



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 DE LA BASE PARA

EL BRAZO ROBÓTICO “UTN”

AUTOR: AMANTA SÁNCHEZ LUIS ANGEL

DIRECTOR: ING. CARLOS VILLARREAL

Ibarra - Ecuador

Septiembre 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	100346929-1
Apellidos y Nombres	Luis Angel Amanta Sánchez
Email	laamantas@utn.edu.ec
Teléfono Fijo	022 138 184
Teléfono Móvil	0991932012
DATOS DE LA OBRA	
Título	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA BASE PARA EL BRAZO ROBÓTICO “UTN”
Autor	Luis Angel Amanta Sánchez
Fecha	Septiembre del 2017
Programa	Pregrado
Título por el que aspira	Ingeniero en Mecatrónica
Director	Ing. Carlos Villarreal.

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

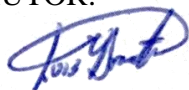
Yo, Luis Angel Amanta Sánchez, con cédula de identidad N° 100346929-1, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la universidad Técnica del Norte, la publicación 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 20 días del mes de Julio del 2017.

EL AUTOR:



Firma

Nombre: Luis Angel Amanta Sánchez.

C.I. 100346929-1



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, Luis Angel Amanta Sánchez, con cédula de identidad N°. 100346929-1, 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 DE LA BASE 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.

Firma

Nombre: Luis Angel Amanta Sánchez.

Cédula: 100346929-1

Ibarra, 20 de Julio del 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente Trabajo de Grado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA BASE PARA EL BRAZO ROBÓTICO UTN**”, fue desarrollado por el egresado Luis Angel Amanta Sánchez, bajo mi supervisión, lo cual certifico en honor a la verdad.

A handwritten signature in blue ink, reading "Carlos Villarreal D.", is written over a horizontal line.

Ing. Carlos Villarreal.

DIRECTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Yo, Luis Angel Amanta Sánchez, 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.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Luis Amanta', is written above a horizontal line.

Luis Angel Amanta Sánchez

C.I. 100346929-1



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres que han dado todo su esfuerzo y brindarme su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años para que ahora esté culminando esta etapa en mi vida de formación profesional y que gracias a ellos soy lo que soy.

A todos los profesores y demás personas que contribuyeron en mi formación profesional, gracias por todo su apoyo.

Un agradecimiento especial para el Ing. Carlos Villarreal por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros y a todas esas personas que estuvieron presentes en toda esta etapa de mi vida gracias por todos los buenos momentos que compartimos.

LUIS A.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de manera especial a mis padres, pilares fundamentales en mi vida. A mis hermanos y demás familiares que siempre han sabido brindarme su apoyo para seguir adelante en el cumplimiento de mis metas y sueños. A mis profesores quienes han contribuido en mi formación profesional y personal. Sin su ayuda y guía no habría podido cumplir con mi meta, gracias.

LUIS A.

RESUMEN

El proyecto de investigación tiene como objetivo el diseño y construcción de la base para el brazo robótico UTN, con la finalidad de contribuir a la enseñanza y comprensión de los alumnos en problemas de cálculo cinemático, dinámico, programación y control, a través de un modelo didáctico de un brazo robot.

La metodología utilizada consiste en la investigación de modelos de brazos robóticos que existen en la industria, su diseño morfológico, utilización y lugar de trabajo. Así, lograr un modelo propio.

El diseño de la base se realizó por medio de cálculos y simulaciones asistidas por computadora para comprobar fiabilidad y resistencia del mismo. Se realiza un análisis cinemático y dinámico para obtener los datos requeridos en la selección de los actuadores. Luego continuar con el diseño electrónico y de control.

Establecida toda la información se mecaniza y ensambla los elementos que conforman la base y sus accesorios. Se valida mediante pruebas de funcionamiento y se corrigen errores.

Como parte final del tema de investigación se realiza un ensamble completo de todas las partes del brazo robótico, comprobando su funcionalidad y el cumplimiento de los requerimientos del proyecto.

Logrando como resultado final un modelo definitivo para la base, que sea funcional y se acople a los demás elementos de brazo de manera fácil y correcta.

ABSTRACT

The research project has as objective the design and construction of the base for the UTN robotic arm, with the purpose of contributing to the teaching and understanding of students in kinematic, dynamic, programming and control calculation problems, through a model of a robot arm.

The methodology used consists of the investigation of robotic arm models that exist in the industry, its design, its use and its place of work. From there, get an own model.

The base's design carried out by calculations and computer simulations to check trustworthiness and resistance. A kinematic and dynamic analysis performed to get the data required in the motor's selection. To continue with the electronic and control design.

Established all the information, the elements that make up the base and its accessories machined and assembled. Validating it through functional tests and correcting errors.

As a final part of the research topic, a complete assembly of all parts of the robotic arm performed, verifying its functionality and the fulfillment of the project requirements.

CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD	III
CERTIFICACIÓN	V
DECLARACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	1
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
JUSTIFICACIÓN	4
ALCANCE.....	5
CAPITULO I	6
MARCO TEÓRICO	6
1.1 ANTECEDENTES	6
1.2 GENERALIDADES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES	7
1.2.1 INTRODUCCIÓN	7
1.2.2 DEFINICIÓN DE ROBOT INDUSTRIAL	7
1.2.3 DEFINICIÓN DE ROBOT MANIPULADOR	8

1.3 MORFOLOGÍA DE ROBOTS.....	8
1.4 TIPOS DE ARTICULACIONES	8
1.5 ESTRUCTURAS BÁSICAS	9
1.5.1 CONFIGURACIÓN CARTESIANA	10
1.5.2 CONFIGURACIÓN CILÍNDRICA.....	11
1.5.3 CONFIGURACIÓN ESFÉRICA O POLAR.....	11
1.5.4 CONFIGURACIÓN ANGULAR O ANTROPOMÓRFICO	12
1.5.5 CONFIGURACIÓN ESCARA O MIXTA	12
1.5.6 CONFIGURACIÓN PARALELO.....	13
1.6 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS	13
1.6.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA ASOCIACIÓN FRANCESA DE ROBÓTICA	13
1.6.2 CLASIFICACIÓN EN GENERACIONES	14
1.6.3 PARÁMETROS DE LOS ROBOTS MANIPULADORES	15
1.6.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CONFIGURACIONES MORFOLÓGICAS DE LOS ROBOTS.....	15
1.7 TIPOS DE ROBOTS INDUSTRIALES.....	16
1.8 APLICACIONES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES	17
1.8.1 APLICACIONES MÁS COMUNES DE LOS ROBOTS EN LA INDUSTRIA	¡Error! Marcador no definido.
1.9 DEFINICIÓN DE LA MORFOLOGÍA DEL BRAZO ROBÓTICO UTN	18
1.10 SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	20
1.10.1 TRANSMISIÓN POR BANDAS DENTADAS.....	20
1.10.2 TRANSMISIÓN POR CADENAS	22
1.10.3 TRANSMISIÓN POR ENGRANAJES.....	22
1.11 VENTAJAS Y DESVENTAJAS TIPOS DE TRANSMISIÓN.....	24

SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PARA LA BASE	26
1.12 MATERIALES	26
1.12.1 POLIAMIDA 6 (DURALÓN)	26
1.12.2 GRILÓN.....	27
1.12.3 NYLON	28
1.12.4 POLIETILENO, POLIPROPILENO, GRILON Y CELCON; Error! Marcador no definido.	
1.12.5 ALUMINIO.....	29
1.12.6 ACIDO POLIÁCIDO (PLA)	Error! Marcador no definido.
1.12.7 METALES	30
1.12.8 SELECCIÓN DEL MATERIAL	30
1.13 ACTUADORES.....	31
1.13.1 MOTORES DC	31
1.13.2 MOTORES PASO A PASO	32
1.13.3 SERVOMOTORES.....	32
1.13.4 SELECCIÓN DEL ACTUADOR A USAR PARA LA BASE	33
CAPITULO II.....	34
METODOLOGÍA.....	34
2.1 GENERALIDADES DEL DISEÑO.....	34
2.1.1 INVESTIGACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	34
2.1.2 DISEÑO DEL MODELO EN CAD	34
2.1.3 SELECCIÓN DE MATERIALES.....	35
2.1.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN	35
2.1.5 PROTOTIPADO.....	35
2.1.6 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y PROGRAMACIÓN	35

2.1.7 ENSAMBLAJE DEL MECANISMO	36
2.1.8 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	36
2.2 DESARROLLO DEL MARCO METODOLÓGICO	36
2.2.1 DISEÑO DE LA BASE	36
2.2.2 ACELERACIÓN ANGULAR REQUERIDA PARA REALIZAR EL GIRO DE LA BASE	38
2.3 ESPESOR DE LA PLANCHA A USAR PARA EL DISEÑO	41
2.4 DISEÑO DEL EJE DE TRANSMISIÓN DE LA BASE	46
2.4.1 DIAGRAMA DE CORTES Y MOMENTOS DEL EJE EN EL PLANO X –Y .	49
2.4.2 DIAGRAMA DE CORTES Y MOMENTOS DEL EJE DE TRANSMISIÓN EN EL PLANO X – Z	50
2.4.3 ESFUERZOS CORTANTES Y FLECTORES EN EL EJE EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO.....	51
2.4.4 ESFUERZOS CORTANTES POR TORSIÓN EN EL EJE	52
2.4.5 ESFUERZOS NORMALES POR FLEXIÓN EN EL EJE.....	52
2.4.6 TEORÍA DE ENERGÍA DE DISTORSIÓN	54
2.5 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS PARA EL EJE DE TRANSMISIÓN	55
2.5.1 CALCULO DE LA VIDA DEL RODAMIENTO.....	55
CARGA DEL RODAMIENTO	56
2.6 ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN LA BASE.....	58
2.6.1 CONDICIONES DE FRONTERA DE LA BASE	58
2.6.2 ANÁLISIS TENSIÓN DE VON MISES PARA LA BASE	59
2.7 CINEMÁTICA PARA EL BRAZO UTN	61
2.8 MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MEDIANTE ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB.....	63

