientación final del robot con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, y se lo conoce como el problema cinemático directo; el segundo se lo conoce como el problema cinemático inverso, el cual, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación final conocidas.(Barrientos, 1997)



Figura 2.16. Relación entre cinemática directa e inversa.

Fuente:(Barrientos, 1997)

Denavit y Hartenberg (D-H) propusieron en 1955 un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de la cadena cinemática, y en el caso particular de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método hace uso de la matriz de transformación homogénea para describir la relación espacial entre dos elementos rígidos adyacentes.

Una matriz de transformación homogénea es una matriz 4 x 4, como en la *Ecuación 21*, que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro. (López Apostolovich, 2009)

Ecuación 21. Matriz de transformación homogénea

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix}$$

Fuente: (López Apostolovich, 2009)

2.7.8.1. CINEMÁTICA DIRECTA

La cinemática directa es aquella en la que para obtener la posición y orientación del gripper es necesario establecer un marco de referencia fijo (X_0, Y_0, Z_0) para el cual todos los objetos incluyendo al manipulador son referenciados situándolo dentro, fuera o en la base del robot (Barrientos, 1997)

2.7.8.1.1. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA CINEMÁTICO DIRECTO MEDIANTE MATRICES DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA.

La resolución del problema cinemático directo consiste en encontrar la localización espacial del extremo del robot a partir de los valores de sus coordenadas articulares de manera fácil mediante simples consideraciones geométricas.

Por ejemplo, para el caso de un robot de 2GDL ver *Figura 2.17*, es fácil comprobar que:

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ y &= l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) \end{aligned}$$

Para robots de más grados de libertad puede plantearse un método sistemático basado en la utilización de las matrices de transformación homogénea.

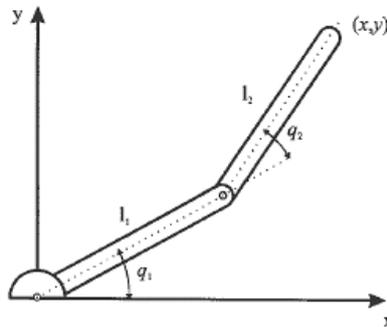


Figura 2.17. Robot planar de 2 GDL

Fuente:(Barrientos, 1997)

La matriz de transformación homogénea que relacionan la posición y orientación de dos eslabones consecutivos se denomina matriz $i-1A_i$.

En un robot de seis grados de libertad, se tiene que la posición y orientación del eslabón final vendrá dada por la matriz T.

$$\mathbf{T} = {}^0\mathbf{A}_6 = {}^0\mathbf{A}_1 {}^1\mathbf{A}_2 {}^2\mathbf{A}_3 {}^3\mathbf{A}_4 {}^4\mathbf{A}_5 {}^5\mathbf{A}_6$$

Al escoger los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón según la representación propuesta por Denavit-Hartenberg será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de la geometría del eslabón.

Estas 4 transformaciones consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permiten relacionar el sistema de referencia de un eslabón i con el sistema de su elemento antecesor $i-1$.

Las transformaciones en cuestión son:

1. Rotación alrededor del eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
2. Traslación a lo largo de z_{i-1} una distancia d_i , vector d_i (0, 0, d_i).
3. Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i , vector a_i (a_i , 0, 0).
4. Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i . (Barrientos, 1997)

Los parámetros Denavit-Hartenberg usados en los eslabones se muestran en la *Tabla 2.5*.

Tabla 2.5.
Parámetros Denavit-Hartenberg

<i>Características de eslabones</i>	
l_i	Longitud del eslabón i-ésimo
d_i	Articulaciones lineales o prismáticas
α_i	Ángulo entre los ejes Z_{i-1} y Z_i medido con respecto al eje X_i
θ_i	Articulaciones rotacionales; representa el ángulo entre los ejes X_{i-1} y X_i medido alrededor del eje Z_{i-1}

Fuente: (Reyes Cortés, 2011)

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

Ecuación 22. Producto de matrices

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

Fuente: (Reyes Cortés, 2011)

Realizando el producto entre matrices se tiene:

Ecuación 23. Producto de matrices

Fuente: (Reyes Cortés, 2011)

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

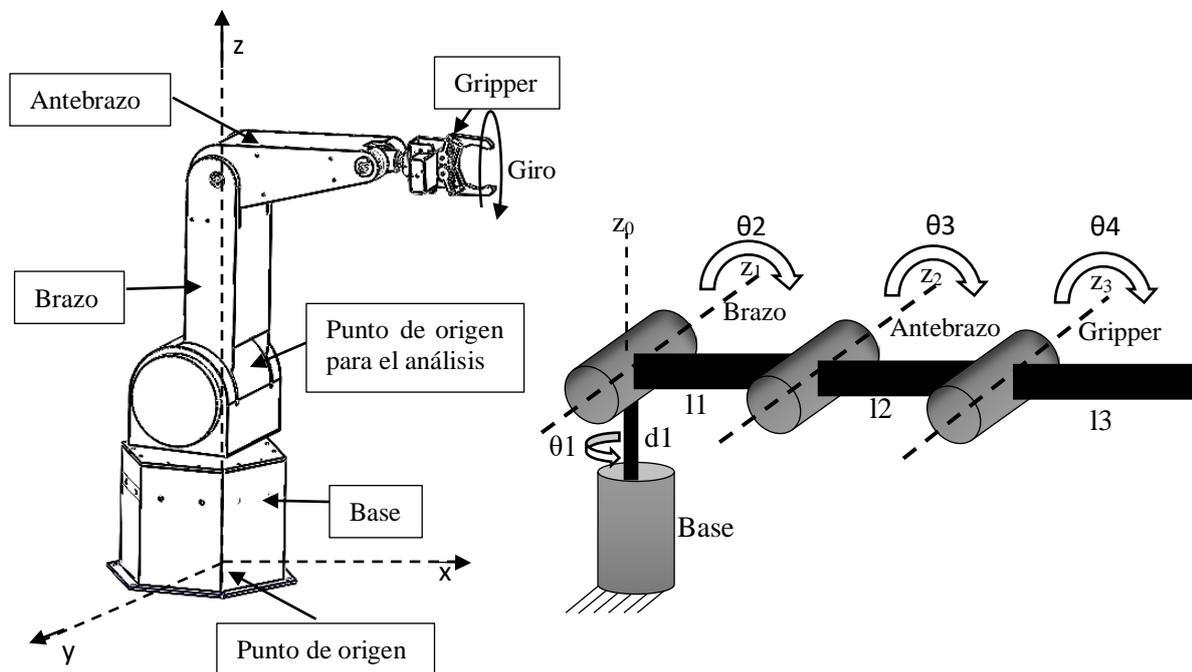
$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_1 C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_1 S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde por simplicidad se utiliza:

C = coseno

S = seno

En el brazo robot UTN el punto de referencia se lo considera en la base, aunque para su análisis, se tomará como referencia el punto inicial del primer eslabón, específicamente en la articulación del hombro como se muestra en la *Figura 2.18*, debido a que el eslabón de la base representa una distancia fija que no afecta en el estudio cinemático.



(a) Marco de referencias para el análisis. (b) Diagrama de bloques del marco del robot UTN.

Figura 2.18. Marco de referencias para el brazo robot UTN.

En la *Tabla 2.6* se muestran los parámetros Denavit-Hartenberg del brazo UTN que se observa en la *Figura 2.18*, dichos parámetros se utilizan para encontrar las matrices de transformación homogénea.

Tabla 2.6. Parámetros D-H para el robot UTN.

i	θ	d	a	α
1	θ_1	d1	0	$\pi/2$
2	θ_2	0	l1	0
3	θ_3	0	l2	0
4	θ_4	0	l3	0
5	θ_5	0	0	$\pi/2$

donde:

- θ_1 Ángulo de la base.
- θ_2 Ángulo del hombro.
- θ_3 Ángulo del codo.
- θ_4 Ángulo de la muñeca.
- θ_5 Ángulo de giro.
- d_1 Altura de la Base.
- l_1 Longitud del primer eslabón (brazo).
- l_2 Longitud del segundo eslabón (antebrazo).
- l_3 Longitud del gripper.

Reemplazando los valores de la *Tabla 2.6* en la *Ecuación 21* se obtienen las siguientes matrices de transformación:

Para el primer elemento (base):

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para el segundo elemento (hombro):

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & 0 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & l_1 C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & l_1 S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para el tercer elemento (codo):

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & 0 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & l_2 C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & l_2 S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para el cuarto elemento (muñeca):

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & 0 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & l_3 C\theta_4 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & l_3 S\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para el quinto elemento (giro):

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & -S\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ S\theta_5 & C\theta_5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.7.8.2. CINEMÁTICA INVERSA

El problema cinemático inverso se basa en encontrar los ángulos articulares del robot mediante el conocimiento de la posición y ubicación espacial de su elemento final.

A diferencia del método cinemático directo, en este método las ecuaciones dependen mayormente de la configuración del robot. (Barrientos 97).

2.7.8.2.1. RESOLUCIÓN POR MÉTODOS GEOMÉTRICOS

Este método se basa en la resolución de la cinemática usando cálculos geométricos simples que emplea relaciones geométricas y trigonométricas (resolución de triángulos) este método se puede apreciar de mejor manera en el texto de (Barrientos, 97). La *Figura 2.19* muestra las variables que intervienen en el modelo para simplificar el análisis.

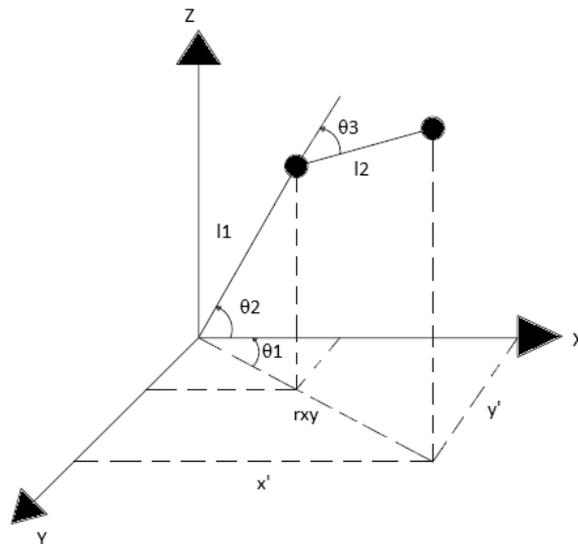


Figura 2.19. DCL de la cinemática inversa

Fuente: (López Apostolovich, 2009)

Al igual que en la cinemática directa el cálculo se simplifica al analizar solamente el movimiento en un plano en vez de analizarlo en el espacio.(López Apostolovich, 2009).

Para encontrar los ángulos θ , se lo realiza mediante geometría basada en las *Figuras 2.19* y *2.20*.

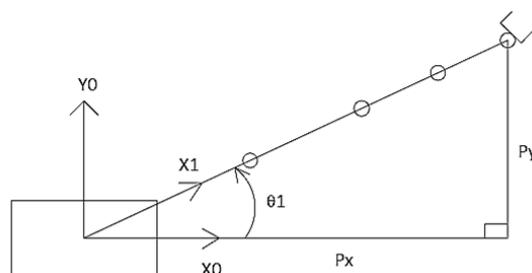


Figura 2.20. Diagrama superior solución codo arriba.

Fuente:(Martínez, Mejía, Jáquez, & Sandoval, 2008)

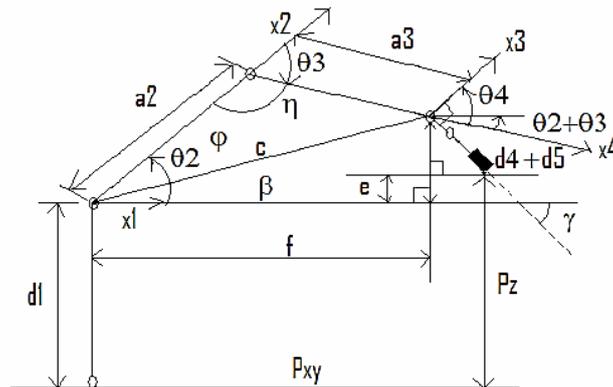


Figura 2.21. Diagrama lateral solución codo arriba.

Fuente:(Martínez et al., 2008)

Las variables que se encuentran en las Figuras 2.20 y 2.21 son encontradas por geometría y para ello se utilizan las ecuaciones que se describen a continuación:

Ecuación 24. Análisis geométrico, Pitágoras.

$$P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

Ecuación 25. Análisis geométrico, Ángulo θ_1

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{P_y}{P_x} \right]$$

Ecuación 26. Análisis geométrico, Distancia F.

$$f = P_{xy} - (d_4 + d_5) \cos(\gamma)$$

Ecuación 27. Análisis geométrico, Distancia e

$$e = P_z - (d_4 + d_5) \sin(\gamma) - d_1$$

Ecuación 28. Análisis geométrico, Ángulo β

$$\beta = \text{atan2} \left(\frac{e}{f} \right)$$

Ecuación 29. Análisis geométrico, Hipotenusa c

$$c = \sqrt{e^2 + f^2}$$

Ecuación 30. Análisis geométrico, Ángulo φ

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 - a_2^2 - c^2}{-2a_2c} \right)$$

Ecuación 31. Análisis geométrico, Ángulo η

$$\eta = \cos^{-1}\left(\frac{c^2 - a_3^2 - a_2^2}{-2a_2a_3}\right)$$

Ecuación 32. Análisis geométrico, Ángulo θ_2

$$\theta_2 = \beta + \varphi$$

Ecuación 33. Análisis geométrico, Ángulo θ_3

$$\theta_3 = \eta - \pi$$

Fuente: (Martínez et al., 2008)

2.7.9. MODELO DINÁMICO

Un robot manipulador es básicamente un dispositivo posicionado. Para controlar la posición se deben conocer las propiedades dinámicas del manipulador en orden para determinar las fuerzas ejercidas sobre él, que son las causantes de su movimiento. (Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

Al igual que en la cinemática, dentro de la dinámica también existen las dinámicas directa e inversa y su relación se puede apreciar en la *Figura 2.22*.

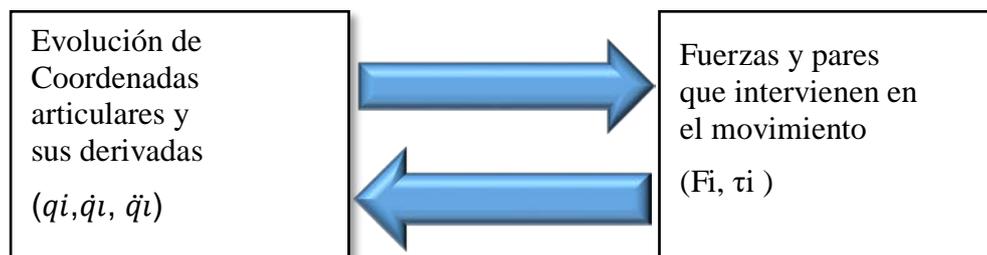


Figura 2.22. Relación entre dinámica directa e inversa

Se tiene así que del planteamiento del equilibrio de fuerzas y pares que intervienen sobre el robot se obtienen los denominados modelos dinámicos directo e inverso:

- Modelo dinámico directo: Expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen.

- Modelo dinámico inverso: Expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas.

Para la obtención del modelo se usa la formulación Lagrangiana, basada en consideraciones energéticas. La *Figura 2.23* muestra las condiciones dinámicas del manipulador.

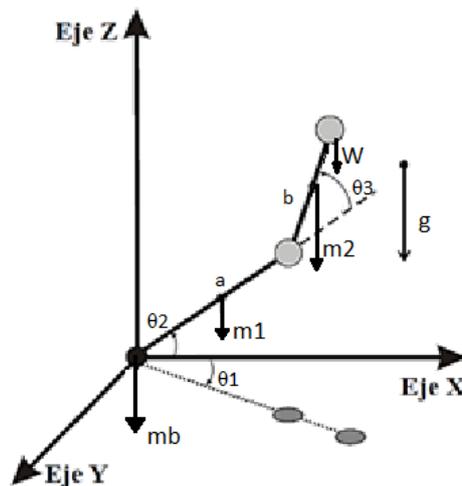


Figura 2.23. DCL de la dinámica inversa.

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

En la *Figura 2.24* se muestra las mismas condiciones de la *Figura 2.23* pero en un plano de dos dimensiones; donde cada variable está definida de la siguiente manera:

W = Carga aplicada

m_i = Masa del i -ésimo eslabón

g = Constante de gravedad

l = Radio de giro para la masa de la base

a = Longitud del primer eslabón

b = Longitud del segundo eslabón

I_i = Inercia i -ésima del eslabón

V_i = Velocidad lineal del i -ésimo eslabón

K_i = Energía cinética del i -ésimo eslabón

P_i = Energía potencial del i -ésimo eslabón. (Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

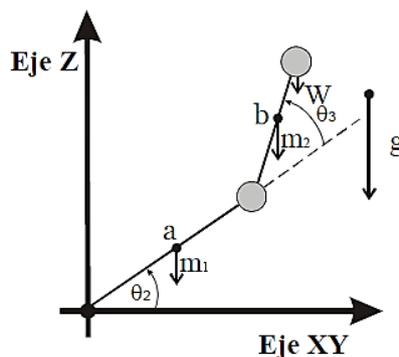


Figura 2.24. Proyección en un plano de la dinámica inversa.

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

Las ecuaciones que se utilizan para el desarrollo de las variables que se muestran en las *Figuras* 2.23 y 2.24 se detallan a continuación:

En la base:

Ecuación 34. Energía cinética en la base del robot.

$$k_b = \frac{1}{2} m_b l^2 \dot{\theta}_1^2$$

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

Ecuación 35. Energía potencial en la base.

$$P_b = 0$$

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

La energía potencial de la base es cero debido a que los cambios que se realicen en su ángulo de giro no afectan en la altura de la misma.

En la articulación del hombro:

Ecuación 36. Energía cinética en el hombro.

$$k_1 = \frac{1}{8} m_1 a^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{16} m_1 a^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{16} m_1 a^2 \cos 2\theta_2 \dot{\theta}_1^2$$

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

Ecuación 37. Energía potencial en el hombro.

$$P_1 = m_1 g \frac{a}{2} \operatorname{sen} \theta_2$$

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

En la articulación de codo:

Ecuación 38. Energía cinética en el codo.

$$\begin{aligned} k_2 = & \frac{1}{2} m_2 a^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 a b (\dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \cos \theta_3 + \frac{1}{8} m_2 b^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + \frac{1}{4} m_2 a^2 \dot{\theta}_1^2 \\ & + \frac{1}{4} m_2 a^2 \cos 2\theta_2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 a \cdot b \cdot \cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{16} m_2 b^2 \dot{\theta}_1^2 \\ & + \frac{1}{16} m_2 b^2 \cos 2(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 \end{aligned}$$

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

Ecuación 39. Energía potencial en el codo.

$$P_2 = m_2 g \cdot a \cdot \operatorname{sen} \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 g \cdot b \cdot \operatorname{sen}(\theta_2 + \theta_3)$$

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

En la articulación de muñeca:

Ecuación 40. Energía cinética en la muñeca.

$$\begin{aligned} k_c = & \frac{1}{2} W a^2 \dot{\theta}_2^2 + W a b (\dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \cos \theta_3 + \frac{1}{2} W b^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + \frac{1}{4} W a^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{4} W a^2 \cos 2\theta_2 \dot{\theta}_1^2 \\ & + W a b \cdot \cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{4} W b^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{4} W b^2 \cos 2(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 \end{aligned}$$

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

Ecuación 41. Energía potencial en la muñeca.

$$P_c = W g \cdot a \cdot \operatorname{sen} \theta_2 + W g \cdot b \cdot \operatorname{sen}(\theta_2 + \theta_3)$$

Fuente:(Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

La resolución de las ecuaciones descritas anteriormente se encuentran en el texto de (Abdalá Castillo & Ñeco Caberta, 2003)

2.7.9.1. ECUACIÓN DE LAGRANGE.

El Lagrangiano $L(q, \dot{q})$ de un robot manipulador de n grados de libertad es la diferencia entre su energía cinética K y su energía potencial U .

Ecuación 42. Lagrangiano.

$$L(q(t), \dot{q}(t)) = K(q(t)) - P(T)$$

Fuente:(Kelly & Santibáñez, 2003)

Las ecuaciones de Lagrange para un robot manipulador de n grados de libertad son:

Ecuación 43. Ecuación de Lagrange.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau_i \quad i = 1, \dots, n$$

Fuente:(Kelly & Santibáñez, 2003)

donde:

τ_i Son las fuerzas y pares ejercidos externamente en cada articulación.