2.8.1 CINEMÁTICA DIRECTA	64
2.8.2 CINEMÁTICA INVERSA	66
2.9 SIMULACIÓN DEL MODELO DINÁMICO DEL BRAZO ROBÓTICO MEDIANTE ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®.	67
2.13 DISEÑO DE CONTROL PARA LA BASE DEL BRAZO ROBÓTICO.....	71
2.13.2 CONTROL DE MOTOR A PASOS.....	72
2.14 PROGRAMACIÓN	77
2.15 MODELAMIENTO DEL SISTEMA.....	78
CAPITULO III	81
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	81
3.1 DISEÑO MECÁNICO	81
3.2 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA BASE.....	81
3.3 SISTEMA DE CONTROL PARA LA BASE.....	82
3.3.1 CINEMÁTICA.....	82
3.3.2 DINÁMICA	82
3.4 MANUFACTURA DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS	82
3.5 MONTAJE.....	84
3.6 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA EL ACTUADOR DE LA BASE.....	87
3.7 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	88
CAPITULO IV	91
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
4.1 CONCLUSIONES	91
4.2 RECOMENDACIONES.....	92

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS	96
ANEXO 1: ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN EL ELEMENTO PORTA BRAZO CON EL MATERIAL DURALÓN.	97
ANEXO 2 Barra de acero al carbono perforada para ejes.	99
ANEXO 3: Tabla de características del material.....	100
ANEXO 4: Características del Acero para ejes	101
ANEXO 5: Hoja de Datos Técnicos del Motor pasó a paso.....	102
ANEXO 6: Características Driver controlador de motor.....	103
ANEXO 7: Rodamiento cónico y sus especificaciones técnicas	106
ANEXO 8: Rodamiento de bolas Axial.....	107
ANEXO 9: NOMENCLATURA PARA ENGRANES RECTOS	108
ANEXO 10: Programación en matlab para el análisis cinemático y dinámico.	110
ANEXO 11: Diagramas de bloques en Simulink-Matlab para el análisis cinemático – dinámico.....	116
ANEXO 12: Interfaz gráfica de la programación general del brazo robótico UTN.....	117
.....	117
.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Configuraciones más usadas en los robots manipuladores.	10
Figura 1.2 Configuración cartesiana con su volumen de trabajo. Fuente:(Quizhpi, 2014)..	10
Figura 1.3 Configuración Cilíndrica y su volumen de trabajo. Fuente:(Quizhpi, 2014).....	11
Figura 1.4 Configuración esférica y volumen de trabajo. Fuente:(Quizhpi, 2014).....	11
Figura 1.5 Configuración Angular y su volumen de trabajo Fuente:(Quizhpi, 2014)	12
Figura 1.6 Configuración Robot Scara o Mixto y su volumen de trabajo	13
Figura 1.7 Configuración Robot paralelo y su volumen de trabajo.....	13
Figura 1.8 Aplicaciones de los robots en la industria.....	18
Figura 1.9 Transmisión por bandas dentadas planas	20
Figura 1.10 Tipos de bandas para Transmisión por bandas en V.....	21
Figura 1.11 Transmisión por cadenas.....	22
Figura 1.12 Transmisión por engranes	22
Figura 1.13 Engranajes rectos	23
Figura 1.14 Engranajes helicoidales.....	23
Figura 1.15 Engranajes cónicos.....	24
Figura 1.16 Engranajes de Tornillo sin fin o de Gusano	24
Figura 1.17 Configuración externa de un Motor DC	31
Figura 1.18 Configuración externa de un Motor de pasos	32
Figura 1.19 Configuración externa de un Servomotor	32
Figura 2.20 Fuerzas y momentos q actúan sobre la base.....	36
Figura 2.21 Boceto de las partes constitutivas de la base a diseñar	37
Figura 2.22 Trayectoria a seguir por la base	38

Figura 2.23 Cálculo de Momento de inercia para un cilindro solido	39
Figura 2.24 Dirección de la Fuerza ejercida sobre el elemento porta brazo	42
Figura 2.25 Simulación tensión de Von Mises en el elemento porta brazo	43
Figura 26 Simulación Desplazamientos en el elemento porta brazo	44
Figura 27 Simulación Factor de seguridad en el elemento porta brazo.....	44
Figura 2.28 Vista lateral del eje de transmisión	46
Figura 2.29 Diagrama del eje de transmisión a diseñar.....	47
Figura 2.30 Diagrama cuerpo libre para el eje de transmisión.....	47
Figura 2.31 Diagrama de cuerpo libre de fuerzas en los engranes	48
Figura 2.32 Diagrama de cortes y momentos del eje en el Plano X-Y.....	49
Figura 2.33 Diagrama de cortes y momentos del eje de transmisión en el Plano X-Z.....	50
Figura 2.34 Diagrama de Momentos Torsores	51
Figura 2.35 Condiciones de frontera de la base de brazo robótico.....	59
Figura 2.36 Análisis Esfuerzos de Von Mises en la base	60
Figura 2.37 Análisis de Desplazamientos en la base.....	60
Figura 2.38 Análisis Factor de seguridad en la base	61
Figura 2.39 marco de referencias y diagrama de bloques para el brazo robot UTN	62
Figura 2.40 Parámetros del robot en MATLAB.....	65
Figura 2.41 Simulación del Robot UTN entorno Matlab	66
Figura 2.42 Diagrama de bloques del modelo CAD del brazo robot.	68
Figura 2.43 Bloque de programación adicional para la programación en matlab	69
Figura 2.44 posición inicial del brazo robótico a) vista lateral b) vista superior	69
Figura 2.45 posición final del brazo a) vista lateral b) vista superior	70
Figura 46 Torque obtenido en la base mediante simulación en Matlab.	71

Figura 2.47 Diagrama de programación simplificado para la base del brazo robótico	72
Figura 2.48 bobinas motor bipolar	73
Figura 2.49 Micro Step driver St-4045-A1	76
Figura 2.50 Conexión Típica Step driver ST-4045-A1 fuente: hoja del fabricante	76
Figura 2.51 Diagrama de flujo control de la base del brazo robot	77
Figura 2.52 Diagrama de programación para la articulación de la base del brazo robótico en software de LabVIEW	78
Figura 2.53 Interfaz de programación general del brazo robótico en software de LabVIEW	78
Figura 2.54 Curva generada por la estimación de la Función de transferencia.....	80
Figura 3.55 Explosionado de los elementos de la base	85
Figura 3.56 Diagrama Circuito de control para el actuador de la base	88
Figura 3.57 Mediciones angulares en la base	90
Figura 3.58 Curva obtenida en la medición de posicionamiento angular de la base.....	90
Figura 59 Condiciones de frontera sobre el elemento porta brazo con material Duralón. ...	97
Figura 60 Análisis tensión de von mises con material Duralón	98
Figura 61 Análisis de desplazamiento con material Duralón	98
Figura 62 Factor de seguridad obtenido con material Duralón	99
Figura 63 Datos técnicos del engrane.....	109
Figura 64 Datos técnicos de piñón	109
Figura 65 Parámetros para el diseño de engranajes rectos	110
Figura 66Bloques de programación en Matlab para el análisis dinámico del brazo robótico	116
Figura 67 Pantalla principal de la interfaz gráfica de programación del brazo robótico UTN en LabVIEW	117

Figura 68 Pantalla de operación general del brazo robótico UTN en LabVIEW.....	118
Figura 69 Programación Completa del brazo robótico UTN	119
Figura 70 Programación completa simplificada del brazo robótico UTN.....	120
Figura 71 SubVI de la programación para la posición de inicio de la base	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Articulaciones y grados de libertad de los robots industriales.	9
Tabla 1.2	Clasificación de los robots según la AFRI	14
Tabla 1.3	Clasificación de los robots industriales en generaciones.	14
Tabla 1.4	Ventajas y desventajas de las configuraciones morfológicas de los robots industriales.....	15
Tabla 1.5	Robots industriales y sus aplicaciones	16
Tabla 1.6	Características del brazo robótico UTN.	19
Tabla 1.7	Rangos de movimientos de las articulaciones del brazo robot UTN.....	19
Tabla 1.8	Valoración de las configuraciones robóticas para la definición de la morfología del brazo robótico UTN.....	20
Tabla 1.9	Ventajas y desventajas sistemas de transmisión.....	25
Tabla 1.10	Características de duralón.....	27
Tabla 1.11	Propiedades del Grilon	28
Tabla 1.12	Propiedades del Nylon.....	29
Tabla 1.13	Propiedades de los plásticos Polietileno, Polipropileno, Grilon y Celcon.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 1.14	Propiedades del Aluminio 1200H14	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 1.15	Propiedades mecánicas y físicas del PLA	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 1.16.	Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A36	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 1.17	Propiedades de los materiales.....	31
Tabla 1.18	Ventajas y desventajas de los actuadores a utilizar	33
Tabla 2.19	Parámetros de diseño para el brazo robótico UTN.....	37
Tabla 2.20	Partes de la base a diseñar	38
Tabla 2.21	Resultados de simulación y cambios al diseño del elemento porta brazo.	43

Tabla 2.22 Resultados de la simulación para el factor de seguridad en diferentes elementos	45
Tabla 2.23 Valores de k_t y k_s	53
Tabla 2.24 Parámetros para rodamientos de rodillos cónicos y rodamientos de bolas	57
Tabla 2.25 Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo robótico UTN.....	63
Tabla 2.26. Parámetros Denavit-Hartenberg a utilizarse en Robotics Toolbox de MATLAB	64
Tabla 2.27 Secuencia para manejar motores bipolares.....	74
Tabla 2.28 Secuencia de pasos motores paso a paso unipolares	74
Tabla 2.29 Ángulos medidos motor pasos	79
Tabla 3.30 Procesos de fabricación de los elementos mecánicos de la base.....	82
Tabla 3.31 Montaje de los elementos mecánicos de la base	86
Tabla 3.32 Ángulos medidos de la base con carga y sin carga	88

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Ecuación de Torque en función de la Inercia	39
Ecuación 2.2 Ecuación para el cálculo de Inercia para un cilindro solido o disco.....	39
Ecuación 2.3. Velocidad angular MCU	40
Ecuación 2.4 Ecuación de Fuerza Cortante	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 2.5 Ecuación de Momento flector.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 2.6 Ecuación de esfuerzo cortante puro	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 2.7. Ecuación de fuerza tangencial en el engrane	48
Ecuación 2.8. Ecuación de fuerza radial en el engrane	48
Ecuación 2.9. Ecuación esfuerzo de torsión para una sección redonda hueca.	52
Ecuación 2.10 Ecuación esfuerzos cortantes por flexión	52
Ecuación 2.11 Esfuerzo de Von Mises.....	54
Ecuación 2.12 Vida esperada en millones de revoluciones en rodamientos	56
Ecuación 2.13 Ecuación para el Cálculo de la carga en rodamientos de bolas	56
Ecuación 2.14 Ecuación para el cálculo de la carga en rodamientos de cojinetes de rodillos	56
Ecuación 2.15 Ecuación para el cálculo de numero de pasos motor a pasos	75

ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

INTRODUCCIÓN

La evolución de la robótica durante las últimas décadas ha venido desarrollándose a pasos agigantados, cada vez con nuevos y más pequeños sistemas inteligentes. El tema es muy amplio y se divide en muchos campos de aplicación como son la industria, medicina, juguetes, robots de servicio, entre otros.

Para su desarrollo se debe contar en un principio de una plataforma física donde realizar y analizar los movimientos de un robot. Ahora con el avance de la tecnología se han creado software y plataformas virtuales, con todas las características necesarias para realizar un estudio de movimientos y resistencia similares a una prueba física;

Los sistemas inteligentes constituyen una herramienta que hace más precisa, rápida y fuerte las capacidades del ser humano.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La revolución industrial inició por la explotación de obreros a los cuales se 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 & Bravo, 2014).

La problemática que se pretende satisfacer, es la necesidad de generar diseños propios y 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 aprenden 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.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir la base 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 de la base para el brazo robótico “UTN”.
- Diseñar los componentes mecánicos y de la estructura de la base para el Brazo Robótico “UTN”
- Construir y ensamblar los elementos mecánicos de la base para el Brazo Robótico “UTN”
- Realizar el diseño del sistema de control de la base para el Brazo Robótico “UTN”.

JUSTIFICACIÓN

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

El diseño y construcción de un brazo robótico poli articulado versátil, 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, dónde aprenderán 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

El presente proyecto de investigación trata de la construcción de un brazo robot articulado, con fines didácticos para el aprendizaje de los estudiantes de la Universidad Técnica del Norte.

La construcción será realizada de forma que el usuario pueda asignar tareas y el manipulador las ejecute. La información o señales para realizar dicha tarea será gestionada a través de un computador y estará constituida por coordenadas iniciales, y coordenadas finales en las que se encuentra el objeto o pieza que se desea mover.

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

El diseño de la base para el brazo robótico permitirá un movimiento de rotación mínima de 180° y será capaz de proporcionar estabilidad a todo el sistema.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

A lo largo de la historia el hombre se ha sentido fascinado por máquinas y dispositivos capaces de imitar las funciones y movimientos de los seres vivos. Los griegos tenían una palabra específica para denominar a estas máquinas: *autómatos*. De esta palabra se deriva la palabra actual, *autómata*: máquina que imita los movimientos de un ser animado. (Antonio Barrientos, 1997)

La palabra **Robot** es de origen eslavo. En ruso *robot* significa trabajo. En checo significa trabajo forzado. El termino **robotics** (robótica) se debe a Isaac Asimov, el famoso escritor de ciencia ficción. (Iñigo Madrigal & Vidal Idiarte, 2002)

Como antecedente de estos sistemas automáticos se encuentran en gran número de dispositivos ingeniosos, dotados de elementos mecánicos que les permiten realizar movimientos similares a los humanos.

El nacimiento del robot se debe a la fusión de dos tecnologías: Los *tele-operadores* y el *Control Numérico*. Los *tele-operadores* fueron desarrollados en la segunda guerra mundial y su aplicación fue en el manejo de sustancias radioactivas sin riesgo para el operario. El *control numérico* fue desarrollado por los requerimientos de precisión en cierta maquinaria. (Ollier Caparroso, Avilés, & Hernández Bello, 1999)

Los primeros robots combinaban esencialmente los eslabones mecánicos de los tele operadores con la autonomía y programabilidad de las maquinas CNC.

En la primera mitad de los años setenta se crean también las primeras asociaciones nacionales de robótica, siendo las más importantes: la JIRA (Japan Industrial Robot Association), la RIA (Robot Institute of América), la AFRI (Association Francaise de Robotique Industrielle). (Ollier Caparroso et al., 1999)

1.2 GENERALIDADES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES

1.2.1 INTRODUCCIÓN

La búsqueda de la reducción de esfuerzos físicos del hombre al realizar tareas difíciles y en entornos de trabajo variados y peligrosos que pongan en riesgo su integridad, ha llevado a la creación de nuevas tecnologías y máquinas que ayuden en la realización de estas tareas de una forma rápida y precisa.

Con el proceso de investigación y estudio de la robótica, surge la necesidad de dotar al laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte con un brazo robot manipulador de 6 grados de libertad. Con la realización de este proyecto se desea programar los 6 GDL controlando cada una de las articulaciones del robot. A la misma vez este trabajo está enfocado en la construcción o manufactura haciendo uso de los materiales que estén disponibles en nuestro entorno.

1.2.2 DEFINICIÓN DE ROBOT INDUSTRIAL

Robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas. (Antonio Barrientos, 1997)

1.2.3 DEFINICIÓN DE ROBOT MANIPULADOR

Según la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) define a un robot *manipulador* como: “*mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.*”

1.3 MORFOLOGÍA DE ROBOTS

La morfología comprende la descripción de las características básicas de la estructura de los robots, incluyendo a manipuladores como móviles. La mayor parte de los robots industriales son esencialmente brazos articulados, según la RIA (Robot Institute of América) un robot industrial es un manipulador programable multifuncional. (Ollero Baturone, 2001)

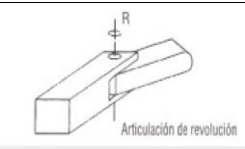
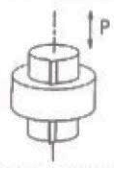
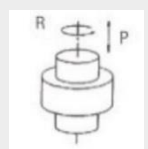
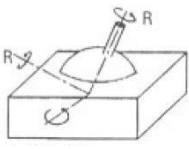
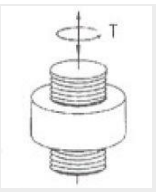
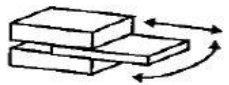
Un robot manipulador es una cadena cinemática abierta formada por un conjunto de eslabones o elementos de la cadena interrelacionados mediante articulaciones o pares cinemáticos, articulaciones que permiten el movimiento relativo entre los sucesivos eslabones.

1.4 TIPOS DE ARTICULACIONES

Cada movimiento que realiza cada articulación de manera independiente, se denomina grado de libertad (GDL), en la *Tabla 1.1* muestra las articulaciones y sus grados de libertad.

Tabla 1.1
Articulaciones y grados de libertad de los robots industriales.

Fuente: (Ollero Baturone, 2001)

Nombre	Esquema general	Características	Grados de libertad
REVOLUCIÓN		Permite el giro relativo entre dos eslabones.	1
PRISMÁTICA		Permite la traslación relativa entre dos eslabones.	1
CILÍNDRICA		Permite un giro y una traslación	2
ESFÉRICA		Permite la rotación en tres direcciones.	3
DE TORNILLO		Proporciona una rotación y una traslación que es función de la rotación.	1
PLANAR		Permite un giro y una traslación.	2

1.5 ESTRUCTURAS BÁSICAS

La estructura típica de un manipulador consiste en un brazo con elementos con articulaciones entre ellos. El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación.

Las configuraciones más usadas se muestran en la *Figura 1.1*.

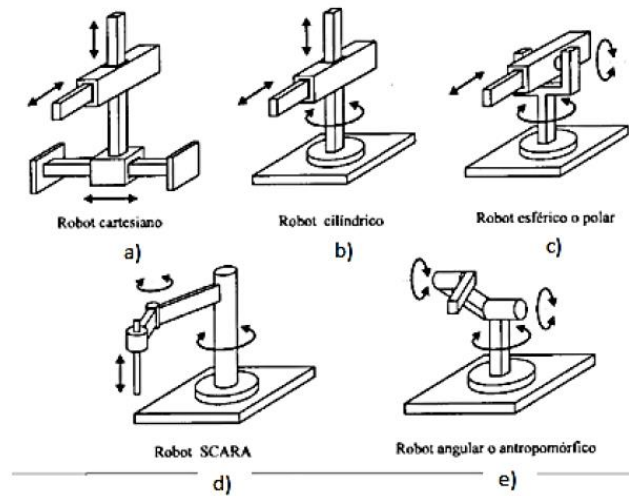


Figura 1.1 Configuraciones más usadas en los robots manipuladores.

a) robot cartesiano b) robot cilíndrico c) robot esférico o polar d) robot SCARA e) robot angular o antropomórfico

Fuente: (Antonio Barrientos, 1997)

1.5.1 CONFIGURACIÓN CARTESIANA

Esta configuración tiene 3 articulaciones prismáticas (PPP), y las variables de la articulación son las coordenadas cartesianas del efector final con respecto a la base como se observa en la *Figura 1.2*.