En el modelo dinámico de Lagrange comprende cuatro etapas:

1. Cálculo de la energía cinética: $K(q(t), \dot{q}(t))$
2. Cálculo de la energía potencial: $P(q(t))$
3. Calculo del Lagrangiano: $L(q(t), \dot{q}(t))$
4. Desarrollo de las ecuaciones. (Kelly & Santibáñez, 2003)

Las ecuaciones de Lagrange se obtienen a partir de la sumatoria de las energías cinéticas y potenciales, por lo que el Lagrangiano resultante sería:

Ecuación 44. Sumatoria de energías.

$$L = K_b + K_1 + K_2 + K_c - P_b - P_1 - P_2 - P_c$$

Fuente:(Kelly & Santibáñez, 2003)

2.7.10. DETERMINACIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT UTILIZANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®.

El Robotics Toolbox de MATLAB®, fue desarrollado por el PhD. Peter Corke en 1995, provee muchas funciones que son útiles para el estudio y simulación de los robots manipuladores, entre las cuales encontramos las funciones de estudio de la cinemática y dinámica del robot, así como también la generación de trayectorias.

Para esta herramienta, los parámetros están realizados para funcionar dentro del entorno de MATLAB®, lo que permite al usuario realizar cualquier objeto robótico que posea una cadena de eslabones unidos por articulaciones. (Vaca, 2002)

Las características de este toolbox, las funciones y su guía de usuario pueden ser encontrados en la página web de su autor. (Corke, 2017)

2.7.10.1. CINEMÁTICA DIRECTA USANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®.

Para poder realizar el estudio de la cinemática directa en Matlab, el primer paso es la creación del robot en el entorno del programa, para lo cual es necesario obtener los parámetros de la matriz Denavit-Hartenberg, los cuales se resumirán en la *Tabla 2.7*, tomando en cuenta los parámetros descritos en la *Tabla 2.6*.

Tabla 2.7.

Parámetros D-H a utilizarse en Robotics Toolbox de MATLAB®

Articulación	θ	d[m]	a[m]	α [°]	Sigma	Offset
1	θ_1	0.26	0	$\pi/2$	0	0
2	θ_2	0	0.4	0	0	0
3	θ_3	0	0.3	0	0	0
4	θ_4	0	0	$-\pi/2$	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$

Con los parámetros D-H se procede a establecer los LINKS para cada uno de los eslabones de la siguiente manera: **link($\theta, d, a, \alpha, \text{Sigma}, \text{Offset}$)**, de donde se sobreentiende que las variables desconocidas son los ángulos θ .

A continuación se procede a la creación de los eslabones con sus respectivos parámetros, ingresando los siguientes códigos en MATLAB®.

```
%L=Link([q d l a sigma offset])
L1=Link([0 0.26 0 pi/2 0 0]);
L2=Link([0 0 0.4 0 0 0]);
L3=Link([0 0 0.3 0 0 0]);
L4=Link([0 0 0 -pi/2 0 pi/2]);
L5=([0 0 0 pi/2 0 pi]);
```

Luego de haber definido los parámetros se procede a compilar todos los links mediante el uso del comando SerialLink, así:

```
R=SerialLink([L1,L2,L3,L4,L5])
```

Obteniendo como respuesta en MATLAB® lo siguiente:

```
R =
Robot-UTN (5 axis, RRRRR, stdDH, slowRNE)

+---+-----+-----+-----+-----+
| j |   theta |     d |     a |   alpha |
+---+-----+-----+-----+-----+
| 1 |     q1 |  0.26 |     0 |   1.571 |
| 2 |     q2 |     0 |   0.4 |     0 |
| 3 |     q3 |     0 |   0.3 |     0 |
| 4 |     q4 |     0 |     0 |  -1.571 |
| 5 |     q5 |     0 |     0 |   1.571 |
+---+-----+-----+-----+-----+

grav =    0   base = 1  0  0  0   tool = 1  0  0  0
          0         0  1  0  0         0  1  0  0
          9.81      0  0  1  0         0  0  1  0
                   0  0  0  1         0  0  0  1
```

Figura 2.25. Parámetros del robot en MATLAB®.

Y por último se grafica el robot, de acuerdo a los parámetros ingresados tal como se aprecia en la *Figura 2.26*.

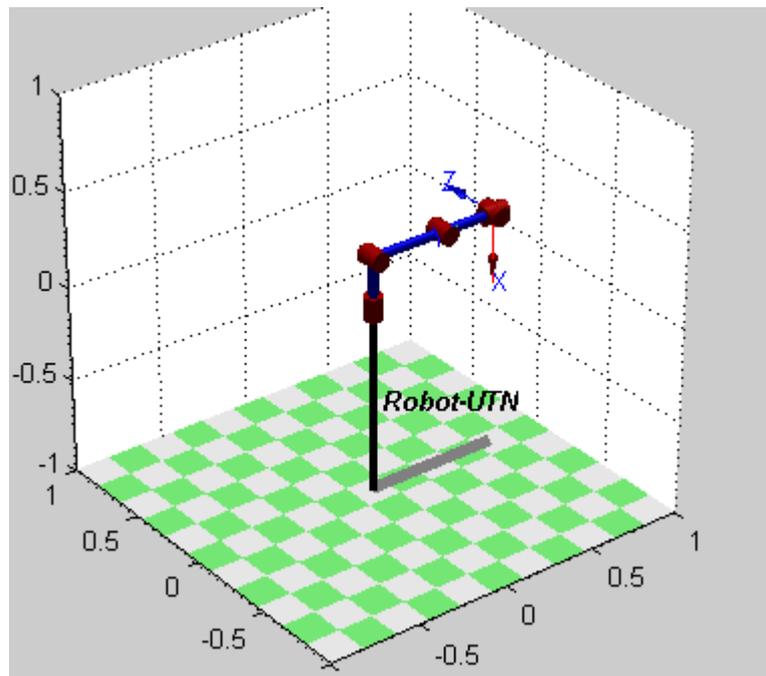


Figura 2.26. Representación gráfica del Robot UTN

Se establecen algunas posiciones que permitirán encontrar la posición del elemento final, mediante el análisis de la cinemática directa e inversa, en MATLAB® se ingresan a continuación los comandos que establecen las posiciones para el análisis:

```
%posición deseada
p0=[0 0 0 0 0];
p1=[0 0 -pi/2 0 0];
p2=[0 pi/2 -pi/4 0 0];
p3=[pi/2 0 pi/2 0 0];
p4=[0 0 0 0 pi];
```

En donde p_0 es la posición inicial del robot y por lo tanto todos sus valores son iguales a cero.

El análisis cinemático directo se lo ejecuta mediante la utilización del comando *fkine*, tal como se aprecia a continuación.

```
% análisis de la cinemática directa
Cd0=R.fkine(p0)
Cd1=R.fkine(p1)
Cd2=R.fkine(p2)
Cd3=R.fkine(p3)
Cd4=R.fkine(p4)
```

En la *Figura 2.27* se puede apreciar el resultado del análisis cinemático directo para el punto p0.

```
Cd0 =
-0.0000  -1.0000  -0.0000  0.7000  → Px
 0.0000  -0.0000  1.0000  0        → Py
-1.0000  0.0000  0.0000  0.2600  → Pz
 0        0        0        1.0000
```

Figura 2.27. Posición del elemento final en el punto p0.

2.7.10.2. CINEMÁTICA INVERSA USANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®.

La cinemática inversa, permite determinar los movimientos necesarios que debe realizar el robot para lograr que el gripper se ubique en una posición definida.

El análisis de la cinemática inversa se lo realiza con la ayuda del comando ikene, para lo cual se debe ingresar en MATLAB® los siguientes comandos.

```
M=[ 1 1 1 1 0]
Q1=R.ikine(NOAP0,p0,M)
Q2=R.ikine(NOAP1,p1,M)
Q3=R.ikine(NOAP2,p2,M)
Q4=R.ikine(NOAP3,p3,M)
Q5=R.ikine(NOAP4,p4,M)
```

donde:

NOAP Es la matriz que contiene la posición en la que se encuentra el gripper.

M Define los grados de libertad del robot, se escribe un 1 por cada grado.

Al ejecutar el programa para la posición $p1$ podemos apreciar que únicamente acciona la articulación del codo $-\pi/2$ para llegar a la posición deseada, obteniendo como resultado lo siguiente:

Q2 =

0	0	-1.5708	0	0
Base	Hombre	Codo	Muñeca	Giro

2.7.11. DETERMINACIÓN DEL MODELO DINÁMICO DEL ROBOT UTILIZANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®.

El análisis dinámico permite obtener los valores de torsión necesaria para cada articulación y generar dentro del espacio de simulación el comportamiento del robot en condiciones de operación.

2.7.11.1. GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS.

El Robotics Toolbox de MATLAB®, permite simular los movimientos espaciales del robot a través de trayectorias establecidas entre dos puntos, mediante el comando `jtraj`. Para poder aplicar dicho comando es necesario establecer un punto inicial y otro final en función de los ángulos en los que se encuentran las articulaciones del robot.

Para la generación de trayectorias se trabaja sobre el modelo del robot ya creado y se usan las posiciones ingresadas anteriormente para el análisis, además es necesario establecer un vector tiempo para especificar el número de puntos dentro de la trayectoria.

Finalmente se ingresan en MATLAB® las trayectorias que sigue el robot, para lo cual se establecen las siguientes:

```
% Trayectorias
[q,qd,qdd]=jtraj(p0,p1,t);
[q1,qd1,qdd1]=jtraj(p1,p2,t);
[q2,qd2,qdd2]=jtraj(p2,p3,t);
```

```
[q3,qd3,qdd3]=jtraj(p3,p4,t);
```

```
[q4,qd4,qdd4]=jtraj(p4,p0,t);
```

En la *Figura 2.28* se puede observar la simulación del robot siguiendo las trayectorias antes definidas.

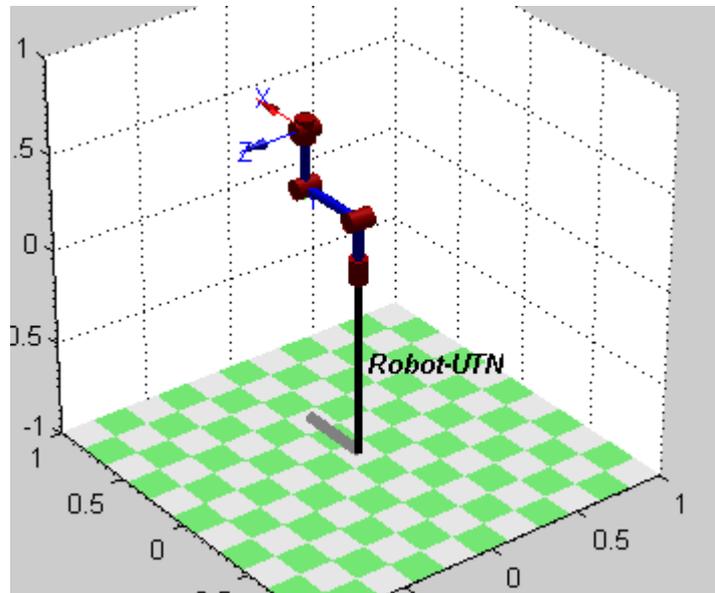


Figura 2.28. Robot en movimiento a través de trayectorias establecidas.

2.7.11.2. DINÁMICA INVERSA USANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®

En función de las trayectorias generadas es posible realizar el análisis que permite determinar el torque necesario para generar el movimiento de cada articulación, mediante el uso de la función **rne**.

La aplicación de la dinámica inversa mediante el uso de la función **rne**, se lo realiza mediante el uso de los parámetros q , qd , qdd , en donde:

q representa la posición de la articulación.

qd representa la velocidad.

qdd representa la aceleración.

La función antes mencionada se la ingresa en MATLAB®, realizando el análisis de las 5 trayectorias generadas en la sección 2.7.11.1, de la siguiente manera:

```
% Analisis de la dinámica inversa
```

```
Tau=R.rne(q,qd,qdd);
```

```
Tau1=R.rne(q1,qd1,qdd1);
```

```
Tau2=R.rne(q2,qd2,qdd2);
```

```
Tau3=R.rne(q3,qd3,qdd3);
```

```
Tau4=R.rne(q4,qd4,qdd4);
```

La *Figura 2.29* muestra los torques requeridos en cada articulación del antebrazo robot, de acuerdo a las trayectorias ejecutadas, en base a su ángulo de trabajo.

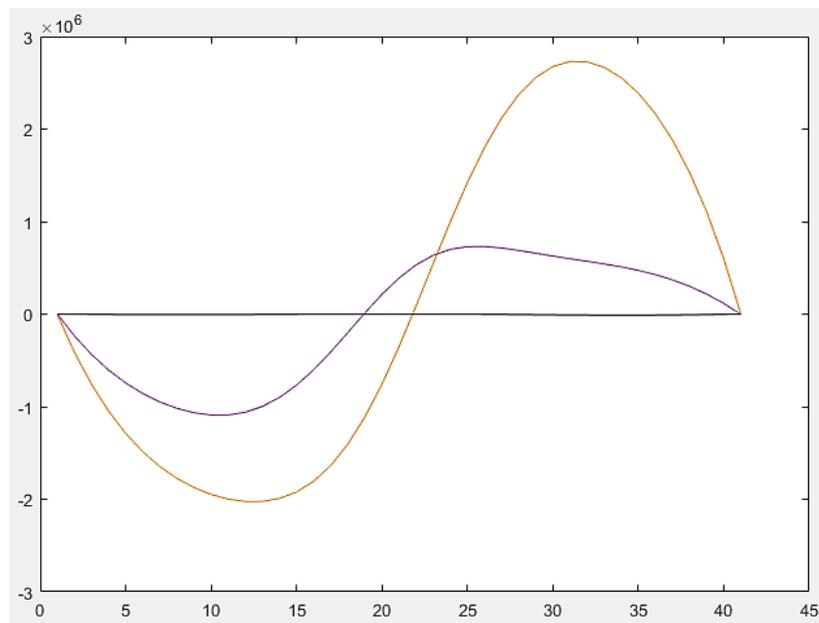


Figura 2.29. Curvas de torques en las articulaciones del antebrazo robot.

En la *Figura 2.29* se muestran 3 curvas que representan los torques necesarios para que las articulaciones del antebrazo robot lleguen a la posición deseada, la misma que se muestra en la *Figura 2.34*, se puede observar la línea de color rojo la cual corresponde al torque en la articulación de codo, la línea de color azul representa a la articulación de muñeca y por último la línea de color negro que representa el torque necesario para realizar el giro del gripper.

2.7.12. COMPROBACIÓN DEL ANÁLISIS DINÁMICO DEL BRAZO ROBOT MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE DE MATLAB®.

El programa MATLAB® ofrece la posibilidad de realizar un estudio dinámico de manera más precisa, ya que mediante el uso de esta herramienta se logra importar los datos obtenidos de las trayectorias generadas y observar los resultados esperados de forma independiente para cada una de las articulaciones del brazo robot.

La mayor ventaja de utilizar este método es que a diferencia del procedimiento que se sigue en el estudio cinemático, no es necesario definir los parámetros exactos del robot ya que se importan directamente desde el modelo CAD que se realiza del robot, en este caso con la ayuda de SolidWorks.

Una vez realizada la exportación del modelo CAD hacia el entorno de MATLAB® se obtiene varios bloques de programación que representan los eslabones y articulaciones del brazo robot tal como se aprecia en la *Figura 2.30*.

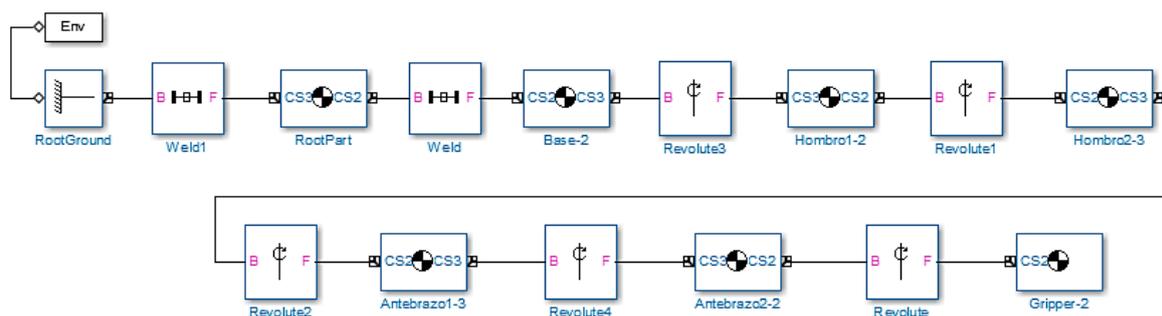


Figura 2.30. Diagrama de bloques del modelo CAD del brazo robot.

Para poder hacer uso de los bloques de programación de la *Figura 2.30*. Se colocan tres bloques de programación adicionales que sirven para comunicar los datos entre los diferentes toolbox de Matlab®, en donde, se importan los datos de la posición, velocidad y aceleración. Además es necesario hacer uso de la librería del simMechanics para establecer un sensor en cada articulación, el cual permite obtener el torque necesario que se requiere por parte de los

actuadores del robot, para así generar el movimiento en cada articulación tal como se aprecia en la *Figura 2.31*.

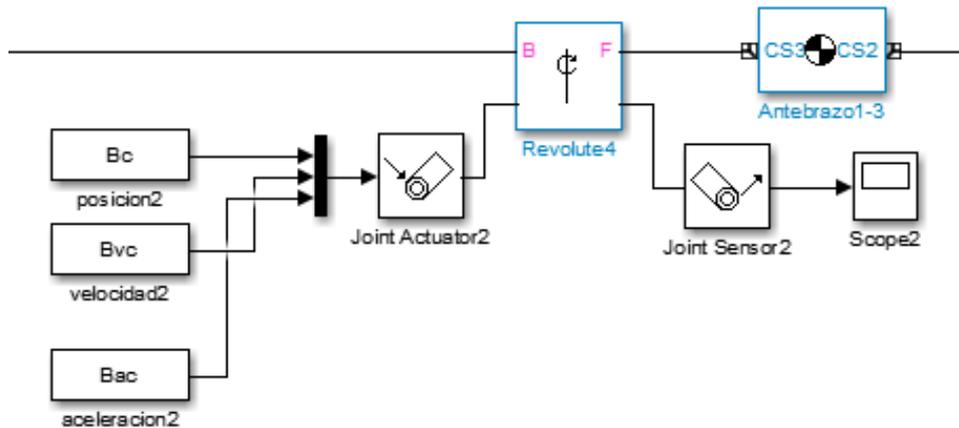


Figura 2.31. Bloques de programación adicionales.

Como se aprecia en la figura anterior se incorporan para cada articulación 3 bloques de programación extras, más un actuador y un sensor, con los cuales se logra la interpretación y análisis del torque necesario para ejecutar el movimiento en cada articulación, con la ventaja de que dicho análisis se realiza para cada punto a lo largo de la trayectoria que siga el robot durante su desplazamiento.

Una vez realizado el estudio de la dinámica se encuentran los torques necesarios para ejecutar el movimiento en cada articulación del antebrazo robot tal como se aprecia en la *Figura 2.39*.