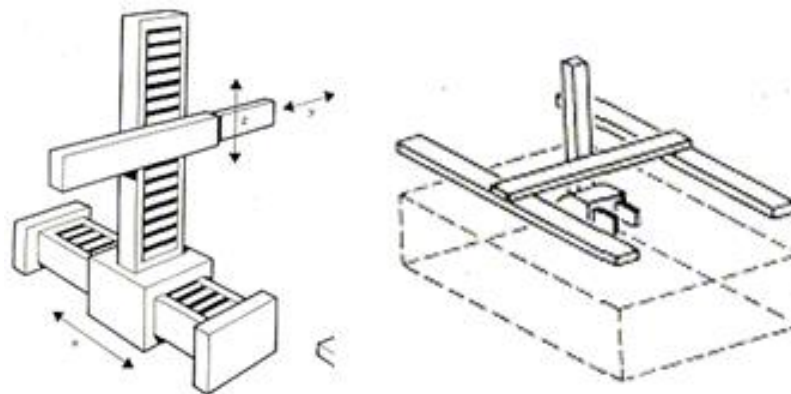


Figura 1.2 Configuración cartesiana con su volumen de trabajo.

Fuente: (Quizhpi, 2014)

1.5.2 CONFIGURACIÓN CILÍNDRICA

Cuenta con una articulación rotacional sobre la base y dos articulaciones lineales (3 grados de libertad). “Su eje rotacional hace que este robot presente una mejor maniobrabilidad y velocidad que el robot cartesiano.” Como se observa en la *Figura 1.3*.

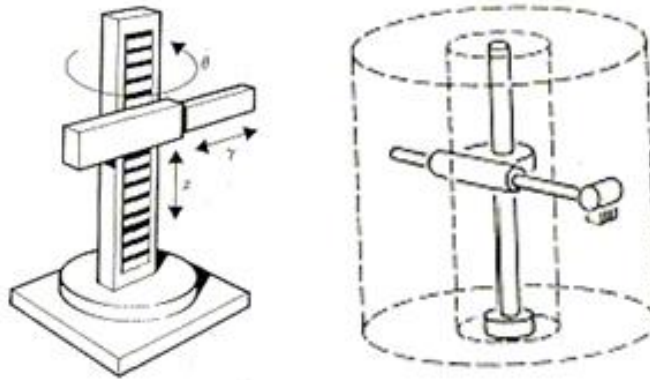


Figura 1.3 Configuración Cilíndrica y su volumen de trabajo.
Fuente:(Quizhpi, 2014)

1.5.3 CONFIGURACIÓN ESFÉRICA O POLAR

Cuenta con dos articulaciones rotacionales y una lineal (3 grados de libertad). Sus articulaciones le proporcionan la capacidad de trabajar en una zona esférica como se muestra en la *Figura 1.4*.

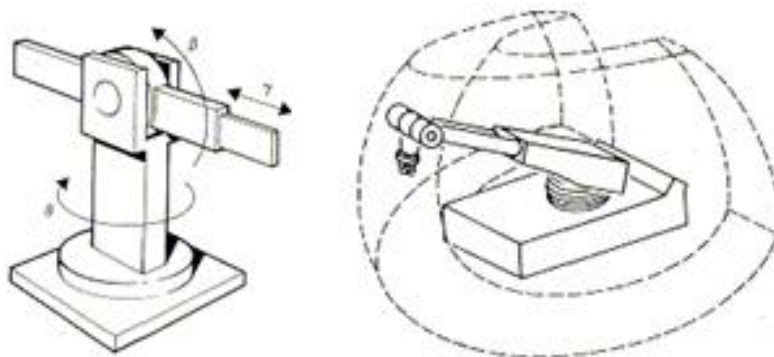


Figura 1.4 Configuración esférica y volumen de trabajo.
Fuente:(Quizhpi, 2014)

1.5.4 CONFIGURACIÓN ANGULAR O ANTROPOMÓRFICO

Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. El volumen de trabajo es irregular, el movimiento natural es de interpolación por articulación, rotacional y angular, como se muestra en la *Figura 1.5*.

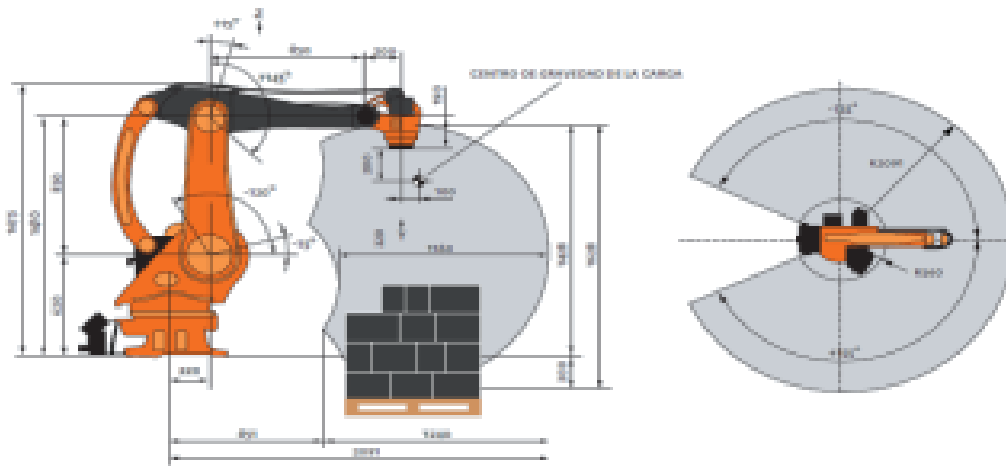


Figura 1.5 Configuración Angular y su volumen de trabajo
Fuente: (Quizhpi, 2014)

1.5.5 CONFIGURACIÓN ESCARA O MIXTA

El manipulador SCARA por sus siglas en inglés Robot Articulado Compatible Selectivo para Montaje (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) está diseñado para operaciones de ensamble. Aunque tiene una configuración esférica tanto en apariencia como en rango de operación.

Los ejes de las dos primeras articulaciones de revolución son verticales, haciendo que los eslabones se muevan en un plano horizontal mientras que el eslabón 3 se mueve según un eje vertical como se muestra en la *Figura 1.6*. (Ollier Caparroso et al., 1999)

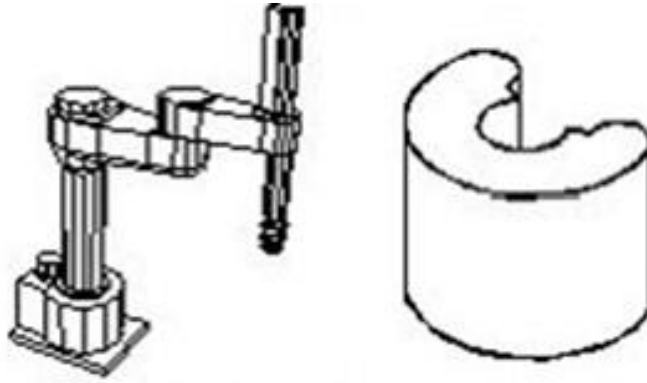


Figura 1.6 Configuración Robot Scara o Mixto y su volumen de trabajo
 Fuente:(Quizhpi, 2014)

1.5.6 CONFIGURACIÓN PARALELO

El robot paralelo posee brazos con articulaciones prismáticas o rotacionales concurrentes como se muestra en la *Figura 1.7*.

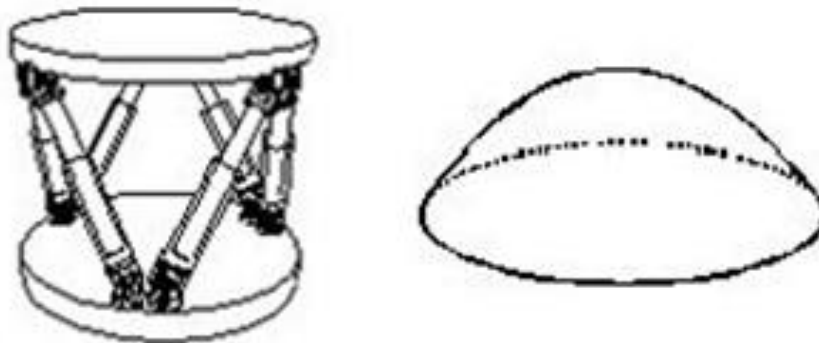


Figura 1.7 Configuración Robot paralelo y su volumen de trabajo.
 Fuente:(González Fdez, López Cruzado, & Cabero Esteban, 2015)

1.6 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS

1.6.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA ASOCIACIÓN FRANCESA DE ROBÓTICA

En la *Tabla 1.2* se aprecia la clasificación de los robots manipuladores según la AFRI.

Tabla 1.2
Clasificación de los robots según la AFRI

TIPO	CLASIFICACIÓN SEGÚN LA (AFRI)
TIPO A	Manipulador con control manual o telemando.
TIPO B	Manipulador automático con ciclos preajustados; regulación mediante finales de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
TIPO C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
TIPO D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

1.6.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES EN GENERACIONES

En la *Tabla 1.3* se muestra la clasificación de los robots industriales en generaciones.

Tabla 1.3
Clasificación de los robots industriales en generaciones.

TIPO	CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES EN GENERACIONES
1° Generación	<p>Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.</p> <p>Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia.</p>
2° Generación	Localiza, clasifica (visión) y detecta esfuerzos y adapta sus movimientos en consecuencia.
3° Generación	<p>Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural.</p> <p>Posee la capacidad para planificación automática de sus tareas.</p>

1.6.3 PARÁMETROS DE LOS ROBOTS MANIPULADORES

Los parámetros característicos que rigen un brazo robótico son:

- Grados de libertad
- Espacio de trabajo o accesibilidad
- Resolución
- Precisión
- Repetibilidad
- Capacidad de carga
- Velocidad y Aceleración

1.6.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CONFIGURACIONES

MORFOLÓGICAS DE LOS ROBOTS

La *Tabla 1.4* muestra las ventajas y desventajas que existen entre las diferentes configuraciones de los robots.

Tabla 1.4

Ventajas y desventajas de las configuraciones morfológicas de los robots industriales.




CONFIGURACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Cartesiana	Apto para trabajos en grandes espacios.	Permiten movimientos solo en trayectorias lineales.
Articulada	Movimientos en cualquier trayectoria incluso en lugares de difícil acceso.	Mientras más articulaciones tengan, mayor dificultad para lograr precisión.
Cilíndrica	Óptimo para trabajos dentro de un espacio redondo.	Elementos o tareas a realizar deber estar dentro del radio de trabajo circular.
Esférica	Permite movimientos en muchas direcciones.	Complejidad en su control.
Scara	Realiza movimientos horizontales amplios.	Tiene una limitante en el eje "Z".

1.7 TIPOS DE ROBOTS INDUSTRIALES

El sector industrial utiliza como herramienta clave a los robots que los ayudan a automatizar sus procesos y aumentar la productividad, competitividad, eficiencia y rentabilidad. (Reyes, 2011)

Entre las compañías más importantes que diseñan y construye robots industriales se encuentran; FANUC, ABB, KUKA, MOTOMAN, EPSON, cuentan con una gran diversidad de modelos de robots para aplicaciones industriales las cuales se muestran en la *Tabla 1.5*.

Tabla 1.5
Robots industriales y sus aplicaciones

EMPRESA	ROBOT	APLICACIONES
FANUC	CR-35iA 	Pintura Soldadura Paletizado
KUKA	KR-6 	Manipulación carga/descarga Soldadura Maquinas herramientas desbaste Paletizar Medición testado y control Manipular otras maquinas
ABB	IRB 140 	Soldadura de arco/punto Manipulación de materiales Plegado Pintura Ensamblaje Recolección, empaquetado, Paletizado Corte, desbastado, pulido de materiales

MOTOMAN	<p>ES165D-100</p> 	<p>Ensamblaje Colado/sellado Carga Manipulación Paletizado Plegado Arranque material Soldadura puntos</p>
EPSON	<p>S5 – S5L</p> 	<p>Ensamblaje de piezas pequeñas Dispensación de piezas a líneas de montaje automáticas Automatización de laboratorios Fabricación de equipos médicos Embalaje</p>

1.8 APLICACIONES DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES

El uso de robots manipuladores para movimientos repetitivos sencillos sigue siendo algo que las industrias buscan mejorar, especialmente las industrias automovilísticas las cuales utilizan los robots para usos como: pintura “spray”, manipulación de partes de la carrocería, chasis, motor. Y también en lo que se refiere a soldadura, actividades donde no se requiere de visión artificial. (Moreno, 2001) como se observa en la *Figura 1.8*.

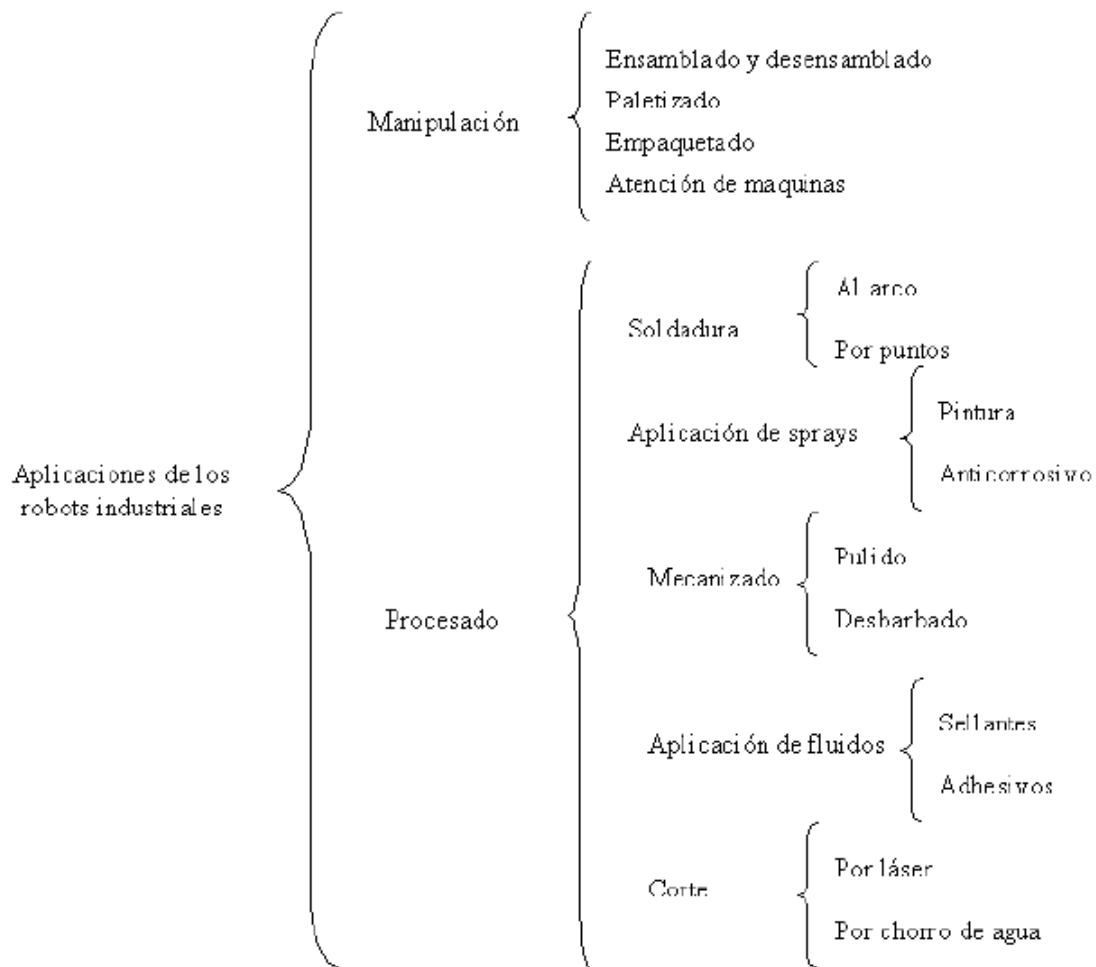


Figura 1.8 Aplicaciones de los robots en la industria

1.9 DEFINICIÓN DE LA MORFOLOGÍA PARA EL BRAZO ROBÓTICO UTN

La definición de la morfología de diseño para el brazo robótico UTN se realiza mediante la comparación de características y los rangos de movimientos que gobernarán al brazo. En la *Tabla 1.6* se muestran las características para el brazo robótico UTN.

Tabla 1.6
Características del brazo robótico UTN.

CARACTERÍSTICAS DEL BRAZO ROBÓTICO UTN	
DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA
Radio de operación	Entre 70 y 100 cm. Tomado desde su base
Grados de libertad	6 grados
Máxima carga en el efecto final	1 kg
Rango de movimientos	Ver tabla 6
Efecto final	Pinza (Gripper)
Retroalimentación	Encoder en cada actuador (opcional)
Actuadores	Motores Pasos – Motores DC
Transmisión	Por poleas, engranes, bandas, cadenas.

La *Tabla 1.7* muestra los rangos de movimientos para las articulaciones que conforman el brazo robótico UTN.

Tabla 1.7
Rangos de movimientos de las articulaciones del brazo robot UTN

ARTICULACIÓN	RANGO DE MOVIMIENTO
Base	Giro 0° a 180° mínimo
Hombro	Giro 0° a 110°
Codo	Giro 0° a -130°
Muñeca	Giro 0° a 180° Rotación 360°
Mano (pinza)	Abrir/cerrar

1.9.1 SELECCIÓN DE LA MORFOLOGÍA PARA EL BRAZO ROBÓTICO UTN.

En base a las *Tablas 1.4 a la 1.7* se realiza una nueva *Tabla 1.8* de valoración para las diferentes configuraciones y seleccionar la morfología para el brazo robótico UTN.

Tabla 1.8

Valoración de las configuraciones robóticas para la definición de la morfología del brazo robótico UTN

Configuración	° de libertad (6°)	Espacio de trabajo entre 100cm	Rango de movimientos según tabla 6	Fácil programación	Total
Cartesiana		X		X	10
Articulada	X	X	X	X	20
Cilíndrica		X		X	10
Esférica		X		X	10
Scara		X		X	10

El rango de valor dado para la selección es 5 puntos por cada X.

Se selecciona la **CONFIGURACIÓN MORFOLÓGICA ARTICULADA** para el desarrollo del proyecto basados en el puntaje mayor obtenido en la *Tabla 1.8*.

1.10 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Debido que los actuadores no generan el torque suficiente se ve la necesidad de incorporar una transmisión con la finalidad de generar un mayor torque y reducir la velocidad.

1.10.1 TRANSMISIÓN POR BANDAS DENTADAS



Figura 1.9 Transmisión por bandas dentadas planas

Fuente: (Mott, 2006)

Una banda es un elemento flexible de transmisión de potencia que asienta firmemente en un conjunto de poleas o poleas acanaladas como se muestra en la *Figura 1.9*. (Mott, 2006)

Los tipos de bandas que se tiene se observan en la *Figura 1.10*:

- Bandas planas.
- Bandas en V.
- Bandas en V de ángulo doble.
- Bandas acanaladas o dentadas.