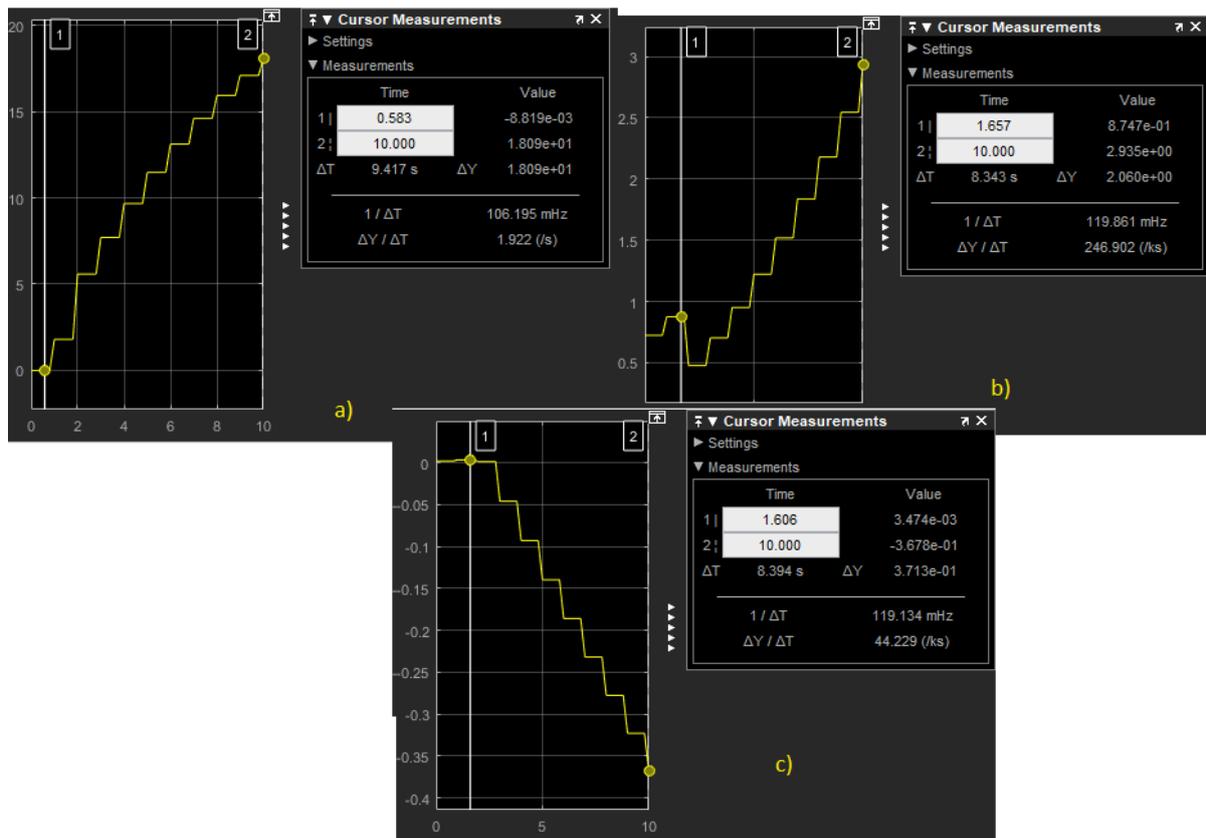


Figura 2.32. a) Torque en la articulación de codo. b) Torque en la a. de muñeca. c) Torque en la a. para el giro de gripper.

Como se aprecia en la *Figura 2.32*, se pueden observar el torque necesario para realizar el movimiento de cada articulación a lo largo de la trayectoria que efectúa el robot hasta llegar a la posición que se muestra en la *Figura 2.33*, se usan los datos angulares que se detallan a continuación:

-Base: 90°

-Muñeca en levantamiento: 45°

-Hombro: 45°

-Muñeca en giro: 180°

-Codo: 45°

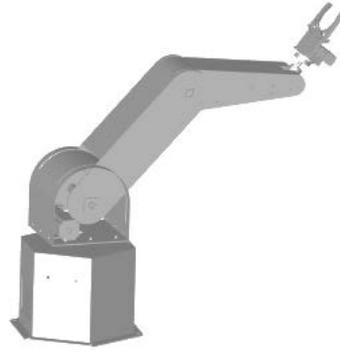


Figura 2.33. Posición alcanzada por el brazo UTN.

Luego de realizar varios análisis, se coloca al brazo robot en la posición en donde este realice más esfuerzo como se ve en la *Figura 2.33*, se obtiene que:

- Articulación de codo: Torque máximo de 19 N.m
- Articulación de muñeca: Torque máximo de 6.5 N.m
- Articulación para giro del gripper: Torque máximo de 1 N.m

De esta manera queda comprobado que los torques obtenidos son semejantes a los valores calculados en la *sección 2.8.2* de este capítulo, con lo cual queda validado el diseño del antebrazo robot.

2.7.13. DISEÑO DE CONTROL

En este proyecto se considera el diseño de control de un motor que actúa de forma independiente para cada articulación del antebrazo robot, siendo estas las articulaciones de codo, muñeca.

Posterior a la investigación desarrollada se establece que los motores que efectúen el movimiento para cada articulación sean:

- ❖ Motores paso a paso para la articulación de muñeca, debido a la gran precisión y fácil control que estos actuadores ameritan. Este tipo de motores no necesitan retroalimentación por lo cual su sistema de control es en lazo abierto.

- ❖ Motor DC para la articulación de codo, el cual es controlado mediante un sistema de lazo cerrado, es necesario la implementación de un sensor que permita obtener la posición de este.

2.7.13.1. CONTROL DE UN MOTOR PASO A PASO

El motor paso a paso es un actuador en el cual sus devanados se energizan uno a continuación del otro, reproduce un posicionamiento preciso y fiable. El desplazamiento angular al pasar de una bobina a otra es de $2/n$, lo que representa una conversión de señales digitales a una posición angular definida sobre el eje del motor.

Existen tres formas de controlar un motor a pasos, la primera como se observa en la *Tabla 2.8* consiste en realizar una secuencia que activa una bobina por pulso, denominado como paso sencillo.

Tabla 2.8.
Secuencia de paso sencillo

# de paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D
Paso 1	1	0	0	0
Paso 2	0	1	0	0
Paso 3	0	0	1	0
Paso 4	0	0	0	1

Fuente:(Beristian López & Espinos Vázquez, 2010)

La segunda forma es activar las bobinas en pares como se aprecia en la *Tabla 2.9*, esto genera que el motor tenga mayor fuerza de giro y retención, esta secuencia se la conoce como paso normal.

Tabla 2.9.
Secuencia de paso normal.

# de paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D
Paso 1	1	1	0	0
Paso 2	0	1	1	0
Paso 3	0	0	1	1
Paso 4	1	0	0	1

Fuente:(Beristian López & Espinos Vázquez, 2010)

La tercera como se aprecia en la *Tabla 2.10* es una mezcla de las anteriores, y se la conoce como paso medio, en esta secuencia se obtiene mayor fuerza en el motor.(Beristian López & Espinos Vázquez, 2010)

Tabla 2.10.
Secuencia de paso medio.

# de paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D
Paso 1	1	0	0	0
Paso 2	1	1	0	0
Paso 3	0	1	0	0
Paso 4	0	1	1	0
Paso 5	0	0	1	0
Paso 6	0	0	1	1
Paso 7	0	0	0	1
Paso 8	1	0	0	1

Fuente:(Beristian López & Espinos Vázquez, 2010)

La gran ventaja de los motores a pasos es que su control se lo realiza en lazo abierto, es decir, sin una señal de retroalimentación, lo que facilita su manejo y evita el uso de sistemas complejos de control.

Debido a que los motores a pasos necesitan una energía de alimentación superior a la entregada por cualquier microcontrolador, se necesita ayuda de algún circuito externo, que proporcione la potencia necesaria para mover el motor, para lo cual se hace uso de un driver TB6560. Ver Anexo 6. Figura 2.34.

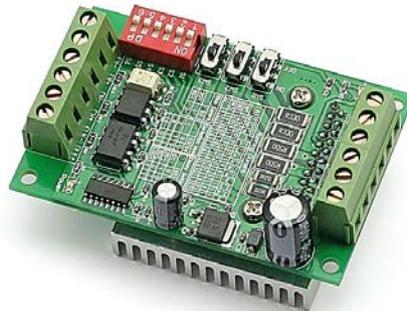


Figura 2.34. Driver TB6560

Fuente:(Toshiba, 2014)

El driver es el encargado de suministrar la corriente que requiera el motor para asegurar su correcto funcionamiento, se debe establecer dentro de los parámetros de la tarjeta controladora la corriente máxima a la cual opera el motor a pasos que se utiliza.

2.7.13.2. CONTROL DEL MOTOR DC.

El motor dc es un actuador de tipo eléctrico que puede ser utilizado para la generación de movimiento y locomoción.

Para poder controlar a un motor DC es necesario realizar un sistema de control en lazo cerrado, en donde es necesario obtener una señal de realimentación que indique la posición del motor, se emplea un encoder, además para poder controlar el sentido de giro del actuador se hace necesaria también la implementación de un puente H. Ver *Figura 2.35*.

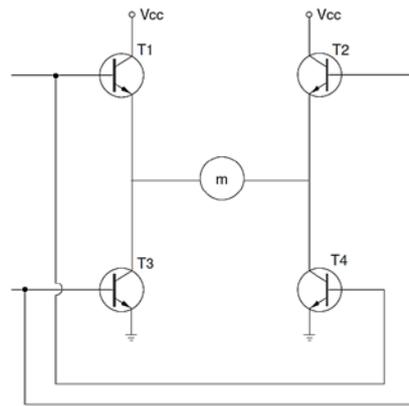


Figura 2.35. Puente H con transistores.

Fuente:(Lovine, 2002)

Para el control del motor DC se utiliza un sistema de lazo cerrado como se aprecia en la *Figura 2.36*.

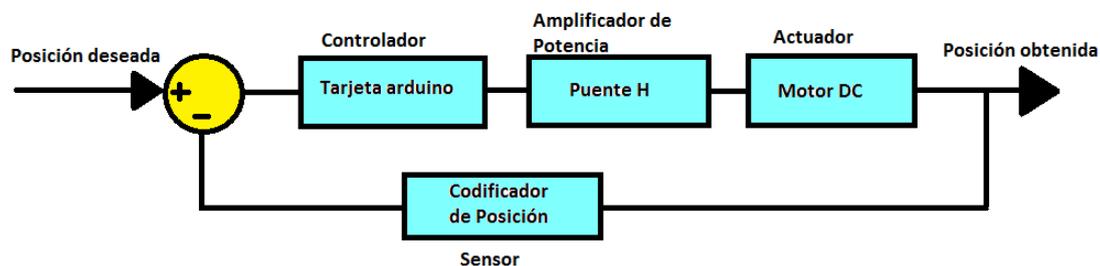


Figura 2.36. Sistema de control en lazo cerrado.

En este caso la posición de articulación de codo se establece mediante un detector de posición, el encoder NTE 3100 (Ver *Anexo 8*), cuya salida se compara con la posición ingresada desde el computador, es procesada por el controlador, y por lo tanto, el motor es controlado para colocar la articulación en la posición deseada.

La función de transferencia del sistema se la obtiene con la ayuda del toolbox de Matlab®, conocido como Ident, se realiza la toma de datos reales del sistema, y se obtienen los datos que se aprecian en la *Tabla 2.11*.

Tabla 2.11.
Valores de posición ingresados y resultantes.

Valor ingresado (en grados)	Valor obtenido (en grados)
5	6
10	12
20	18
30	30
40	42
50	48
60	60
70	72
80	78
90	90
100	102
110	108

Tomando los datos de la *Tabla 2.11* se realiza la *Figura 2.37* donde se puede observar las variaciones en cuanto a los valores de posición obtenidos, con respecto a la posición ingresada.

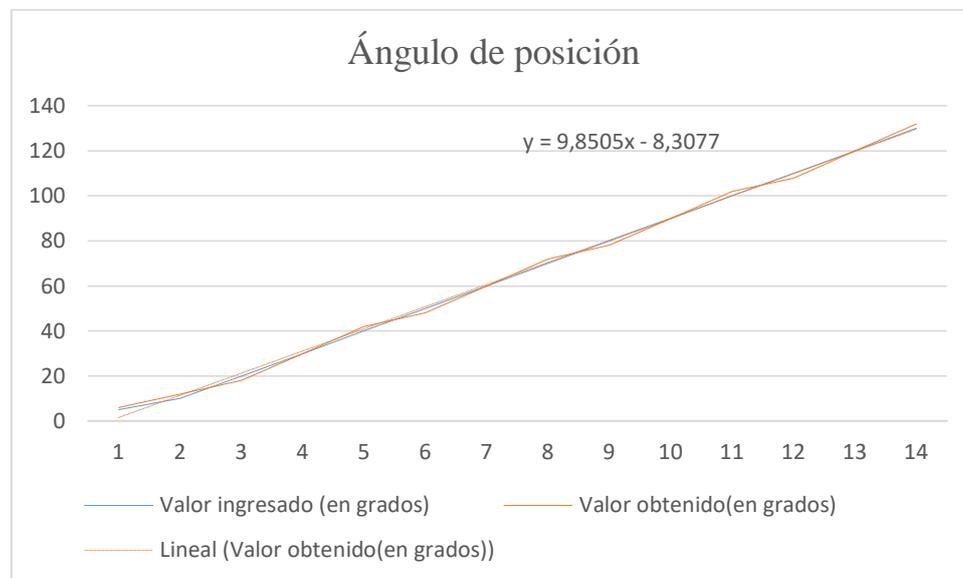


Figura 2.37. Curva de respuesta a la variación de posición.

Como se puede apreciar en la *Figura 2.37* se genera líneas de tendencia en el gráfico, con lo cual se encuentra la ecuación de la recta de los datos analizados, siendo esta:

Ecuación 45. Ecuación lineal.

$$y = 9.85x - 8.31$$

donde:

x Es el valor ingresado de posición en grados, dentro del sistema.

y Es la posición real en grados.

A la ecuación se aplica la transformada de Laplace, dando como resultado una ecuación que determina la función de transferencia de la articulación del robot.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{A} \left(\frac{9.85s - 8.31}{s} \right)$$

Se ingresan los valores de la *Tabla 2.11* en el toolbox de Matlab Ident y se procede a realizar la estimación del sistema dando como resultado la *Figura 2.38*.

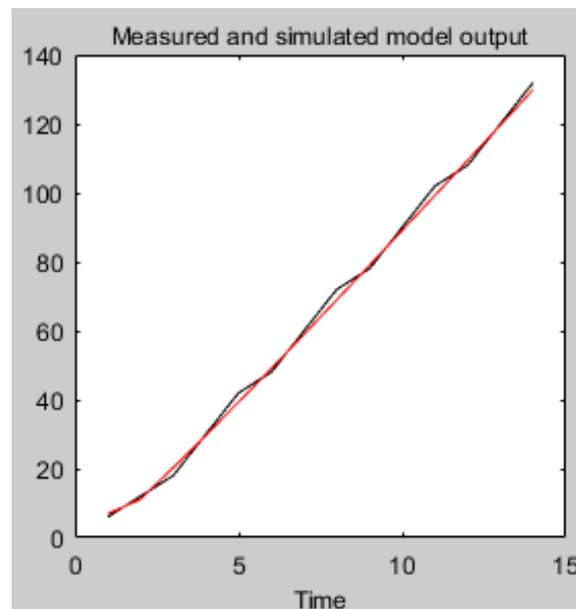


Figura 2.38. Estimación del sistema de control en Ident

Como se puede ver en la *Figura 2.38* la estimación generada por el software es idéntica a la curva obtenida en la *Figura 2.37*, por lo que se comprueba que la estimación es la correcta.

La función de transferencia generada en Matlab luego de procesar los datos es la siguiente:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{3.487 s + 1.029}{3.735 s + 1}$$

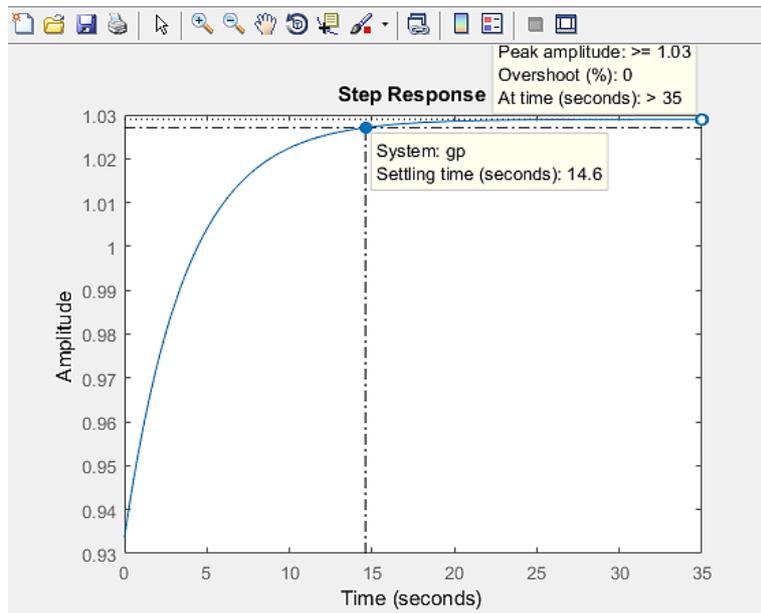


Figura 2.39. Gráfica de la función de transferencia.

La *Figura 2.39* muestra la gráfica de la función de transferencia del sistema, con una estimación del 95.09%, lo que asegura la viabilidad de la estimación realizada.

Con la ayuda de Matlab® se puede realizar el diagrama de bloques del sistema de control como se indica en la *Figura 2.40*.

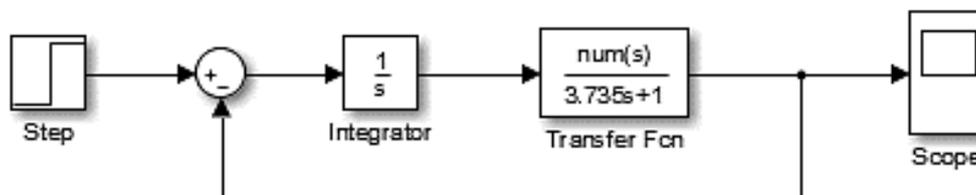


Figura 2.40. Diagrama de bloques.

La *Figura 2.41* muestra la señal de respuesta en base al diagrama de bloques de la *Figura 2.40* obtenida con la ayuda de Matlab.

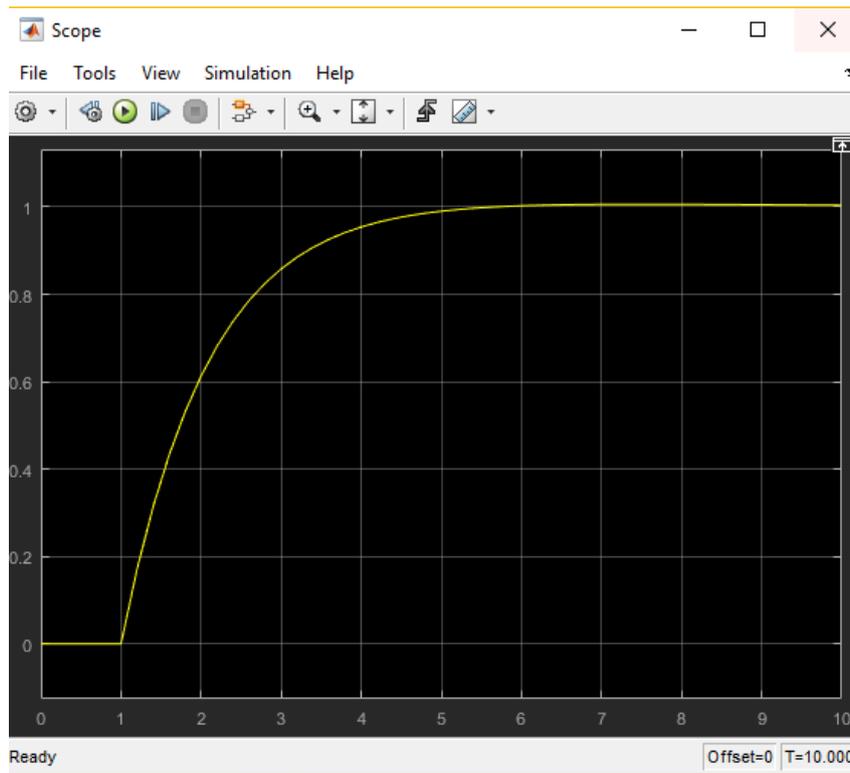


Figura 2.41. Respuesta de control en lazo abierto.

2.7.14. PROGRAMACIÓN.

La programación del antebrazo robot es realizada en el entorno de programación de LabVIEW, la misma crea un enlace entre el computador y el robot para permitir la generación de instrucciones que debe cumplir el proyecto, a través de una tarjeta arduino.

Para el control de cada articulación se ingresa el valor numérico del ángulo deseado en el computador, el programa analiza y procesa el dato ingresado en grados y entrega las instrucciones necesarias a través de la tarjeta arduino hacia los actuadores en valores de posición, generando movimiento de los mismos.

Con la ayuda de LabVIEW se realiza la interfaz gráfica de control para el brazo robot UTN como se aprecia en la *Figura 2.42* y representa al programa que se encarga de operar cada una de las articulaciones del brazo robótico, se realiza una conexión serial con arduino mediante los toolbox de LabVIEW y utilizando a la tarjeta arduino solamente como medio de comunicación entre los sistemas de control implementados y el computador.



Figura 2.42. Interfaz gráfica del programa de control del brazo robot UTN.