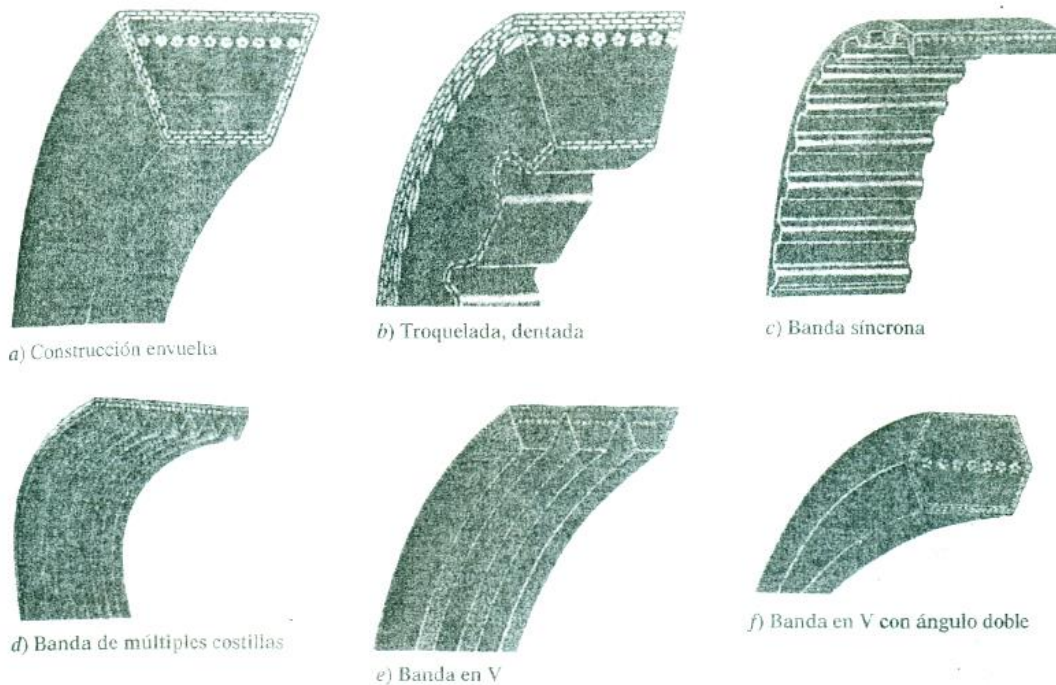


Figura 1.10 Tipos de bandas para Transmisión por bandas en V

a) Construcción envuelta b) Troquelada, dentada c) Banda síncrona d) Banda de múltiples costillas e) Banda en V f) Banda en V con ángulo doble

Fuente: (Mott, 2006)

1.10.2 TRANSMISIÓN POR CADENAS

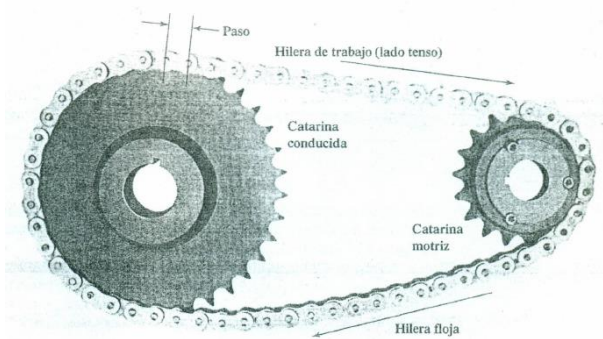


Figura 1.11 Transmisión por cadenas

Fuente: (Mott)

La cadena es un elemento de transmisión de potencia formada por una serie de eslabones unidos con pernos. Lo que le permite tener flexibilidad y transmitir grandes fuerzas de tensión. (Mott) como se observa en la *Figura 1.11*.

1.10.3 TRANSMISIÓN POR ENGRANAJES



Figura 1.12 Transmisión por engranes

Fuente: (Budynas & Nisbett)

Son ruedas dentadas que sirven para transmitir movimiento circular mediante el contacto entre ellas. Permiten una mayor capacidad en transmisión de potencia en forma constante a diferencia de las bandas. Como se ve en la *Figura 1.12*.

TIPOS DE ENGRANAJES

Engranajes rectos: Tienen dientes paralelos al eje de rotación y se emplean para transmitir movimiento de un eje a otro eje paralelo. (Budynas & Nisbett) como se observa en la *Figura 1.13*.

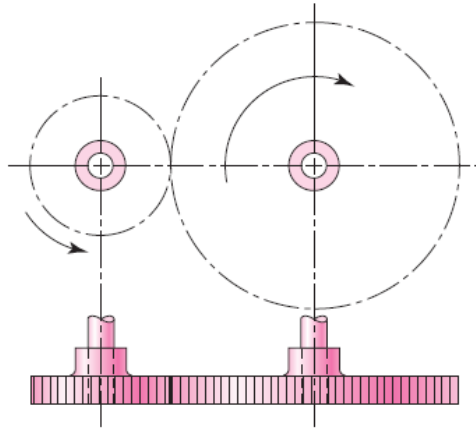


Figura 1.13 Engranajes rectos

Fuente: (Budynas & Nisbett)

Engranajes helicoidales: Poseen dientes inclinados con respecto al eje de rotación, el diente inclinado desarrolla cargas de empuje y pares de flexión que no están presentes en los engranajes rectos. Como se ve en la *Figura 1.14*.

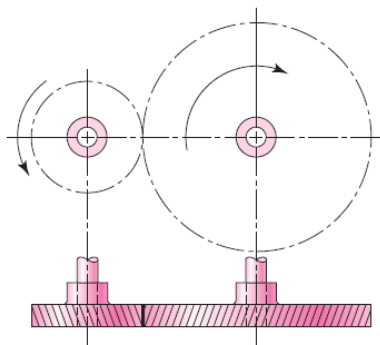


Figura 1.14 Engranajes helicoidales

Fuente: (Budynas & Nisbett)

Engranajes cónicos: presentan dientes formados en superficies cónicas, se emplean para transmitir movimiento entre ejes que se intersecan. Como se ve en la *Figura 1.15*.

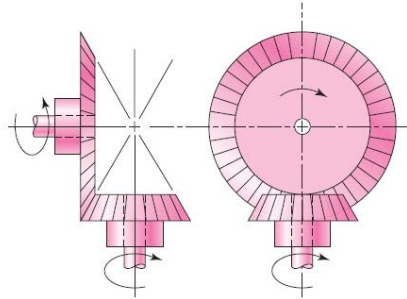


Figura 1.15 Engranajes cónicos

Fuente: (Budynas & Nisbett)

Engranajes de Tornillo sin fin o de Gusano: este tipo de engranajes se emplean cuando las relaciones de velocidad de los dos ejes son muy altas, de 3 o más. Ver *Figura 1.16*.

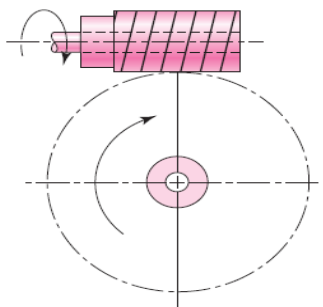


Figura 1.16 Engranajes de Tornillo sin fin o de Gusano

Fuente: (Budynas & Nisbett)

1.11 VENTAJAS Y DESVENTAJAS TIPOS DE TRANSMISIÓN

En la *Tabla 1.9* se presentan las ventajas y desventajas entre los diferentes sistemas de transmisión de potencia.

Tabla 1.9
Ventajas y desventajas sistemas de transmisión

TRANSMISIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Cadenas</p> 	<p>Brindan un alto par de trabajo No hay deslizamiento Alta eficiencia No requiere tensión inicial</p>	<p>Ruidosas Lubricación periódica Peso Vida útil menor al de engranes Más costosas que las correas</p>
<p>Bandas V</p> 	<p>Silenciosas Funcionamiento suave y sin choques Diseño sencillo Precio bajo</p>	<p>Dimensiones exteriores grandes Relación de transmisión baja debido al deslizamiento Perdidas de potencia por fricción Vida útil baja</p>
<p>Correas dentadas</p> 	<p>Silenciosas Funcionamiento suave y sin choques Diseño sencillo No hay deslizamiento</p>	<p>Dimensiones exteriores grandes Vida útil baja</p>
<p>Engranajes</p> 	<p>Pares altos No hay deslizamiento Obtención por catálogos de manera rápida y precisa.</p>	<p>Ruidosos Difícil de fabricar Deben ser ubicados con precisión</p>
<p>Tornillo sin fin</p> 	<p>Pares altos Capacidad de auto bloqueo Poca holgura</p>	<p>Desgaste por rozamiento mayor en relación a los demás tipos de transmisión.</p>

1.11.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PARA LA BASE

Tomando en cuenta la *Tabla 1.9* de ventajas y desventajas de los sistemas de transmisión y debido a que el espacio donde este ira ubicado es reducido, se selecciona como sistema de transmisión el conformado por engranajes rectos ya que estos no generan mayor ruido y aumentan el torque del actuador en gran medida de acuerdo a la relación de engranaje que se desee.

1.12 MATERIALES

Para la fabricación de los elementos que constituyen el brazo robótico UTN, es necesario conocer que tipos de materiales son idóneos de acuerdo a las características físicas y de composición del material seleccionado como: la resistencia a la ruptura, un peso bajo, durabilidad, maquinabilidad, entre otros.

Entre los materiales que cumplen con estas condiciones tenemos: aceros, hierros, aleaciones, aluminio y plásticos como: PVC, nylon, duralón, teflón, polipropileno, poliuretano, entre otros.

1.12.1 POLIAMIDA 6 (DURALÓN)

Es un termoplástico semicristalino que posee buena resistencia mecánica y al impacto; tiene buen comportamiento al deslizamiento. Es un teconopolímero (nylon de alto peso molecular) el cual se lo utiliza para la fabricación de un sin número partes y piezas.

Una de las ventajas del uso del duralón es que al tratarse de un tipo de plástico, es muy suave y liviano, cuando se le da un acabado lizo se consigue superficies con un rozamiento mínimo lo que ayuda a la hora de construir piezas en las que deben girar o deslizarse sobre otros elementos.(Barahona Quelal, 2011)

Las características mecánicas del duralón se detallan a continuación en la *Tabla 1.10*,

Tabla 1.10
Características de duralón

Características mecánicas	Método/Prueba (DIN /ASTM)	Valor	Unidad
Densidad	53479	1,14	g/cm ³
Elongación en punto de fluencia	53455	85	MPa
Resistencia al desgarre	53455		MPa
Resistencia a la rotura por alargamiento	53455	70	%
Módulo de elasticidad a la tracción	53457	3200	MPa
Módulo de elasticidad a la flexión	53457		MPa
Dureza Brinell (por penetración de bola)	53456	70/160	MPa
Resistencia al impacto	53453	no.Br.	KJ/m ²
Resistencia a la fluencia tras 1000 h. de carga estática			MPa
Resistencia al alargamiento, por 1%, tras 1000 hrs		5	MPa
Coefficiente de fricción contra acero endurecido y afilado p=0,05 N/mm ² , v=0,6 m/s		0,38- 0,45	-
Desgaste por fricción, en las mismas condiciones		0,23	m/km

Fuente: SANMETAL S.A. obtenido de:
<http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/nylon-poliamida-6/9>

1.12.2 GRILÓN

El Grilon es una poliamida obtenida por extrusión de color blanco, con muy buena resistencia mecánica, resistencia a la fatiga y al desgaste, propiedades mecánicas y dieléctricas, resistencia a los agentes químicos. Absorbe humedad, lo cual debe tenerse en

cuenta en el cálculo de los elementos mecánicos que requieran tolerancias (ejes, engranajes, etc.). En la *Tabla 1.11* se muestra las características mecánicas del material.

Tabla 1.11
Propiedades del Grilon

(GRILON) (HUMEDAD 2,5%)				PA - 6
				(H - 2.5%)
PROPIEDADES MECÁNICAS A	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
23°C				
Peso específico	gr/cm ³	D-792	53479	1.14
Resistencia. A la tracción. (fluencia / rotura)	Kg/cm ²	D-638	53455	450 / --
Res. a la compresión (1 y 2 % def)	Kg/cm ²	D-695	53454	150 / 280
Resistencia a la flexión	Kg/cm ²	D-790	53452	400
Res. al choque sin entalla	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	NO ROMPE
Alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	200
Módulo de elasticidad (tracción)	Kg/cm ²	D-638	53457	14000
Dureza	Shore D	D-2240	53505	72 - 76
Coeficiente. de roce estático s/acero		D-1894		0.31 a 0.54
Coeficiente. de roce dinámico s/acero		D-1894		0.27 a 0.43
Resistencia. al desgaste por roce				BUENA

Fuente: (J.Q., 2016) obtenido de
<http://www.jq.com.ar/Imágenes/Productos/Poliamida6/Poliam6/dtecnicos.htm>

1.12.3 NYLON

Es un material de muy buena resistencia y durabilidad al desgaste y a la fricción, es utilizado en la fabricación de engranajes, cremalleras, perfiles, excéntricos, piñones. En especial se recomienda para piezas mecánicas sujetas a desgaste, que trabajen durante un período de tiempo prolongado a temperaturas por encima de los 60° C. ("Plastigen Plásticos de Ingeniería," 2015). En la *Tabla 1.12* se precian las propiedades mecánicas del Nylon.

Tabla 1.12
Propiedades mecánicas del Nylon

PROPIEDAD	UNIDAD	NORMA	NYLON (PA6, PA66)
Alargamiento a la rotura	%	DIN 53455	>50
Conductividad Térmica	W/Km	DIN 52612	0,28
Coefficiente de dilatación Térmica de 20°C a 50°C	m/m K		85·10-6
Coefficiente de Fricción			0,3
Densidad	g/cm ²	DIN 53479	1,14
Dureza a la bola	N/mm ²	DIN 53456	136
Dureza "Shore"		DIN 53505	D75
Módulo de elasticidad	N/mm ²	DIN 53457	2.850
Punto de fusión	°C	ASTM D789	220
Resistencia Superficial		DIN 53482	5·1010
Resistencia al impacto	KJ/m ²	DIN 53453	3,8
Resistencia a la tracción	N/mm ²	DIN 53455	78
Temperatura máxima de utilización	°C	NORMAL	90
	°C	CON PUNTAS	150
Temperatura mínima de uso	°C		-40

Fuente: ("Plastigen Plásticos de Ingeniería," 2015) obtenido de:
<http://www.plasticbages.com/caracteristicasnylon.html>

1.12.4 ALUMINIO

Es un material menos resistente que el acero pero de bajo peso por lo cual es un material muy utilizado en la robótica. Las aleaciones del aluminio con otros elementos hacen que adquiera características mecánicas muy superiores.

“Las características sobresalientes del aluminio y sus aleaciones son su relación resistencia peso, su resistencia a la corrosión y su alta conductividad térmica y eléctrica. La densidad de este metal es de aproximadamente 2 770 kg/m³ (0.10 lbf/pulg³)” (Budynas & Nisbett). Las propiedades mecánicas del aluminio se muestran en la *Tabla 1.13*.

Tabla 1.13
Propiedades del Aluminio 1200H14

Aleación	Carga Rotura	Límite Elástico	Alargamiento	Dureza Brinell
Normas A-A	Rm - N / mm ²	Rp 0,2 - N / mm ²	A 5,65 %	HB
1200 - H14	125	115	20	37

1.12.5 ACERO ASTM A36.

Es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres para comunicación, edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, entre otros. Tiene una densidad de 7850 kg/m³ (0.28 lb/in³), tiene un límite de fluencia de 250MPa para aceros en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores a 8 pulgadas mientras que para espesores mayores se tiene un límite de fluencia de 220MPa.

Las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 se muestran en la *Tabla 1.14*.

Tabla 1.14
Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A36

Límite de fluencia mínimo		Resistencia a la tracción			
Mpa	Psi	Psi		Mpa	
		Min	Max	Min	Max
250	36000	58000	80000	400	550

Fuente: obtenido de: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>

1.12.6 SELECCIÓN DEL MATERIAL

Para la selección del material a utilizar en el proyecto se realiza una tabla comparativa donde se revisa la dureza, densidad, el precio y la maquinabilidad de los diferentes materiales seleccionados para el proyecto. *La Tabla 1.15* muestra la comparación de dureza, densidad, precio y maquinabilidad de los diferentes materiales posibles a usar.

Tabla 1.15
Propiedades de los materiales

Material	Dureza [HV]	Densidad [Kg/m³]	Precio[USD/Kg]	Maquinabilidad
Duralón	70 - 160	1140	1-10	5*
Acero ASTM A36	130-570	7600-8100	2-8.5	2-3*
Aluminio ASTM A1200	60-150	2500-2900	1-2	4-5*
Hierro	90-310	7050-7250	0.5-0.8	4*

Fuente:(Granta, 2005)

**siendo 1 lo más bajo y 5 lo más alto en calificación.*

Basado en la *Tabla 1.17* de propiedades de los materiales, se selecciona el aluminio ASTM A1200 para la fabricación de las diferentes partes mecánicas de la base ya que ofrece las mejores prestaciones. Ver *Anexo 2* propiedades del aluminio.

1.13 ACTUADORES

Los actuadores son dispositivos que generan movimiento a partir de una fuente de energía. Para el proyecto a desarrollar se ha tomado en cuenta los siguientes:

1.13.1 MOTORES DC



Figura 1.17 Configuración externa de un Motor DC

Un motor de corriente continua es un dispositivo mecánico que transforma la energía eléctrica en movimiento rotacional. La velocidad del motor (RPM) dependerá de la magnitud

del voltaje que se aplique. (STEREN) en la *Figura 1.17* se observa la configuración externa de un motor DC.

Unas de las principales desventajas son el poco torque que poseen y las elevadas velocidades de giro, aunque esto se soluciona añadiendo cajas reductoras, que permiten reducir la velocidad e incrementar el torque del motor.

1.13.2 MOTORES PASO A PASO

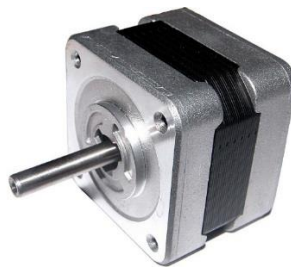


Figura 1.18 Configuración externa de un Motor de pasos

Los motores de pasos son dispositivos mecánicos que se mueven en pequeños pasos o incrementos que son controlados por pulsos de voltaje. Ofrecen un gran control y precisión en su movimiento rotacional. (STEREN) en la *Figura 1.18* se puede apreciar la configuración externa de un motor a pasos.

1.13.3 SERVOMOTORES



Figura 1.19 Configuración externa de un Servomotor

El servomotor es un dispositivo pequeño que tiene un eje, una caja de engranajes y un sensor de posición en su interior. Se controla tanto en rango como en posición mediante pulsos eléctricos. En la *figura 1.19* se observa la configuración externa de un servomotor.

1.13.4 SELECCIÓN DEL ACTUADOR A USAR PARA LA BASE

Se necesitará controlar el par-torque, la velocidad y la posición del brazo con una alta precisión, se debe utilizar un actuador que brinde las características necesarias. La *Tabla 1.18* muestra las ventajas y desventajas de diferentes actuadores a tomar en cuenta para seleccionar el adecuado para el desarrollo del proyecto.