El programa que controla al brazo robot sigue la secuencia del siguiente flujoograma.



CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. DISEÑO MECÁNICO.

El diseño del antebrazo robot se lo realiza en base a las especificaciones planteadas en el proyecto de investigación. Mediante un análisis de elementos finitos en el diseño, se obtiene un factor de seguridad de 5, con lo que se garantiza la fiabilidad del diseño.

La articulación de codo se realiza mediante el uso de una transmisión de tornillo sinfín y corona, debido a que dicho sistema presenta la cualidad de auto bloqueo, que permite desenergizar al actuador sin que este pierda su posición actual.

Se emplea una transmisión de poleas y correa dentada para la articulación de muñeca, debido al espacio que dispone la misma articulación, además de que se proporciona una amplificación del par entregado por el actuador.

En la articulación necesaria para efectuar el giro para el gripper, se incorpora directamente el actuador ya que las características del mismo son suficientes y no necesita el empleo de un sistema de transmisión.

El diseño del antebrazo puede ser optimizado reduciendo el ancho del modelo, la reducción podrá hacerse de acuerdo al actuador que se use.

3.2. MATERIAL

El material empleado es el Aluminio ASTM A 1200, este cumple con todas las especificaciones requeridas en el diseño, no presenta una deformación significativa, soportando todas las cargas propuestas. Además presenta características importantes como lo es su excelente maquinabilidad y una buena relación peso-resistencia. Como desventaja el material tiene poca resistencia a rayones por lo cual es necesario que se lo someta a un tratamiento superficial como el pintado del mismo.

3.3. CINEMÁTICA

Mediante un análisis cinemático se logra obtener los valores angulares en cada articulación del robot para que este alcance la posición deseada por el usuario. Ver *Tabla 3.1*. Además se obtiene un porcentaje mínimo de error en la posición, esto se puede solucionar empleando sistemas de transmisión con mayor precisión.

Tabla 3.1.
Resultados cinemáticos

Articulación	Rango angular(°)	Error (%)
Codo	0° - 110°	5%
Muñeca en levantamiento	-90° - 90°	2%
Muñeca en giro	0° - 300°	2%

3.4. DINÁMICA

Con la ayuda del Robotics Toolbox de MATLAB® se realiza un análisis dinámico del brazo robot de donde mediante la generación de diferentes trayectorias y posiciones que sigue el robot se logra obtener y validar los torques necesarios para cada articulación del robot (Ver *Tabla 3.2*), además de que el análisis dinámico ayuda a validar los cálculos desarrollados en el diseño mecánico.

Tabla 3.2.
Resultados dinámicos.

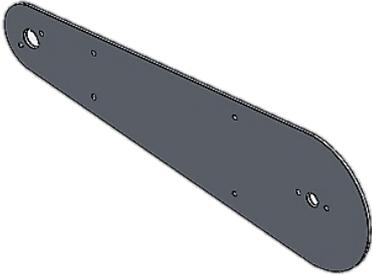
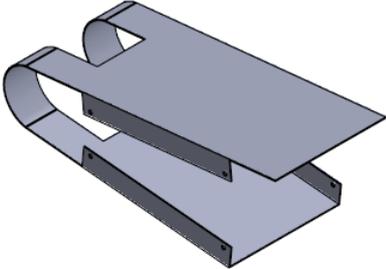
Articulación	Torque en Matlab (N.m)	Torque del diseño mecánico (N.m)	Error (%)
Codo	19	17,36	8,6
Muñeca en levantamiento	6,5	4,78	26,4
Muñeca en giro	1,32	1	24,2

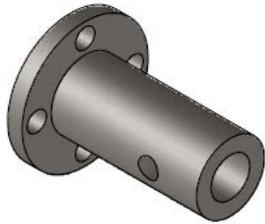
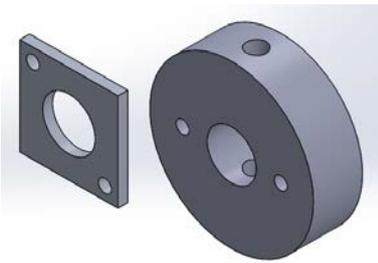
La *Tabla 3.2* presenta el porcentaje de error existente entre los torques calculados manualmente y los realizados por MATLAB®, encontrando un error de 8,6% en la articulación de codo, 26,2% en la articulación de muñeca en levantamiento de peso y de 24,2%

3.5. MANUFACTURA

Se realizan diferentes procesos de manufactura durante la fabricación de las piezas del antebrazo robot. La *Tabla 3.3* muestra los diferentes procesos de fabricación que se emplearon en las diferentes partes del antebrazo robot.

Tabla 3.3.
Procesos de fabricación para el antebrazo robot.

COMPONENTE	PROCESO DE FABRICACIÓN	IMAGEN
Estructura lateral.	<p>Trazado: Se realiza el trazado del diseño sobre la plancha de aluminio.</p> <p>Corte: Se realiza el corte de la plancha de aluminio de acuerdo a las dimensiones especificadas en el diseño.</p> <p>Taladrado: Se realizaron perforaciones de acuerdo al diseño.</p> <p>Pulido: Se pule los restos de material, hasta lograr el acabado deseado.</p>	
Tapas superior-inferior	<p>Trazado: Se traza el diseño desarrollado sobre una plancha de aluminio de 1mm de espesor.</p> <p>Corte: Se realizan los cortes de la plancha de acuerdo a las dimensiones requeridas en el diseño.</p> <p>Doblado: Se realiza el doblado de la pieza de acuerdo al diseño.</p>	

	Taladrado: Se realizan perforaciones de acuerdo al diseño.	
Acople	<p>Corte: Se realizan los cortes de la plancha de acuerdo a las dimensiones requeridas en el diseño.</p> <p>Taladrado: Se realizan perforaciones de acuerdo al diseño.</p> <p>Torneado: Se realiza el torneado del acople hasta obtener las medidas requeridas en el diseño.</p>	
Porta rodamientos y sujetadores.	<p>Corte: Se realizan los cortes de la plancha de acuerdo a las dimensiones requeridas en el diseño.</p> <p>Taladrado: Se realizan perforaciones de acuerdo al diseño.</p>	
Eje	Torneado: Se realiza el torneado del eje hasta obtener las medidas deseadas.	
Bases de sujeción para los motores.	<p>Trazado: Se realiza el trazado del diseño sobre la plancha de aluminio.</p> <p>Corte: Se realizan los cortes de la plancha de acuerdo a las dimensiones requeridas en el diseño.</p> <p>Doblado: Se realiza el doblado de la pieza de acuerdo al diseño</p> <p>Taladrado: Se realizan perforaciones de acuerdo al diseño.</p> <p>Soldadura: Se sueldan los componentes que así lo necesiten.</p>	

3.6. ENSAMBLAJE

El diseño del antebrazo robot se lo realiza de tal forma que el ensamble no sea complicado y sea fácil de realizar como se aprecia en la *Tabla 3.4*. El proceso de ensamblado se lo detalla en la *Tabla 3.5*.

Tabla 3.4.
Ensamblaje del antebrazo robot

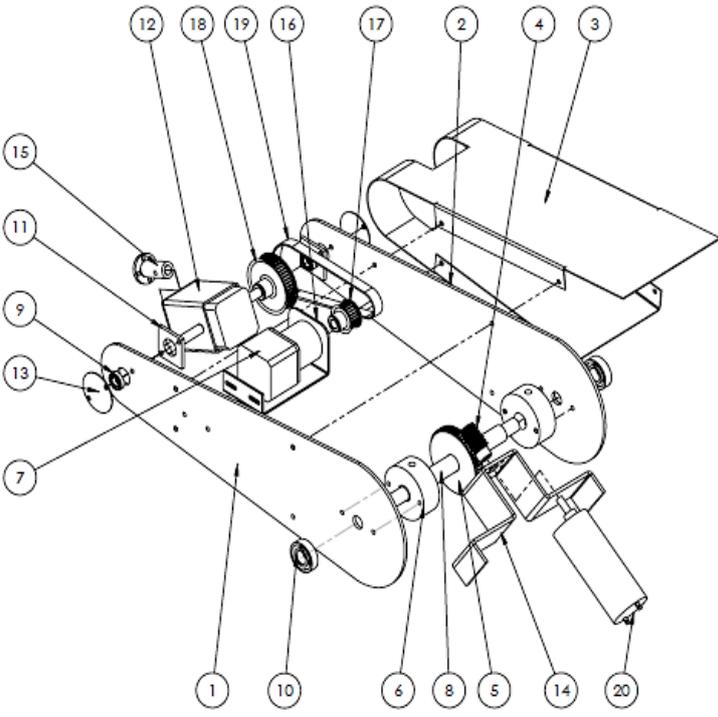
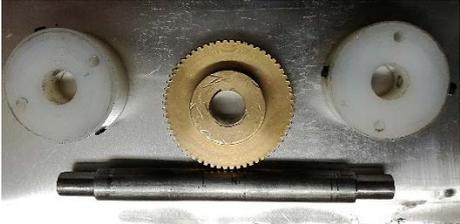
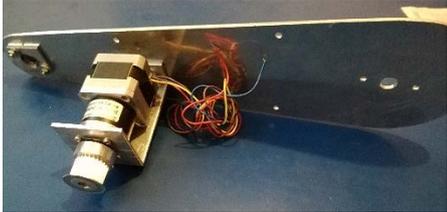
ENSAMBLE	N°	DESCRIPCIÓN
	1	Tapa Lateral Izquierda
	2	Tapa Lateral Derecha
	3	Tapa Superior Inferior
	4	Sinfín
	5	Engrane helicoidal
	6	Sujetador de Eje
	7	Motor
	8	Eje Codo
	9	Rodamientos muñeca
	10	Rodamientos codo
	11	Porta rodamiento
	12	Pasador
	13	Tapa de rodamiento
	14	Base para motor de codo
	15	Acople Mg
	16	Base para motor
	17	Polea dentada 1
	18	Polea dentada 2
	19	Banda dentada
	20	Motor DC

Tabla 3.5.
Proceso de ensamblaje

Paso	Proceso	Imagen
1	Ensamblar el eje del codo.	
2	Insertar los sujeta ejes y el engrane en el eje del codo.	
3	Colocar los porta rodamientos en las tapas laterales y colocar el motor de la muñeca en su base y polea correspondiente y asegurarlo a la tapa lateral izquierda.	
4	Colocar las poleas en el motor del giro con su base.	
5	Unir las tapas laterales con el eje del codo ensamblado en el paso 2 y el motor de la muñeca, colocando la banda dentada.	

6	Colocar la tapa superior-inferior	
7	Colocar el antebrazo en el brazo y asegurar el motor del codo, asegurándose que el sinfín quede en el centro del engrane.	
8	Realizar los acabados superficiales.	

3.7. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Los sistemas de control para cada articulación son de dos tipos, un puente *H*, para el control del actuador presente en la articulación de codo (motor DC) y drivers Tb6560 para controlar los actuadores en la articulación de muñeca (motores a pasos NEMA 17).

La *Figura 3.1* muestra el diagrama del sistema de control que gobierna los movimientos del antebrazo robótico y las *Figuras 3.2* y *3.3* muestran los controles implementados.

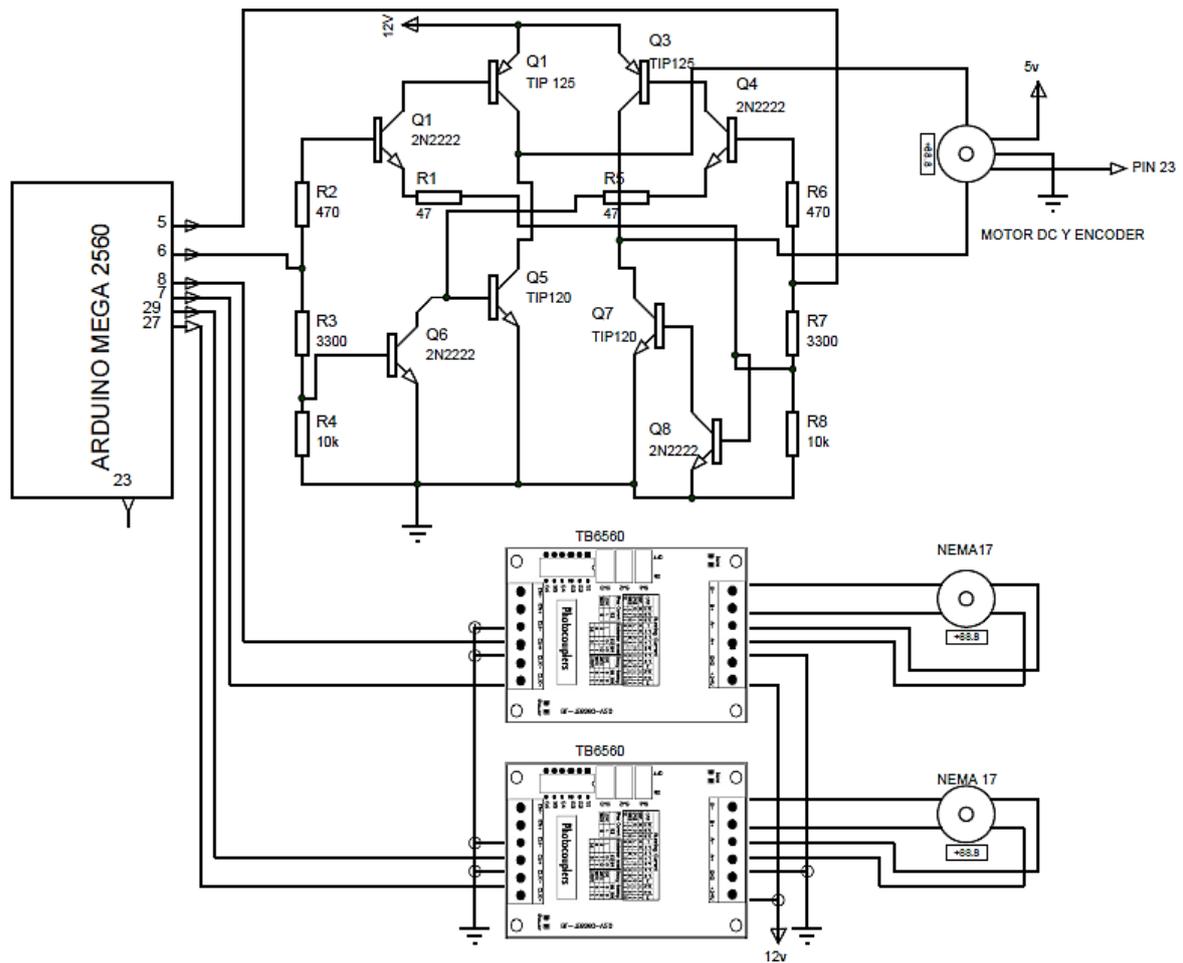


Figura 3.1. Circuito de control.

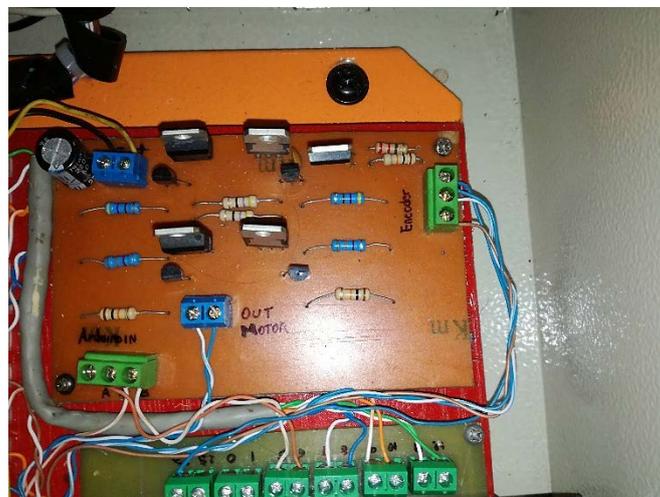


Figura 3.2. Puente H implementado



Figura 3.3. Control articulación de muñeca implementado.

El diagrama PCB realizado para la placa de control mostrado en la *Figura 3.2* se detallan en el *Anexo 12*.

3.8.AUTOMATIZACIÓN

La automatización del antebrazo robot se realiza de tal forma que interactúe con el resto de partes del robot, como lo son la base, el brazo y el gripper.

El sistema de control se elabora para que procese los datos obtenidos a través de un computador y los transmita por medio de tarjetas controladoras hacia los actuadores. Con el uso de una tarjeta arduino se logra implementar un control adecuado para los dos tipos de motores sin necesidad de emplear un controlador independiente. En el *Anexo 12* se muestra el diagrama realizado para el circuito de control del actuador del codo.

Se emplea una fuente de alimentación común para todo el sistema, de suficiente amperaje para evitar fallos en el arranque de los motores.

Siguiendo el diagrama de flujo de la *Figura 2.49* se realizan los cuadros de programación para el antebrazo robótico, la *Figura 3.4* muestra la programación realizada para el control de la articulación de codo y la *Figura 3.5* para la articulación de muñeca.

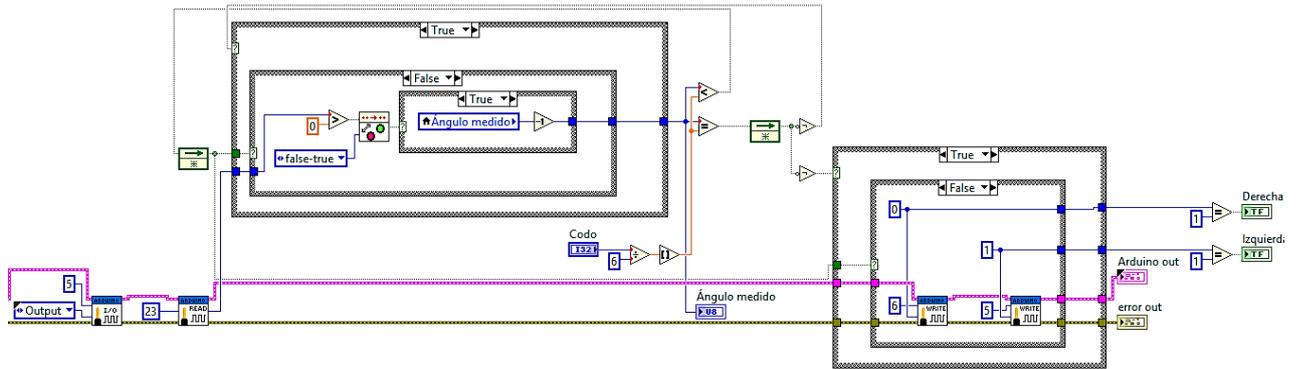


Figura 3.4. Programa para controlar la articulación de codo.

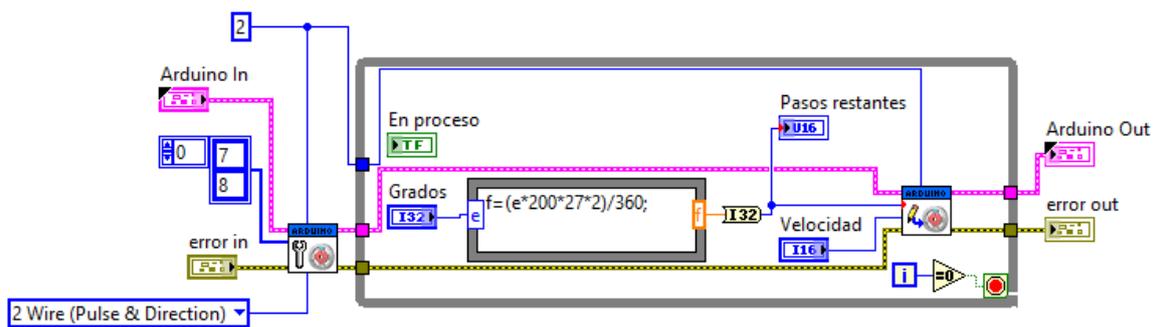


Figura 3.5. Programación para el control de la articulación de muñeca.

3.9. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.

Se realizan las pruebas de funcionamiento y se observa que existe un pequeño error en la posición adquirida, por lo cual se debe modificar las formulas establecidas en el programa de control.

Luego de ajustar el programa de control para las articulaciones del antebrazo robot se procede a tomar datos reales de funcionamiento, se genera las *Tablas 3.6, 3.7 y 3.8*, donde se pueden apreciar las posiciones angulares tanto del codo, como de la muñeca, trabajando con y sin carga.

3.9.1. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA ARTICULACIÓN DE CODO.

Tabla 3.6.

Prueba de funcionamiento en la articulación de codo.

Angulo ingresado (en grados)	Angulo obtenido (en grados)		Error (%)	
	Sin carga	Con carga (1Kg)	Sin carga	Con carga (1Kg)
5	8	9	60%	80%
7	8	9	14,3%	28,5%
12	15	14	25%	16,7%
20	21	20	5%	0%
30	32	32	6,7%	6,7%
50	46	50	8%	0%
70	72	74	2,86%	5,7%
80	79	80	1,25%	0%
90	91	91	1,1%	1,1%
100	103	102	3%	2%
110	110	108	0%	1,8%

Cuando el ángulo es entre 6° y 8° se tiene un error alto del 60% sin carga y 80% cuando tiene carga, esto se debe al tipo de transmisión de movimiento empleado, compuesta por un tornillo sinfín y corona y un motor DC, por lo que la resolución es baja, generando un error del 0% en 110° cuando trabaja sin carga y de 1,8% cuando trabaja con carga.

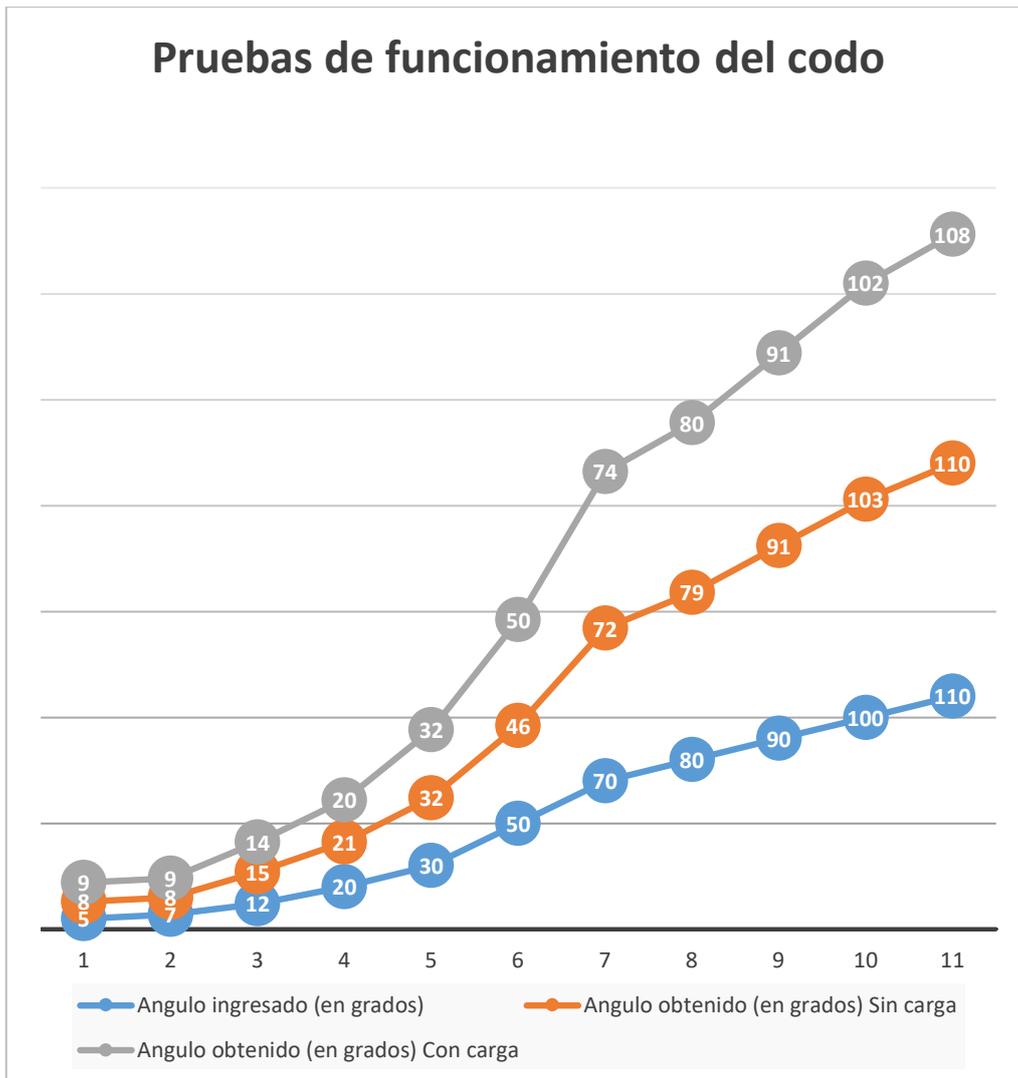


Figura 3.6. Mediciones de posicionamiento el codo.

La *Tabla 3.6* muestra las diferentes mediciones del posicionamiento de la articulación de codo a ciertos ángulos, con los datos se genera las gráficas de la *Figura 3.6*, en donde se aprecia de mejor manera el porcentaje de error de posicionamiento con y sin carga.

Según la tabla anterior se obtiene un error de posicionamiento de 3 grados cuando el codo trabaja sin carga, y de 4 grados cuando trabaja con carga.

3.9.2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA ARTICULACIÓN DE MUÑECA

- MUÑECA EN LEVANTAMIENTO.

Tabla 3.7.
Prueba de funcionamiento en la articulación de muñeca.

Angulo ingresado (en grados)	Angulo obtenido (en grados)		Error (%)	
	Sin carga	Con carga (1Kg)	Sin carga	Con carga (1Kg)
0	0	0	0%	0%
3	3	3	0%	0%
5	5	5	0%	0%
15	15	15	0%	0%
30	29	30	3,3%	0%
45	43	44	4,4%	2,22%
60	58	58	3,3%	3,33%
80	77	77	3,75%	3,75%
90	90	86	0%	4,44%

El error de posicionamiento que presenta la articulación de muñeca en levantamiento es un máximo de 4,4% cuando trabaja sin carga y de 4,4% cuando trabaja con carga, por lo que presenta errores iguales con y sin carga pero en diferentes ángulos de trabajo.

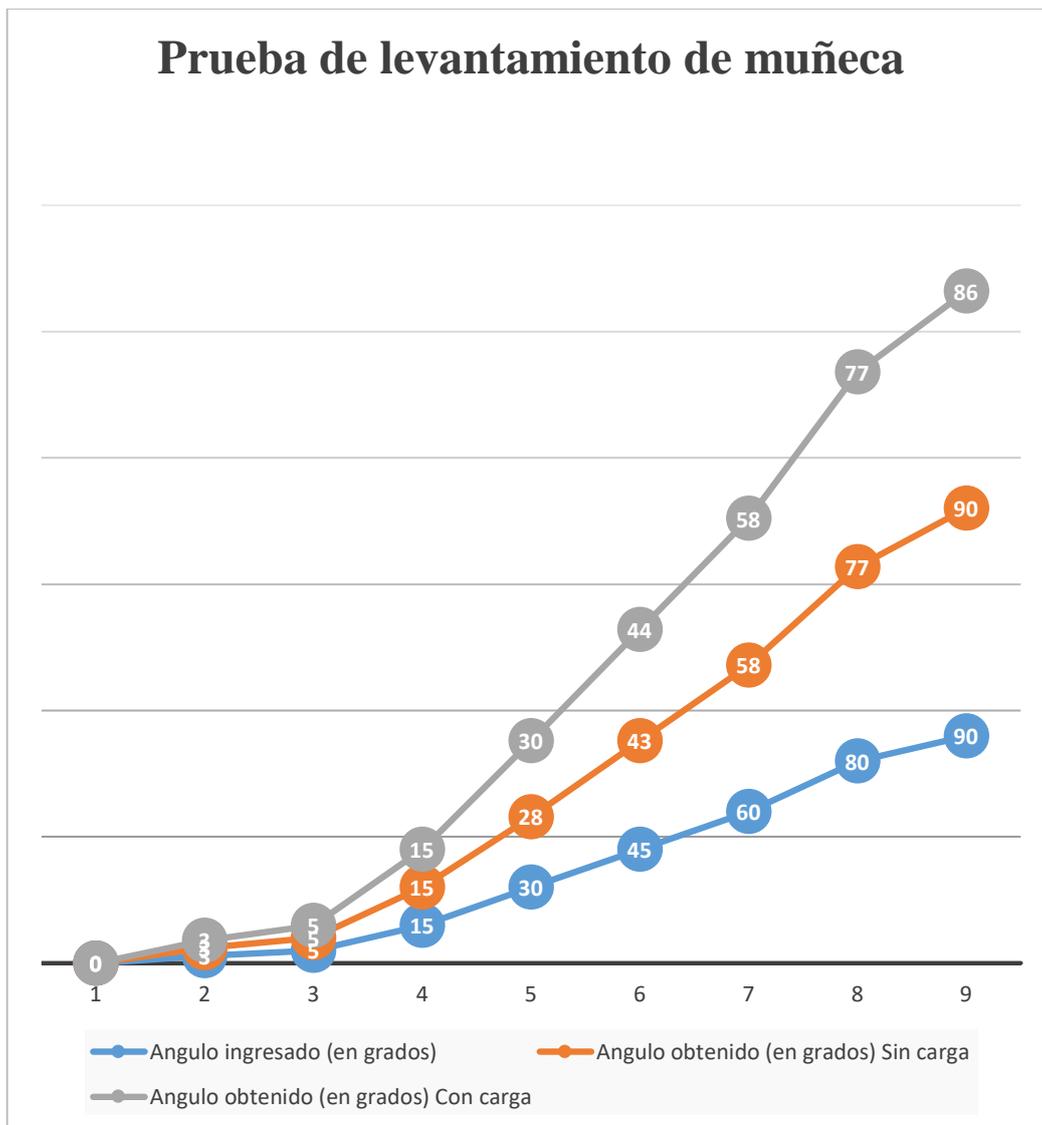


Figura 3.7. Mediciones de posicionamiento de la articulación de codo en levantamiento.

La *Tabla 3.7* muestra las diferentes mediciones de posicionamiento tomadas cuando la articulación de muñeca trabaja en modo levantamiento de peso en diferentes ángulos, y se grafican los datos en la *Figura 3.7*, en donde se observa de mejor manera el posicionamiento de la muñeca con y sin carga.

Según los datos de la *Tabla 3.7* se genera un error de 3 grados cuando la muñeca trabaja sin carga y de 4 grados cuando trabaja con carga.

- MUÑECA EN GIRO

Tabla 3.8.

Prueba de funcionamiento en la articulación de muñeca rotando al gripper.

Angulo ingresado (en grados)	Angulo obtenido (en grados)		Error (%)	
	Sin carga	Con carga (1Kg)	Sin carga	Con carga (1Kg)
0	0	0	0%	0%
3	3	2,8	0%	6,7%
5	5	5	0%	0%
10	10	9,6	0%	4%
20	20	19,5	0%	2,5%
30	30	30	0%	0%
50	50,2	48,7	0,4%	2,6%
80	80,2	78,6	0,25%	1,75%
110	108,9	106,8	1%	2,9%
140	138,3	137	1,21%	2,14%
160	159	158	0,6%	1,25%
180	178,5	179	0,83%	0,56%

El error de posicionamiento que presenta la articulación de muñeca en giro es un máximo de 1,21% cuando trabaja sin carga y de 6,7% cuando trabaja con carga.

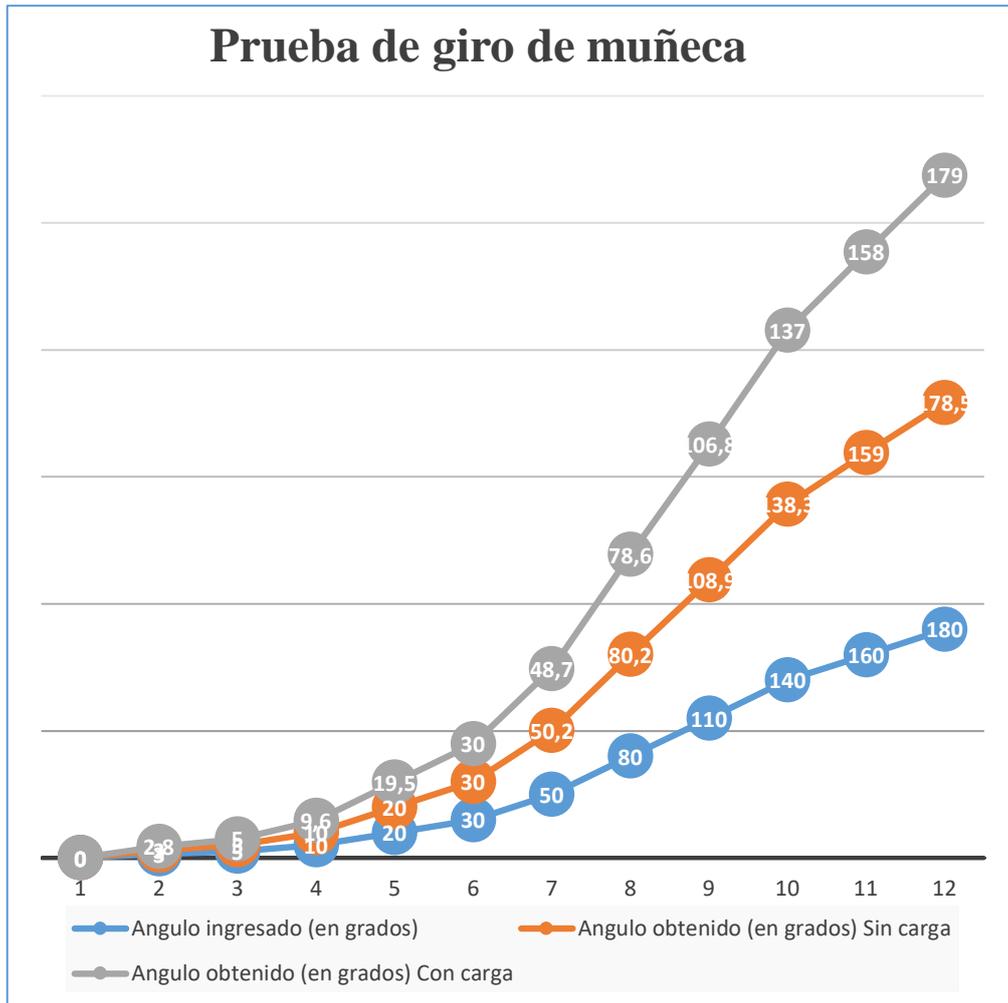


Figura 3.8. Mediciones de posicionamiento de la muñeca en giro.

La *Tabla 3.8* muestra las diferentes mediciones del posicionamiento de la articulación de muñeca cuando trabaja en modo de giro a ciertos ángulos, con los datos se genera la gráfica de la *Figura 3.8*, en donde se aprecia de mejor manera el porcentaje de error de posicionamiento con y sin carga.

Según la tabla anterior se obtiene un error de posicionamiento de 1.7 grados cuando la muñeca gira sin carga, y de 3.2 grados cuando lo hace con carga.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

- Mediante la investigación sobre los brazos robóticos se pudo seleccionar la configuración articulada, como la mejor configuración morfológica para el brazo UTN, siendo los principales parámetros de funcionamiento del antebrazo robot los desplazamientos angulares, en la articulación de codo de 0° como mínimo y de 110° como máximo, en la muñeca en levantamiento un mínimo de -90° hasta un máximo de 90° , por último en la muñeca en giro un valor mínimo de 0° a un máximo de 300° .
- Se escoge una plancha de aluminio ASTM A1200 de 3 mm de espesor para el diseño del antebrazo robot, por su relación peso resistencia y por ser fácil de conseguir en el mercado local.
- Se obtiene un factor de seguridad de 5 en el diseño del antebrazo robot, lo que asegura la fiabilidad del diseño, y un esfuerzo máximo de 16,24 MPa, valor que no supera el esfuerzo admisible del material.
- Los sistemas de transmisión empleados en cada articulación se los determina en base a los requerimientos de torque obtenidos mediante cálculos estáticos, también validados en MATLAB®, obteniendo un torque máximo de 19N.m para la articulación de codo, 6,8 N.m para la muñeca en levantamiento y de 1,3 N.m para la muñeca en giro.
- El modelo matemático para el control del antebrazo robot se obtiene con la ecuación lineal $y = 9.85x - 8.31$, y se comprueba con la ayuda de MATLAB®, donde se obtiene una respuesta idéntica a la generada por la ecuación.
- Se realizan análisis cinemáticos y dinámicos en el robot para asegurar su correcto funcionamiento, estos análisis permiten seleccionar los actuadores correctos para cada articulación, siendo un motor DC-550 para el codo y motores a pasos NEMA17 para la articulación de muñeca.

- La construcción y ensamblaje de las articulaciones de codo y muñeca asegura un fácil acoplamiento con el resto de componentes del brazo robot UTN, así mismo es de rápido acceso para la manipulación de componentes internos, por ser totalmente desmontable.
- La implementación del sistema de control en lazo cerrado para la articulación de codo y de lazo abierto para la muñeca, permite una conexión de 9600 baudios con el resto de componentes del brazo UTN.
- Con las pruebas de funcionamiento realizadas se obtuvo un error del 80% en el codo cuando trabaja entre sus primeros 8° de funcionamiento, reduciéndose al 1,8% en 110°, la articulación de muñeca presenta un error máximo de 4,4% en levantamiento y de 6,7% en giro, en todos los casos trabajando con carga.

RECOMENDACIONES

- En trabajos futuros se recomienda continuar la línea de investigación enfocada en los diferentes tipos de materiales, buscando una reducción del peso del antebrazo robot, reduciendo el esfuerzo que realizan los actuadores, es recomendable usar un material compuesto de buenas características mecánicas y de bajo peso.
- La velocidad de trabajo se puede reducir con el uso de actuadores de mayor velocidad, sistemas de transmisión diferentes y con mejoras en el sistema de control.
- Se recomienda implementar sensores de posición en cada articulación del brazo para evitar posibles colisiones y censar en tiempo real la ubicación del robot.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdalá Castillo, S., & Ñeco Caberta, R. (2003). *CARACTERIZACIÓN DE UN ROBOT MANIPULADOR ARTICULADO* (Ingeniero Mecatrónico), CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
- AliExpress. (2016). TB6560 3A stepper motor driver. Retrieved from <https://es.aliexpress.com/item/5PCS-TB6560-3A-stepper-motor-driver-stepper-motor-driver-board-axis-current-controller-10-files/32637627845.html?spm=2114.13010608.0.0.xXxxim>
- Alonzo, F., & Bravo, M. (2014). *Diseño, construcción y control de un brazo robótico*. (Ingeniero Electrónico), UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO, Quito-Ecuador.
- Barrientos, A. (1997). *Fundamentos de Robótica* (2da ed.): McGraw Hill.
- Beristian López, J., & Espinos Vázquez, P. D. (2010). *Sistema de Control para motores a pasos de tipo unipolar*. (Ingeniería en Control y Automatización.), Instituto Politécnico Nacional., Mexico D.F.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (Octava ed.). México.
- Catálogo de rodamientos SKF. (2015). In G. SKF (Ed.).
- COMERCIO, D. E. (2010). 3 jóvenes proveerán brazos robóticos a la industria. *EL COMERCIO*. Retrieved from <http://www.elcomercio.com/tendencias/tecnologia/jovenes-proveeran-brazos-roboticos-industria.html>.
- Corke, P. (2017). Robotics Toolbox. Retrieved from <http://petercorke.com/wordpress/toolboxes/robotics-toolbox>
- De La Rosa Mejillón, N. D. (2014). "*BRAZO ROBOT, PARA EL RECONOCIMIENTO Y MANIPULACIÓN DE OBJETOS, CONTROLADO MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL, COMO COMPLEMENTO DE TECNOLOGÍA ROBÓTICA EN LA CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA AÑO 2014*". (Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.), Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad-Ecuador.
- FU, K. S., GONZALEZ, R. C., & LEE, C. S. G. (1988). *ROBOTICA: Control, detección, visión e inteligencia*. México: McGraw-Hill.
- González Zambrano, R. (2009). *DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE UN LABORATORIO REMOTO DE ROBÓTICA*., Universidad Autónoma de Barcelona.,
- Granta, D. I. (2005). CES EduPack (Version 4.6). United Kingdom: Cambridge.
- Kelly, R., & Santibáñez, V. (2003). *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*. Madrid: Pearson Education.
- Lovine, J. (2002). *Robots, Androids, and Animatrons* (McGraw-Hill Ed. Second ed.). United States of America.
- López Apostolovich, L. F. (2009). *MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD PARA TAREAS SOBRE UN PLANO HORIZONTAL* (Ingeniero Mecánico), Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Martínez, G., Mejía, J., Jáquez, S., & Sandoval, R. (2008). *Diseño propio y Construcción de un Brazo Robótico de 5 GDL* (4), (1)
- Montana, M., A. C., Londoño, A., F. J., Piedrahita, R., & A. C. (2012). Ingeniería inversa de un reductor de tornillo sinfín - corona. In (Vol. XVII, pp. 204-210). Pereira, Colombia.: Scientia Et Technica.

- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. (Cuarta ed.). México: Pearson Education.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas* (cuarta ed.). México: Pearson Education.
- Olier Caparros, I., Avilés, O., & Hernández Bello, J. (1999). Una introducción a la Robótica Industrial. *Revista de la Facultad de Ingeniería*.
- Ollero Baturone, A. (2001). *Robótica, manipuladores y robots móviles*. Barcelona(España): Marcombo.
- Pololu. (2017). Robotics & Electronics. Retrieved from <https://www.pololu.com/product/3207>
- Reyes Cortés, F. (2011). *Robótica: control de robots manipuladores*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Serway.Raymond, & Jewett.Jhon. (2008). *Física para Ciencias e Ingeniería* (E. S.A. Ed. Séptima ed. Vol. 1). Mexico DF.
- Toshiba. (2014). Driver Tb6560. Retrieved from https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjG6oju_JPVAhVBMMyYKHWgSBg8QFghfMAw&url=http%3A%2F%2Ftoshiba.semicon-storage.com%2Finfo%2Fdocget.jsp%3Fdid%3D28726%26prodName%3DTB6560AHQ&usg=AFQjCNGsqQgiKuq5GfrMBbRW0Pc43zHS4Q
- Vaca, S. (2002). *Diseño y simulación de un robot manipulador industrial tipo puma capaz de levantar pesos de hasta 20 kg*. (Ingeniero Mecánico), Escuela Politécnica Nacional.

ANEXOS

Anexo 1. Material



ALUMINIO

PLANCHAS LISAS



Especificaciones Generales

Descripción ASTM A 1200 - TEMPLE H 14

Aplicaciones Estructuras de furgones para camiones.
Foros interiores de buses.
Recubrimiento de paredes.
Utensilios de cocina.
Recipientes para alimentos líquidos corrosivos.
Fabricación de estructuras para lámparas.
Álabes de turbinas.
Ductos.
Maquinado de piezas automotrices y de máquinas.
Bandejas para alimentos.

Dimensiones 1220 x 2440 mm (estándar)

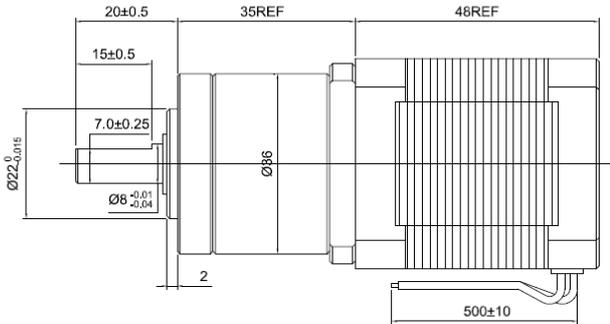
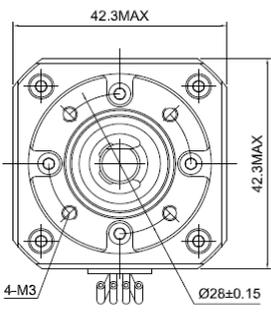
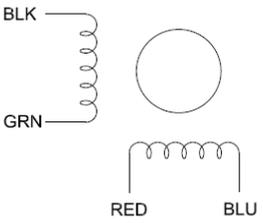
Espesor mm	Resistencia Mecánica	% Elongación
0.7 - 4.00	127 - 135 Kg/mm2	6.5 - 7.5

Composición Química %								
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Mn
0.24	0.57	0.030	0.025	0.01	0.047	-	0.01	REMAINDER

ALUMINIO

Fuente: Catalogo DIPAC

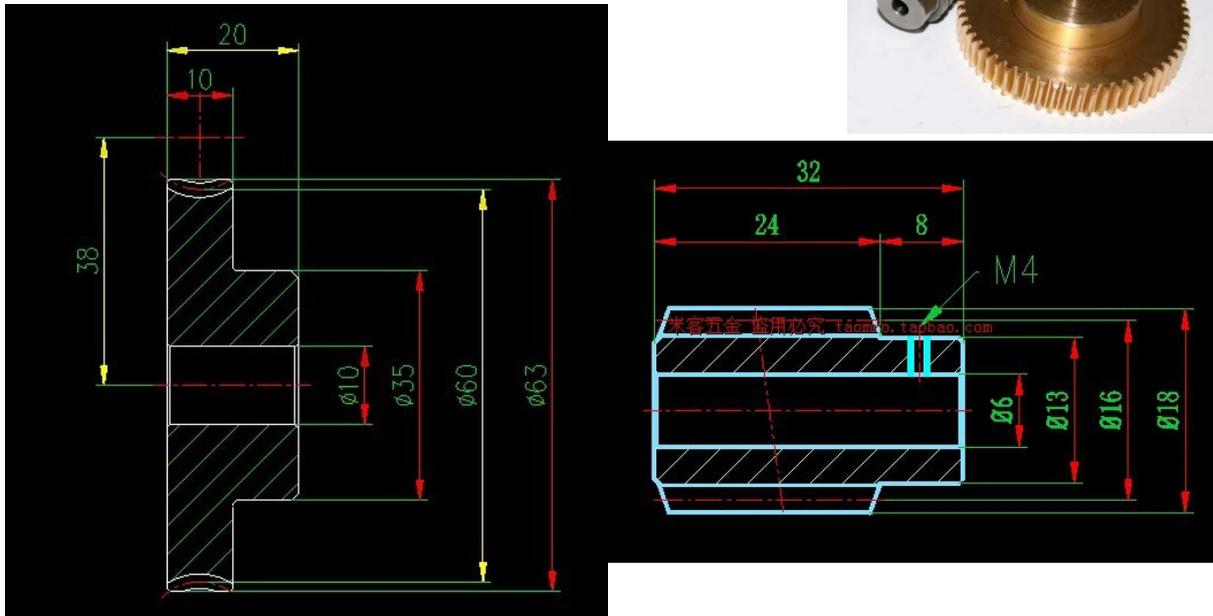
Anexo 2. Motor paso a paso

<h1 style="margin: 0;">Nema 17 Planetary Geared Stepper Motor</h1>					Rev: A																									
					Date:																									
<p>COMMON RATINGS</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">Step angle :</td> <td style="width: 33%;">1.8°</td> <td style="width: 33%;">Dielectric strength :</td> <td colspan="2">500VAC</td> </tr> <tr> <td>Positional accuracy :</td> <td>±5%</td> <td>Insulation resistance :</td> <td colspan="2">100Mohm(500VDC)</td> </tr> <tr> <td>Number of Phase :</td> <td>2</td> <td>Ambient Temperature :</td> <td colspan="2">-10°C~50°C</td> </tr> <tr> <td>Temperature rise :</td> <td>80°C MAX</td> <td>Insulation class :</td> <td colspan="2">B</td> </tr> <tr> <td>Rotor Inertia :</td> <td>68gcm²</td> <td>Weight :</td> <td colspan="2">0.6Kg</td> </tr> </table>						Step angle :	1.8°	Dielectric strength :	500VAC		Positional accuracy :	±5%	Insulation resistance :	100Mohm(500VDC)		Number of Phase :	2	Ambient Temperature :	-10°C~50°C		Temperature rise :	80°C MAX	Insulation class :	B		Rotor Inertia :	68gcm ²	Weight :	0.6Kg	
Step angle :	1.8°	Dielectric strength :	500VAC																											
Positional accuracy :	±5%	Insulation resistance :	100Mohm(500VDC)																											
Number of Phase :	2	Ambient Temperature :	-10°C~50°C																											
Temperature rise :	80°C MAX	Insulation class :	B																											
Rotor Inertia :	68gcm ²	Weight :	0.6Kg																											
<p>SPECIFICATIONS</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">Holding Torque Before Gearbox (N.cm)</th> <th style="width: 20%;">Rated Current/Phase (Amps DC)</th> <th style="width: 20%;">Phase Resistance (ohms) ±10%</th> <th style="width: 20%;">Rated Voltage/Phase (V DC)</th> <th style="width: 20%;">Phase Inductance (mH) ±20%(1KHz) Typical</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>44.0</td> <td>1.68</td> <td>1.65</td> <td>2.8</td> <td>2.8</td> </tr> </tbody> </table>						Holding Torque Before Gearbox (N.cm)	Rated Current/Phase (Amps DC)	Phase Resistance (ohms) ±10%	Rated Voltage/Phase (V DC)	Phase Inductance (mH) ±20%(1KHz) Typical	44.0	1.68	1.65	2.8	2.8															
Holding Torque Before Gearbox (N.cm)	Rated Current/Phase (Amps DC)	Phase Resistance (ohms) ±10%	Rated Voltage/Phase (V DC)	Phase Inductance (mH) ±20%(1KHz) Typical																										
44.0	1.68	1.65	2.8	2.8																										
<p>DIMENSIONS unit=mm</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>																														
<p>CONNECTIONS</p> 			<p>GEARBOX</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 70%;">Gear Ratio</td> <td>26 ¹⁰⁰/₂₁</td> </tr> <tr> <td>Efficiency</td> <td>81%</td> </tr> <tr> <td>Backlash at No-load</td> <td><= 1°</td> </tr> <tr> <td>Max. Permissible Torque(Nm)</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>Moment Permissible Torque(Nm)</td> <td>5.0</td> </tr> <tr> <td>Shaft Maximum Axial Load(N)</td> <td>50.0</td> </tr> <tr> <td>Shaft Maximum Radial Load(N)</td> <td>100.0</td> </tr> </table>			Gear Ratio	26 ¹⁰⁰ / ₂₁	Efficiency	81%	Backlash at No-load	<= 1°	Max. Permissible Torque(Nm)	3.0	Moment Permissible Torque(Nm)	5.0	Shaft Maximum Axial Load(N)	50.0	Shaft Maximum Radial Load(N)	100.0											
Gear Ratio	26 ¹⁰⁰ / ₂₁																													
Efficiency	81%																													
Backlash at No-load	<= 1°																													
Max. Permissible Torque(Nm)	3.0																													
Moment Permissible Torque(Nm)	5.0																													
Shaft Maximum Axial Load(N)	50.0																													
Shaft Maximum Radial Load(N)	100.0																													
17HS19-1684S-PG27					技术规格书																									
标记	处数	分区	更改文件号	签名	日期	OSM TECHNOLOGY																								
设计			标准化																											
审核																														
工艺			批准																											
			阶段 标记	重量	比例																									
			共 张	第 张																										

Fuente: STEPPERONLINE.

Anexo 3. Transmisión sinfín-corona

1M 60Teeth Precision Copper Turbo Worm Reducer Worm Gear Screw Lifting Machine Accessories



No. de Modelo	No. de Dientes	Diámetro de paso de la corona(mm)	Distancia entre centros(mm)	Diámetro de paso del sinfín(mm)	Diámetro del cubo(mm)	Diámetro del agujero interior de la corona(mm)	Diámetro del agujero interior del sinfín(mm)
ccvv	60	60	38	16	35	15	6

Fuente: Kohara Gear Industry Co.

Anexo 4. Eje



EJES ACERO 705

Especificaciones Generales

Material	AISI 4340
Dureza HB	240-380
límite de Influencia	225 N/mm ²
Aplicaciones	PARTES DE MAQUINARIAS SOMETIDAS A ALTOS ESFUERZOS, BRAZO DE DIRECCIÓN, CIGUEÑALES, ARBOLES DE LEVA, BARRAS DE TORSION, EMBRAGUES, PIÑONES, BARRAS DE CARDAN, EJES DE BOMBAS, EJES PARA AVIONES, MUÑONES, PERNOS DE ALTO GRADO DE TENSION, RODILLOS DE TRANSPORTADORA, ETC...



EJES

DIMENSIONES

DIAMETRO	LONGITUD
32 mm	6m.
38 mm	6m.
45 mm	6m.
50 mm	6m.
60 mm	6m.
70 mm	6m.

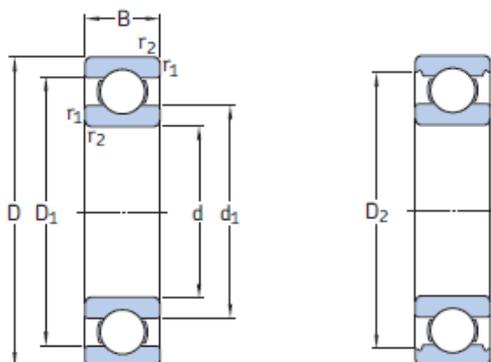
PROPIEDADES QUÍMICAS

%C	%Si	%Mn	%P	%S
0,34	0,1- 0,35	0,60 - 0,80	0,04 - 0,30	0,002 - 0,03

Fuente: Catalogo DIPAC

Anexo 5. Rodamientos

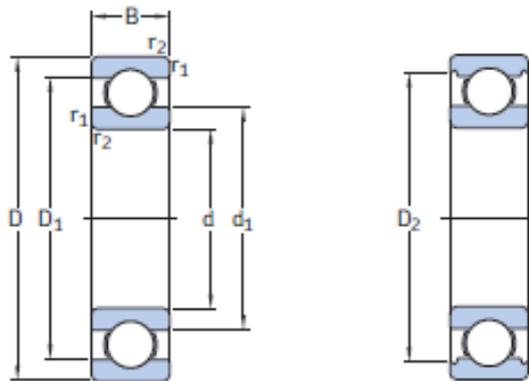
Rodamiento codo



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	Carga dinámica C	Carga estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN	kN	kN	r. p. m.		kg	-
3	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	80 000	0,0015	623
4	9	2,5	0,423	0,116	0,005	140 000	85 000	0,0007	618/4
	11	4	0,624	0,18	0,008	130 000	80 000	0,0017	619/4
	12	4	0,806	0,28	0,012	120 000	75 000	0,0021	604
	13	5	0,936	0,29	0,012	110 000	67 000	0,0031	624
	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	60 000	0,0054	634
5	11	3	0,468	0,143	0,006	120 000	75 000	0,0012	618/5
	13	4	0,884	0,335	0,014	110 000	70 000	0,0025	619/5
	16	5	1,14	0,38	0,016	95 000	60 000	0,005	* 625
	19	6	2,34	0,95	0,04	80 000	50 000	0,0085	* 635
6	13	3,5	0,715	0,224	0,01	110 000	67 000	0,002	618/6
	15	5	0,884	0,27	0,011	100 000	63 000	0,0039	619/6
	19	6	2,34	0,95	0,04	80 000	50 000	0,0081	* 626
7	14	3,5	0,78	0,26	0,011	100 000	63 000	0,0022	618/7
	17	5	1,06	0,375	0,016	90 000	56 000	0,0049	619/7
	19	6	2,34	0,95	0,04	85 000	53 000	0,0076	* 607
	22	7	3,45	1,37	0,057	70 000	45 000	0,012	* 627
8	16	4	0,819	0,3	0,012	90 000	56 000	0,003	618/8
	19	6	1,46	0,465	0,02	85 000	53 000	0,0071	619/8
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	48 000	0,012	* 608
	24	8	3,9	1,66	0,071	63 000	40 000	0,018	* 628
9	17	4	0,871	0,34	0,014	85 000	53 000	0,0034	618/9
	20	6	2,34	0,98	0,043	80 000	50 000	0,0076	619/9
	24	7	3,9	1,66	0,071	70 000	43 000	0,014	* 609
	26	8	4,75	1,96	0,083	60 000	38 000	0,02	* 629
10	19	5	1,72	0,83	0,036	80 000	48 000	0,0053	61800
	22	6	2,7	1,27	0,054	70 000	45 000	0,01	61900
	26	8	4,75	1,96	0,083	67 000	40 000	0,019	* 6000
	28	8	5,07	2,36	0,1	60 000	38 000	0,024	16100
	30	9	5,4	2,36	0,1	56 000	36 000	0,031	* 6200
	35	11	8,52	3,4	0,143	50 000	32 000	0,053	* 6300

* Rodamiento SKF Explorer

Rodamiento muñeca

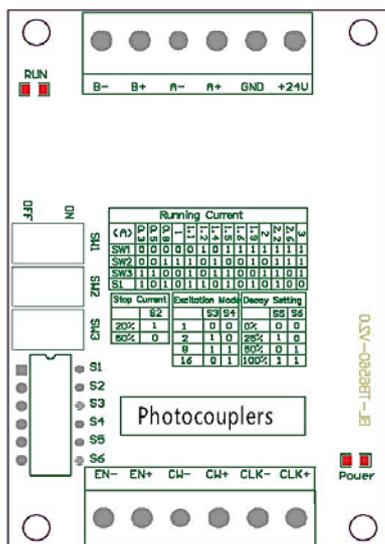


Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
12	21	5	1,74	0,915	0,039	70 000	43 000	0,0063	61801
	24	6	2,91	1,46	0,062	67 000	40 000	0,011	61901
	28	8	5,4	2,36	0,1	60 000	38 000	0,021	* 6001
	30	8	5,07	2,36	0,1	60 000	38 000	0,026	16101
	32	10	7,28	3,1	0,132	50 000	32 000	0,037	* 6201
	37	12	10,1	4,15	0,176	45 000	28 000	0,06	* 6301
15	24	5	1,9	1,1	0,048	60 000	38 000	0,0065	61802
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	34 000	0,016	61902
	32	8	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,03	* 16002
	32	9	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,03	* 6002
	35	11	8,06	3,75	0,16	43 000	28 000	0,045	* 6202
	42	13	11,9	5,4	0,228	38 000	24 000	0,082	* 6302
17	26	5	2,03	1,27	0,054	56 000	34 000	0,0075	61803
	30	7	4,62	2,55	0,108	50 000	32 000	0,016	61903
	35	8	6,37	3,25	0,137	45 000	28 000	0,038	* 16003
	35	10	6,37	3,25	0,137	45 000	28 000	0,038	* 6003
	40	12	9,95	4,75	0,2	38 000	24 000	0,065	* 6203
	40	12	11,4	5,4	0,228	38 000	24 000	0,064	6203 ETN9
	47	14	14,3	6,55	0,275	34 000	22 000	0,11	* 6303
	62	17	22,9	10,8	0,455	28 000	18 000	0,27	6403

Fuente: Catalogo SKF.

Anexo 6. Driver motor paso a paso

Tb6560 stepping motor driver V20



Warning:

1. Check the connection twice! The Tb6560 chipset can be damaged if the motor or the power supply are not connected properly.
2. Don't apply a motor that its rated current is more than 3A to this driver.
3. Do not set the current more than the motor rated current!

Wiring Terminal symbol	Description
+24V, GND	Power positive and negative
A+, A-	Motor phase A
B+, B-	Motor phase B
CLK+, CLK-	Pulse positive and negative
CW+, CW-	Direction positive and negative
EN+, EN-	Enable positive and negative

Note:

1. 6 input terminals, can be connected as common anode or cathode.
2. The normal input voltage is 5V, if it is more than 5V, than a series resistor is needed. this resistance is 1K case 12V and 2.4K case 24V.
3. when pulse is applied to **CLK**, the stepping motor will rotate, and stop when there is none, and the motor driver will change its current to the half current mode as setting to hold the motor still.
4. Motor rotate clockwise when **CW** is low level and counterclockwise when **CW** is high level.
5. Motor is enable when **EN** is low level and disable when EN is high level.

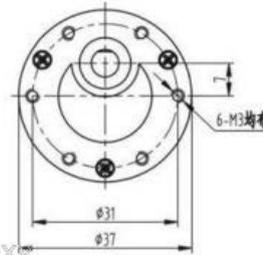
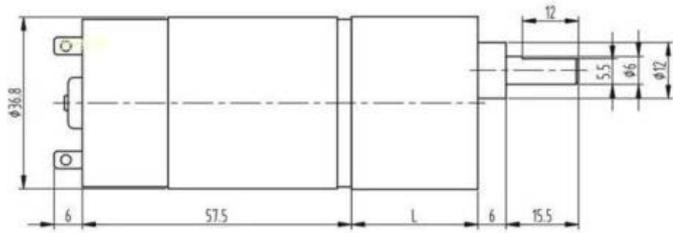
Running Current														
(A)	0.3	0.5	0.8	1	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.9	2	2.2	2.6	3
SW1	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON						
SW2	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON
SW3	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON
S1	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF

Stop Current	
	S2
20%	ON
50%	OFF

Excitation Mode		
Step	S3	S4
whole	OFF	OFF
half	ON	OFF
1/8	ON	ON
1/16	OFF	ON

Decay Setting		
	S5	S6
0%	OFF	OFF
25%	ON	OFF
50%	OFF	ON
100%	ON	ON

Anexo 7. Motor DC.



fly-xy

fly-xy

Motor gear is all metal gear, the torque is very large. L is the length of the reducer housing portion

Vol DCV	no-load rpm/min	current A	load speed rpm/min	torque kg.cm	power W	load current A	stall-torque kg.cm	stall-current A	ratio	L mm	weight g
6	1000	0.8	800	2.5	30	2	13	5	1:8	23.5	285
6	434	0.8	368	5.5	30	2	29	5	1:19	23.5	288
6	343	0.8	274	6	30	2	35	5	1:24	24	288
6	147	0.8	124	10	30	1.5	40	5	1:56	27	300
6	62	0.8	53	20	30	1.5	60	5	1:131	31	320
6	49	0.8	42	30	30	1	80	5	1:168	36	330
6	27	0.8	23	40	30	1	120	5	1:305	36	340
6	16	0.8	14	50	30	1	160	5	1:505	38	360
6	8	0.8	7	60	30	1	230	5	1:973	40	380
12	2000	1.6	1600	5	60	3	26	7	1:8	23.5	285
12	868	1.6	738	8	60	2.5	50	7	1:19	23.5	288
12	688	1.6	585	9	60	2.5	55	7	1:24	24	288
12	295	1.6	250	12	60	2	80	7	1:56	27	300
12	125	1.6	106	25	60	1.5	120	7	1:131	31	320
12	100	1.6	85	40	60	1.5	150	7	1:168	36	340
12	54	1.6	46	45	60	1.5	180	7	1:305	36	360
12	32	1.6	27	50	60	1.5	230	7	1:505	38	360
12	16	1.6	14	60	60	1.5	260	7	1:973	40	380

Fuente: Pololu

Anexo 8. Encoder



ELECTRONICS, INC.
 44 FARRAND STREET
 BLOOMFIELD, NJ 07003
 (973) 748-5089
<http://www.ntecinc.com>

NTE3100 Photon Coupled Interrupter Module

Description:

The NTE3100 Interrupter Module is a gallium arsenide infrared emitting diode and a NPN silicon photo transistor mounted in a polycarbonate housing. The package is designed to optimize the mechanical resolution, coupling efficiency, ambient light rejection, cost and reliability. Operating on the principle that opaque to infrared will interrupt the transmission of light between an infrared emitting diode and a photo sensor switching the output from an "ON" state to an "OFF" state.

Features:

- High Gain
- 3mm Gap Between LED and Detector
- Polycarbonate Case Protected Against Ambient Light

Applications:

- Copiers, Printers, FAX Machines, Record Players, Cassette Decks, Optoelectronic Switches

Absolute Maximum Ratings: ($T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Total Device

Operating Temperature Range, T_J	-25° to $+85^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range, T_{stg}	-40° to $+85^\circ\text{C}$
Lead Temperature (During Soldering, 1/16" (1.6mm) from case, 10sec max), T_L	$+260^\circ\text{C}$

Input Diode

Power Dissipation, P_E	75mW
Forward Current, I_F	50mA
Reverse Voltage, V_R	5V

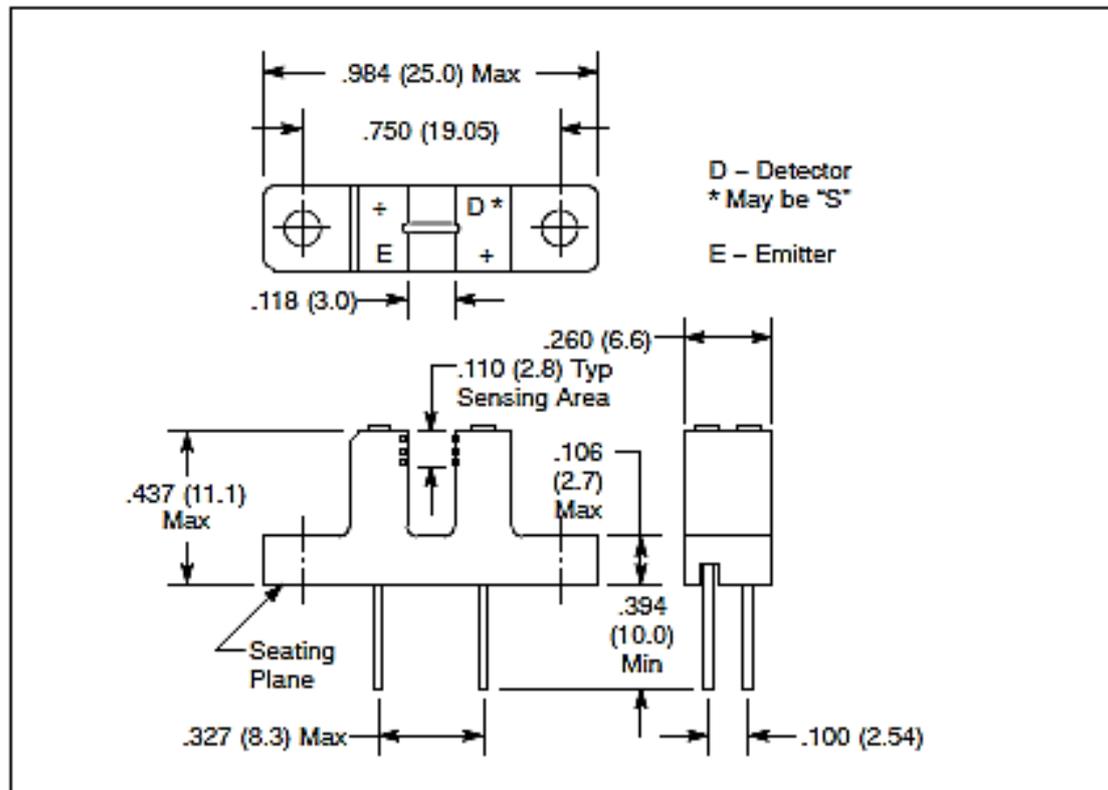
Output Transistor

Power Dissipation, P_D	75mW
Collector Current, I_C	20mA
Collector-Emitter Voltage, V_{CE0}	30V
Emitter-Collector Voltage, V_{EC0}	5V

Rev. 6-11

Electrical Characteristics: ($T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Input						
Forward Voltage	V_F	$I_F = 50\text{mA}$	-	1.2	1.7	V
Reverse Voltage	V_R	$I_R = 100\mu\text{A}$	5	-	-	V
Reverse Current	I_R	$V_R = 5\text{V}$	-	-	100	μA
Output						
Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{(BR)CEO}$	$I_C = 1\text{mA}$	30	-	-	V
Emitter-Collector Breakdown Voltage	$V_{(BR)ECO}$	$I_E = 100\mu\text{A}$	6	-	-	V
Collector-Emitter Dark Current	I_{CEO}	$V_{CE} = 10\text{V}$	-	-	100	nA
Coupled						
Collector "ON" Current	$I_{CE(on)}$	$I_F = 5\text{mA}, V_{CE} = 5\text{V}$	0.15	-	-	mA
		$I_F = 20\text{mA}, V_{CE} = 5\text{V}$	1.0	-	-	mA
		$I_F = 30\text{mA}, V_{CE} = 5\text{V}$	1.9	-	-	mA
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_F = 30\text{mA}, I_C = 1.8\text{mA}$	-	-	0.4	V
Turn-On Time	t_{on}	$V_{CC} = 5\text{V}, I_F = 30\text{mA}, R_L = 2.5\text{k}\Omega$	-	8	-	μs
Turn-Off Time	t_{off}		-	50	-	μs



Fuente: Catalogo NTE

Anexo 9. Programación en Matlab para el análisis cinemático-dinámico.

```

% UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
% FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
% CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
%
%
startup_rvc          %Ejecutar el robotics toolboxes

open_system('brazo4.mdl') % Abrir el archivo importado del CAD.

%L=Link([q d l a sigma offset])
L1=Link([0 0.26 0 pi/2 0 0]); %Se establecen los links de los
L2=Link([0 0 0.4 0 0 0]); %parámetros D-H
L3=Link([0 0 0.3 0 0 0]);
L4=Link([0 0 0 -pi/2 0 pi/2]);
L5=Link([0 0 0 pi/2 0 pi]);

% Se establecen las características dinámicas de los eslabones del robot.

L1.m=str2num(get_param('brazo4/Base-2','mass')); %Se obtiene el valor de las masas
L2.m=str2num(get_param('brazo4/Hombro2-3','mass')); %de cada eslabón
L3.m=str2num(get_param('brazo4/Antebrazo1-3','mass'));
L4.m=str2num(get_param('brazo4/Antebrazo2-2','mass'));
L5.m=str2num(get_param('brazo4/Gripper-2','mass'));

L1.I=str2num(get_param('brazo4/Base-2','inertia')); %Se obtiene el valor
de la
L2.I=str2num(get_param('brazo4/Hombro2-3','inertia')); % inercia para
cada eslabón.
L3.I=str2num(get_param('brazo4/Antebrazo1-3','inertia'));
L4.I=str2num(get_param('brazo4/Antebrazo2-2','inertia'));
L5.I=str2num(get_param('brazo4/Gripper-2','inertia'));

L1.r=[4.08 151.57 383.14]; %se declaran los centros
L2.r=[-46.93 159.44 242.54]; % de masa
L3.r=[-139.63 423.47 456.18];
L4.r=[-295.68 436.75 451.39];
L5.r=[-12.15 -24.68 70.45];

R=SerialLink([L1,L2,L3,L4,L5]) % creamos el robot

R.name=('Robot-UTN') % le damos un nombre al robot creado
%se grafica el robot creado en el entorno en su posición inicial
plot(R,[0 0 0 0])
%se realiza la cinemática directa para un punto

% posición deseada
p0=[0 0 0 0 0];
p1=[pi -2*pi/3 -pi/2 -pi/4 pi];
p2=[0 pi/2 0 0 0];
p3=[3/4*pi 0 -pi/4 0 0];
p4=[0 0 0 0 pi];

```

```
% análisis de la cinemática directa
```

```
Cd0=R.fkine(p0)
Cd1=R.fkine(p1)
Cd2=R.fkine(p2)
Cd3=R.fkine(p3)
Cd4=R.fkine(p4)
```

```
% cinemática inversa.....
```

```
NOAP0=Cd0;
NOAP1=Cd1;
NOAP2=Cd2;
NOAP3=Cd3;
NOAP4=Cd4;
```

```
M=[1 1 1 1 1 0]
```

```
Q1=R.ikine(NOAP0,p0,M)
Q2=R.ikine(NOAP1,p1,M)
Q3=R.ikine(NOAP2,p2,M)
Q4=R.ikine(NOAP3,p3,M)
Q5=R.ikine(NOAP4,p4,M)
```

```
% definimos el tiempo
```

```
t=(0:0.05:2);
```

```
% generamos las trayectorias
```

```
[q,qd,qdd]=jtraj(p0,p1,t);
[q1,qd1,qdd1]=jtraj(p1,p2,t);
[q2,qd2,qdd2]=jtraj(p2,p3,t);
[q3,qd3,qdd3]=jtraj(p3,p4,t);
[q4,qd4,qdd4]=jtraj(p4,p0,t);
```

```
% se grafican las trayectorias generadas para el robot
```

```
plot(R,[jtraj(p0,p1,t);jtraj(p1,p2,t);jtraj(p2,p3,t);jtraj(p3,p4,t);jtraj(p4,p0,t)])
```

```
% Análisis de la dinámica inversa
```

```
tau=R.rne(q,qd,qdd);
```

```
figure(1)
```

```
plot(tau) % Gráfica de torques
```

```
tau1=R.rne(q1,qd1,qdd1);
```

```
figure(2)
```

```
plot(tau1)
```

```
tau2=R.rne(q2,qd2,qdd2);
```

```
figure(3)
```

```
plot(tau2)
```

```
tau3=R.rne(q3,qd3,qdd3);
```

```
figure(4)
```

```
plot(tau3)
```

```
tau4=R.rne(q4,qd4,qdd4);
```

```
figure(5)
```

```
plot(tau4)
```

```
%parámetros de exportación para el entorno de Simulink
```

```
%base
```

```
Bb(:,1)=(t);
Bb(:,2)=q(:,1);
assignin('base','Bb',Bb);
```

```
Bvb(:,1)=(t);
Bvb(:,2)=qd(:,1);
assignin('base','Bvb',Bvb);
```

```
Bab(:,1)=(t);
Bab(:,2)=qdd(:,1);
assignin('base','Bab',Bab);
```

```
%hombro
```

```
Bh(:,1)=(t);
Bh(:,2)=q(:,2);
assignin('base','Bh',Bh);
```

```
Bvh(:,1)=(t);
Bvh(:,2)=qd(:,2);
assignin('base','Bvh',Bvh);
```

```
Bah(:,1)=(t);
Bah(:,2)=qdd(:,2);
assignin('base','Bah',Bah);
```

```
%codo
```

```
Bc(:,1)=(t);
Bc(:,2)=q(:,3);
assignin('base','Bc',Bc);
```

```
Bvc(:,1)=(t);
Bvc(:,2)=qd(:,3);
assignin('base','Bvc',Bvc);
```

```
Bac(:,1)=(t);
Bac(:,2)=qdd(:,3);
assignin('base','Bac',Bac);
```

```
%muñeca
```

```
Bm(:,1)=(t);
Bm(:,2)=q(:,4);
assignin('base','Bm',Bm);
```

```
Bvm(:,1)=(t);
Bvm(:,2)=qd(:,4);
assignin('base','Bvm',Bvm);
```

```
Bam(:,1)=(t);
Bam(:,2)=qdd(:,4);
assignin('base','Bam',Bam);
```

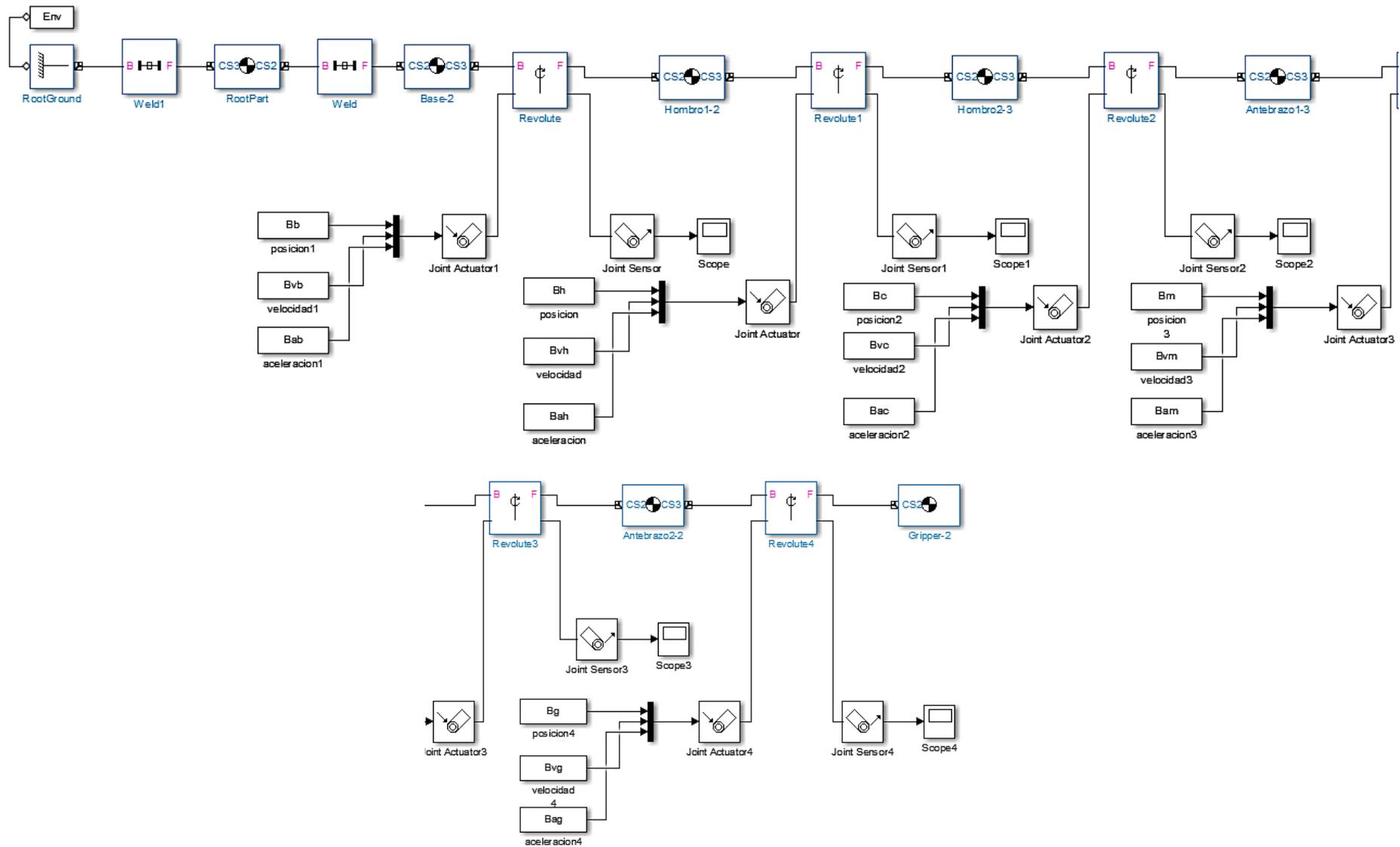
```
%giro
```

```
Bg(:,1)=(t);
Bg(:,2)=q(:,5);
assignin('base','Bg',Bg);
```

```
Bvg(:,1)=(t);  
Bvg(:,2)=qd(:,5);  
assignin('base','Bvg',Bvg);
```

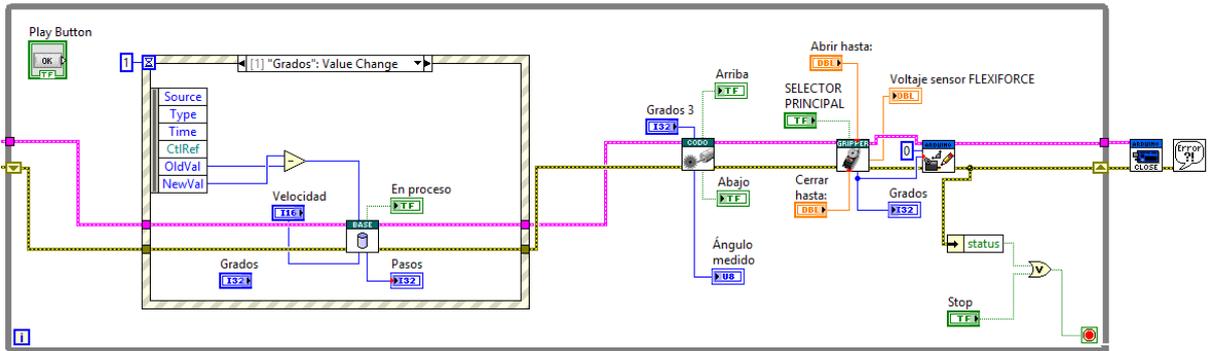
```
Bag(:,1)=(t);  
Bag(:,2)=qdd(:,5);  
assignin('base','Bag',Bag);  
% abre el archivo .mdl  
sim('brazo4.mdl')
```

Anexo 10. Diagrama de bloques en Simulink para el análisis Cinemático-Dinámico.

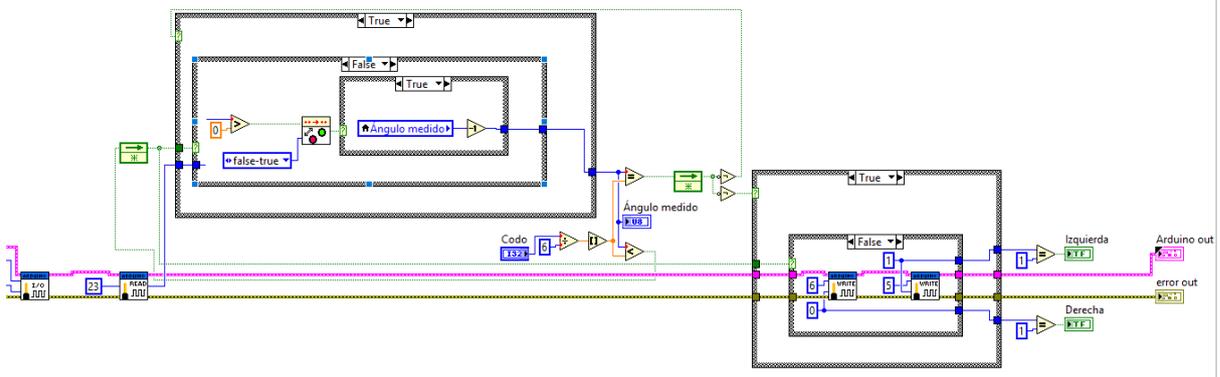


Anexo 11. Programación en LabVIEW

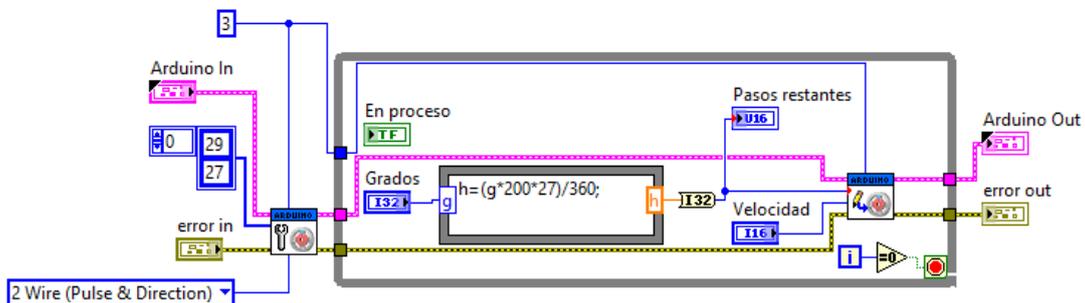
Programación completa del brazo robot en accionamiento manual



Programación del SubVI del codo



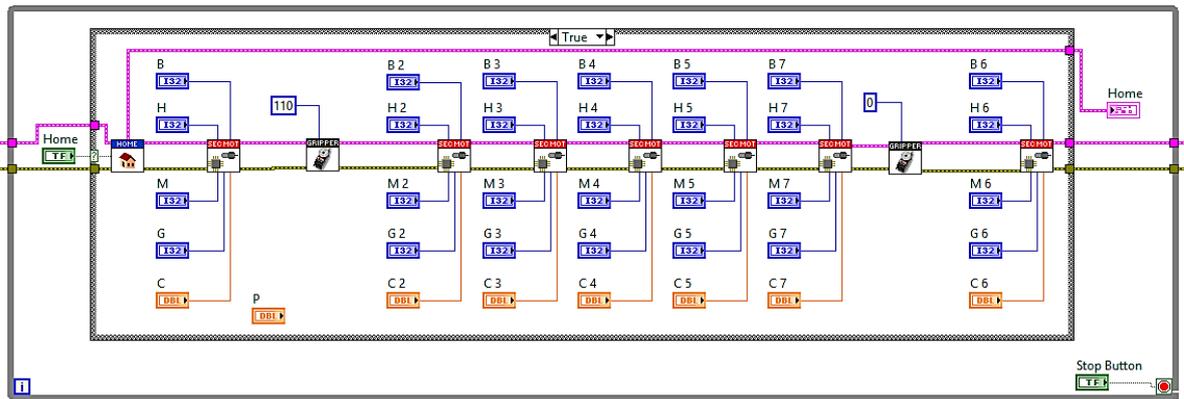
Programación del SubVI de la muñeca



Interfaz gráfica del programa de control en LabVIEW en secuencia manual



Programación completa del brazo robot en ejecución de secuencias



Interfaz gráfica del programa de control en secuencias.

H	M	B	C	G
10	70	0	0	0
10	70	0	0	0
80	40	30	6	0
80	40	30	0	90
10	70	30	0	0
10	70	0	0	0
90	-90	0	0	0

Home
 Hombro
 Codo
 Muñeca
 Giro

Puerto COM: COM3
Home **Stop**
Peso objeto [gr]: 1000

(H) Hombro: 90 a 0
 (M) Muñeca: -90 a 90
 (B) Base: 0 a 180
 (C) Codo: 0 a 110
 (G) Giro: 0 a 300

Anexo 12. Puente H

Diagrama del puente H a 5A

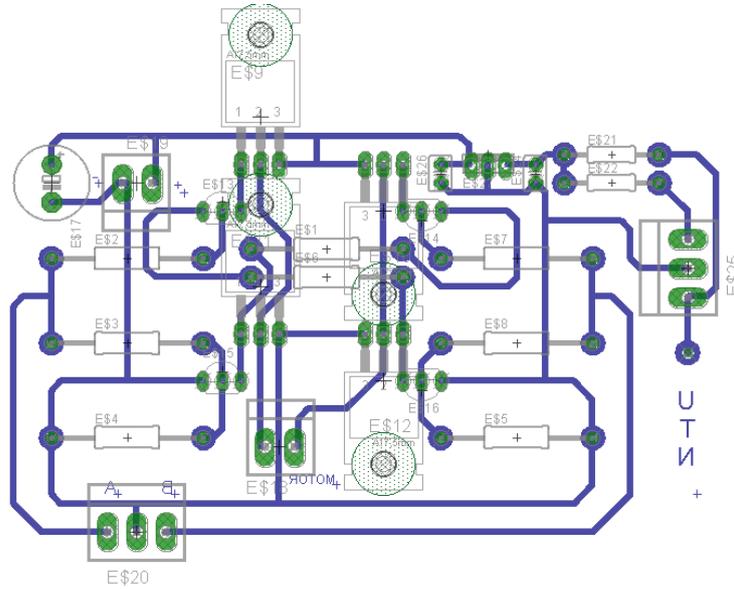
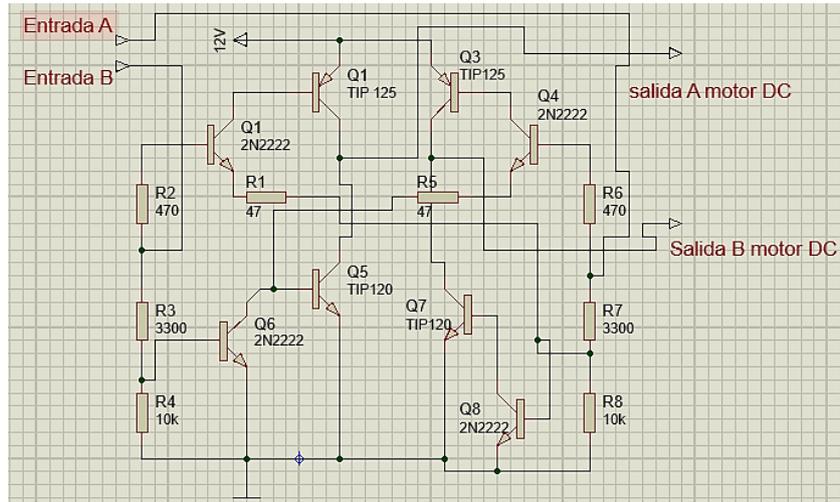
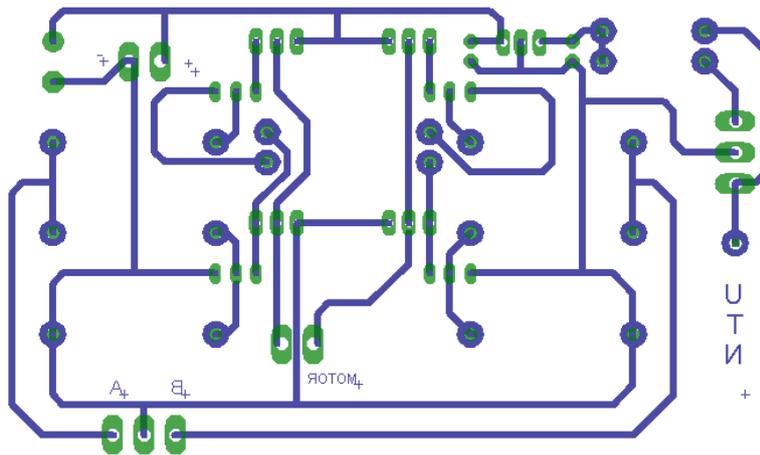
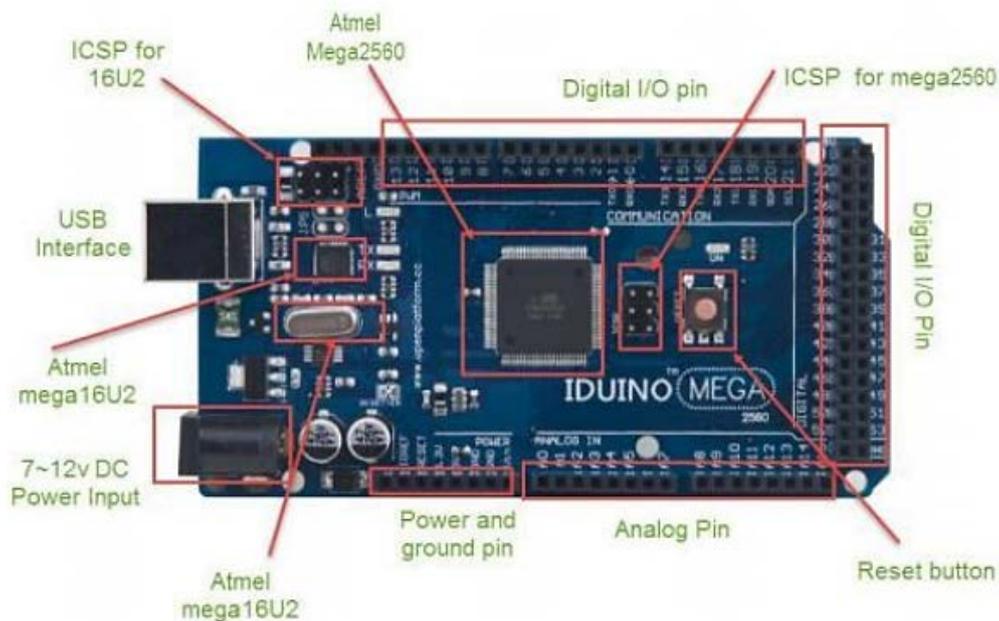


Diagrama listo para imprimir en baquelita.



Anexo 13. Arduino Mega 2560.



Description:

The Iduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560. It has 54 digital input/output pins (of which 15 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

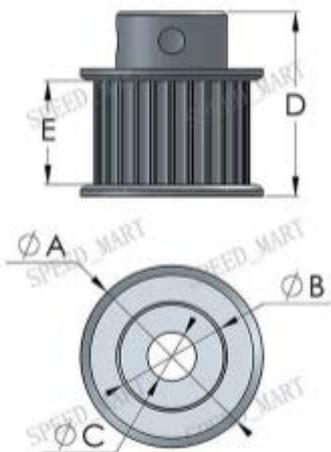
Specifications:

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

Fuente: <http://www.mantech.co.za>

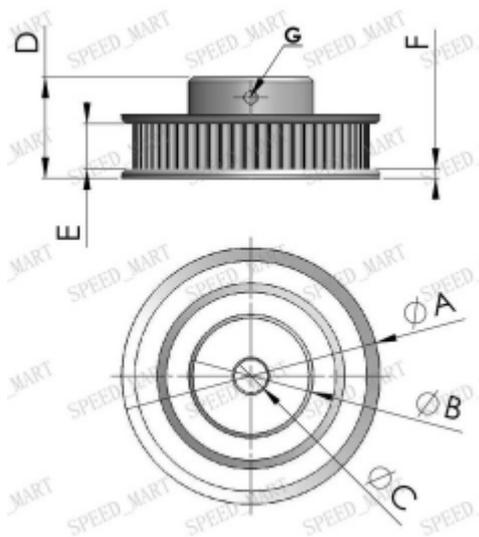
Anexo 14. Poleas dentadas

Polea 25 dientes



A=26mm
 B=15.5mm
 C=8mm
 D=23mm
 E=11mm
 G=M5

Polea 50 dientes



A=51mm
 B=36mm
 C=8mm
 D=25mm
 E=11mm
 G=M5

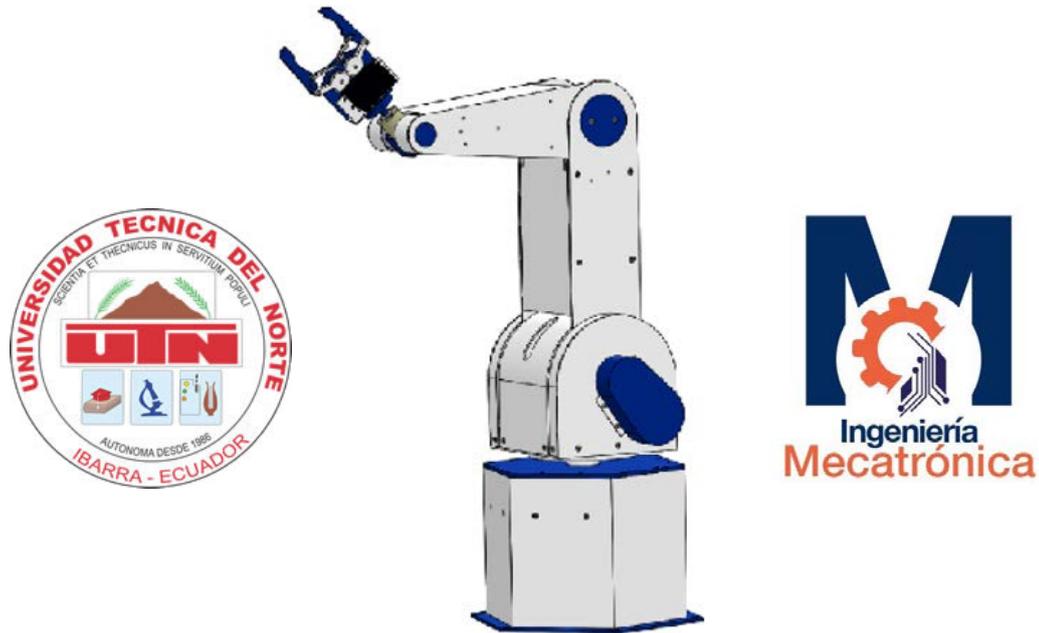
Fuente: Kohara Gear Industry Co.

Anexo 15. Manual de Usuario

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BRAZO ROBÓTICO

“UTN”

ELABORADO POR:

Luis Amanta

Carlos Endara

Danilo Bastidas

Andrés Proaño

Ibarra Julio 2017

1 INFORMACIÓN GENERAL

El brazo robótico UTN desarrollado en este proyecto, es un prototipo de laboratorio cuyo fin es permitir a los estudiantes la investigación sobre sistemas mecatrónicos, cadenas de producción industriales, cálculos cinemáticos mediante la programación. Todo esto a través de la operación del brazo.

2 FUNCIONAMIENTO

El brazo robótico UTN se conforma por las siguientes partes: base, hombro-brazo, codo-antebrazo-muñeca y el efector final o Gripper.

- ✓ La base es la que acoge a los sistemas de control como drivers y tarjetas electrónicas y actuadores, también proporciona el movimiento de giro derecha-izquierda sobre su eje de referencia comprendido entre 0 y 180° como mínimo.
- ✓ La articulación hombro-brazo proporciona el movimiento de arriba hacia abajo comprendiendo valores entre 0 y 90° medidos desde su posición horizontal.
- ✓ La articulación de codo-antebrazo-muñeca proporciona también un movimiento arriba-abajo, en la parte de codo y muñeca comprendidos entre 0 y -120° y 0 a 180° respectivamente. También provee a la muñeca de un giro de rotación de 360°.
- ✓ El efector final o Gripper será el encargado de proporcionar la sujeción de objetos de peso entre 0 y 1Kg mediante la acción de abrir y cerrar las pinzas.

3 PRECAUCIONES

- Para evitar el mal uso o la incorrecta operación del brazo robótico UTN habrá de seguirse los siguientes pasos.
- Antes de poner en marcha el brazo robótico, revisar conexiones eléctricas y asegúrese de que no existan obstáculos dentro de su área de trabajo.

- Usar una fuente de alimentación de 12V – 20A (min).
- El brazo robot UTN está diseñado para levantar una masa máxima de 1 Kg.
- Revisar que los conectores (DB 9 y DB25) estén sujetos correctamente.
- Verificar la conexión entre la tarjeta controladora del brazo robot y el computador (LabVIEW-Arduino) antes de energizar el robot.
- Examinar que la alimentación externa sea de 110V- AC.
- Examinar que la alimentación del servomotor del Gripper sea de 5 a 6 V
- Evitar trabajar con el brazo robot dentro de ambientes húmedos o riesgo de contacto eléctrico o agua.

4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

La siguiente tabla nos muestra las especificaciones técnicas del brazo robótico UTN.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BRAZO ROBÓTICO	
Detalle	Descripción
Capacidad de carga	1 Kg.
Fuente de alimentación	12VDC – 21A
Material	Aluminio ASTM A 1200
Peso del brazo robot	25 Kg.
Tablero de control	Gabinete metálico
Repetitividad	98%
Precisión	96%

5. MANTENIMIENTO CORRECTIVO

El mantenimiento del brazo robot debe ser realizado solo por personal con conocimientos básicos de electrónica y mecánica, que haya sido capacitado sobre el uso del mismo y conozca su funcionamiento. Para cualquier caso se debe seguir el manual de ensamblado.

La tabla que se muestra a continuación describe los problemas que pudieran presentarse durante la operación del Brazo robótico UTN.

POSIBLES PROBLEMAS Y SUS SOLUCIONES		
Problema	Posible causa	Solución
El brazo robot no enciende.	La fuente de energía esta desconectada.	Verificar que el cable de poder se encuentra conectado.
	El breaker está en modo apagado.	Subir la palanca del breaker a modo encendido.
	Los cables no transmiten señales. Desconexión.	Revise continuidad y reconecte los cables.
	Cables desconectados	Revisar puertos de conexión DB-25 y DB-9
	El paro de emergencia se encuentra presionado.	Desactivar el paro de emergencia girándolo.
El robot no ejecuta las órdenes.	Los conectores DB-9 y DB-25 están desconectados.	Conecte y asegure los conectores.
	El conector en el hombro esta desconectado.	Retire la tapa del hombro y revise la conexión.
	El robot no se comunica con el computador.	Revise que el puerto de comunicación escogido es el adecuado.(puerto COM)
	No llegó a la posición HOME al robot.	En la pantalla del programa de control del robot presione el botón HOME.
	No se detiene en la posición HOME	Revisar finales de carrera rotos o desconectados y asegurarlos.
	Ejecuta órdenes diferentes a las dadas.	Revisar programa de ejecución en software. Revisar que se haya detenido el anterior programa.

6. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

A más de los problemas que se puedan dar durante la operación del brazo robótico los cuales serán corregidos en el instante que se presente, se debe tener un plan de mantenimiento establecido, proporcionando un tiempo de uso para cada parte constitutiva y su mantenimiento respectivo.

La siguiente tabla muestra la frecuencia y el tipo de mantenimiento para el brazo.

MANTENIMIENTO BRAZO ROBOT UTN						
ESLABÓN	PIEZA	DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA			
			Diario	Semanal	Semestral	Anual
BASE	Rodamiento cónico	Revisión y engrasado				X
	Rodamiento radial	Revisión y engrasado				X
	Final de carrera	Revisión y ajuste		X		
	Estructura Externa	limpieza general y ajuste		X		
	Cableado interno	Revisión de drivers	X			
BRAZO	Piñón - Cadena	Revisión tensión y engrasado			X	
	Rodamientos	Revisión y engrasado				X
	Cableado interno	Revisión conexión sockets	X			
	Estructura externa	limpieza general y ajuste		X		
	Final de carrera	Revisión y ajuste		X		
ANTEBRAZO	Engranés	Engrasado			X	
	Banda dentada	Revisión desgaste			X	
	Disco Encoder	Revisión y ajuste			X	
	Final de carrera	Revisión y ajuste		X		
	Estructura externa	limpieza general y ajuste		X		
GRIPPER	Cableado	Revisión conexión	X			
	Engrane Servo	Revisión y ajuste	X			
	Sensor Flexiforce	Revisión conexión y censado	X			

	Estructura Externa	Limpieza y ajuste	X			
BRAZO COMPLETO						
BRAZO	Gabinete de Control	Revisión conexiones y limpieza.			X	
	Motores	Revisión funcionalidad			X	
	Estructura interna	Limpieza y ajuste				X
	Estructura externa	Limpieza y ajuste				X

Anexo 16. Planos