Tabla 1.16
Ventajas y desventajas de los actuadores a utilizar

MOTOR	VENTAJA	DESVENTAJA
MOTOR DC	Altas velocidades Alta potencia Costo bajo	Control de velocidad con circuito externo No hay precisión
MOTOR PASO O PASO	Bajas velocidades Torque alto Consumo bajo de corriente Alta precisión	Baja potencia Necesita de una caja reductora Circuito externo de control (driver) Costo alto
SERVOMOTOR	gran precisión Alto par Consumo bajo	Alto costo Requieren drivers para servomotores industriales los cuales con costosos

De acuerdo a la *Tabla 1.18* de ventajas y desventajas de los actuadores y la ayuda de un software (Matlab) se selecciona un actuador que cumple con los requisitos necesarios para el proyecto. Se usará un motor de pasos con caja de engranajes reductora de relación 47:1, que proporciona un alto torque y bajas velocidades, ideal para lograr precisión en el posicionamiento.

CAPITULO II

METODOLOGÍA

2.1 GENERALIDADES DEL DISEÑO

2.1.1 INVESTIGACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para dar inicio el desarrollo de este proyecto, es necesario recopilar toda la información existente en papers, revistas especializadas, avances tecnológicos, libros entre otros acerca de robótica y brazos robóticos.

Se investiga acerca de los diferentes brazos robóticos industriales existentes, su funcionamiento, su morfología y sus aplicaciones para en base a eso realizar el diseño del brazo robótico UTN.

Se elabora el marco teórico con toda la información correctamente ordenada.

2.1.2 DISEÑO DEL MODELO EN CAD

Se realizó varios bocetos de como seria la constitución del brazo, como se moverá en sus articulaciones y se procedió a seleccionar la mejor opción de diseño de la base.

Se realiza los cálculos necesarios para determinar las fuerzas que actuaran en los diferentes componentes del brazo, conocer las longitudes de los mismos y así dimensionar la geometría de la base.

Se procede al ensamblado de las partes constitutivas de la base para su posterior análisis aplicando un software y el material específico para la simulación con cargas.

2.1.3 SELECCIÓN DE MATERIALES

El material será seleccionado de acuerdo a sus propiedades físicas, se realizará un análisis de elementos finitos para comprobar si soporta las diferentes cargas a la que estará sometida la base. El material también podrá ser seleccionado dependiendo de su facilidad de maquinado y su disponibilidad en el mercado local.

2.1.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Diseñado el modelo para el cuerpo de la base, los elementos que ayudarán en la transmisión de potencia se calculan y seleccionan a partir de catálogos existentes en el mercado, o a su vez si es necesario se los fabricará usando otro tipo de material que brinde las mismas características de resistencia y maquinabilidad (*Anexo 9*). Así mismo se seleccionará de catálogos de mercado los actuadores y rodamientos a utilizar.

2.1.5 PROTOTIPADO

El diseño de las placas, los ejes, engranes y demás elementos constitutivos se los realizará en las máquinas que posee la universidad, en el caso de no ser posible su utilización, se procederá a manufacturar las piezas fuera de la universidad por mayor facilidad.

2.1.6 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y PROGRAMACIÓN

Se selecciona el tipo de actuador necesario para realizar la acción, y el tipo de control pudiendo ser en lazo cerrado o lazo abierto dependiendo del actuador seleccionado.

Para la programación se selecciona el controlador óptimo para el actuador, y la tarjeta electrónica que llevará los códigos programados para los diferentes movimientos. Se realiza la placa en baquelita del sistema electrónico de ser necesario.

Se realiza la construcción del módulo de potencia que suministrara el voltaje y amperaje necesario para el actuador o a su vez, se seleccionara uno existente del mercado.

2.1.7 ENSAMBLAJE DEL MECANISMO

Posterior a terminada la construcción de todas las partes que constituyen el brazo robótico UTN, se realiza el ensamblaje mecánico y eléctrico.

2.1.8 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Se realiza las pruebas respectivas de funcionamiento y la corrección de errores.

2.2 DESARROLLO DEL MARCO METODOLÓGICO

2.2.1 DISEÑO DE LA BASE

PARÁMETROS DEL BRAZO PARA EL DISEÑO DE LA BASE

Al empezar a diseñar los componentes mecánicos es necesario el conocimiento de las fuerzas actuantes sobre el mismo. Con estos datos y aplicando fórmulas matemáticas se procederá al cálculo del torque requerido para la selección del actuador y el sistema de transmisión de la base del brazo.

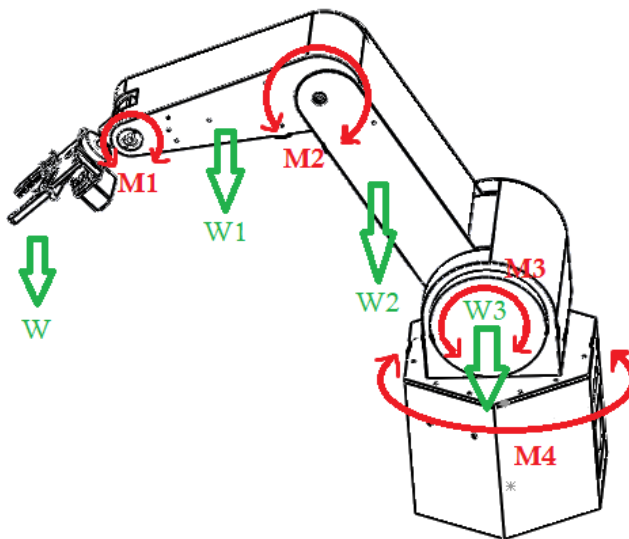


Figura 2.20 Fuerzas y momentos que actúan sobre la base

En la *Figura 2.20* se observa como la base está sometida tanto a fuerzas axiales y radiales, las cuales producen una fuerza de flexión y una de torsión debido al peso propio del brazo y la carga a levantarse.

La *tabla 2.17* muestra los parámetros a tomarse en cuenta para el diseño.

Tabla 2.17
Parámetros de diseño para el brazo robótico UTN

Descripción	Peso (kg)	Longitud (m)
Gripper	0.7	0.2
Antebrazo	3	0.3
Brazo	6	0.4
Peso a levantarse	1	
Total	10.7	0.9

BOCETO DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA BASE A DISEÑAR

Se genera un boceto de los elementos que constituyen la base como se muestra en la *Figura 2.21*.

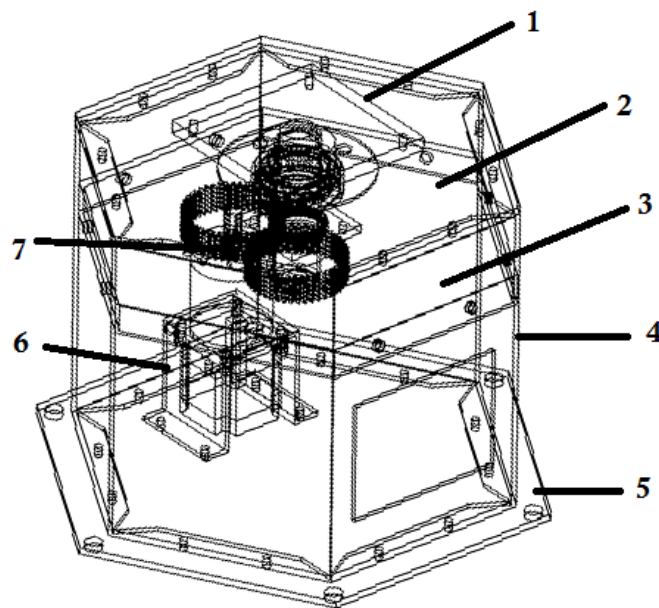


Figura 2.21 Boceto de las partes constitutivas de la base a diseñar

En la *Tabla 2.18* se detalla cada elemento mecánico para la base, diseñado en el boceto de la *Figura 2.21*.

Tabla 2.18
Partes de la base a diseñar

numero	Descripción
1	Soporte unión de brazo
2	Tapa superior
3	Pieza media
4	Cuerpo
5	Tapa inferior anclaje a tierra
6	Soporte sujetar motor
7	Engranajes (opcional)

2.2.2 ACELERACIÓN ANGULAR REQUERIDA PARA REALIZAR EL GIRO DE LA BASE

Se debe conocer el valor de la torsión o torque que se genera en la rotación con la carga. Valor que permite seleccionar el actuador para realizar el movimiento de rotación del brazo como se observa en la *Figura 2.22*.

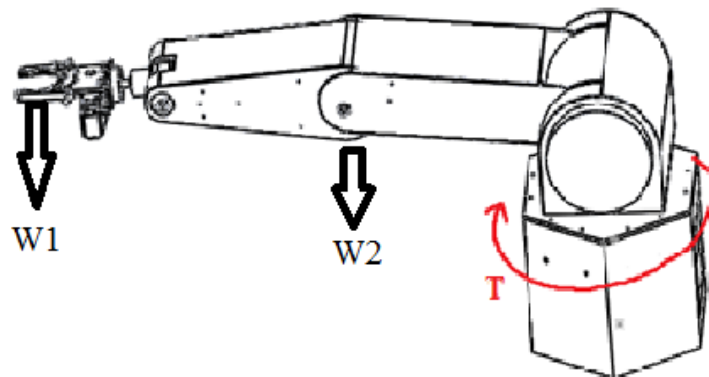


Figura 2.22 Trayectoria a seguir por la base

Para esto se usa la *Ecuación 2.1* del torque en función de la inercia y la aceleración angular de (Serway & Jewett, 2008).

Ecuación 2.1. Ecuación de Torque en función de la Inercia

$$T = I * \alpha$$

donde

T [Nm]: Es el torque necesario para mover el brazo levantando un peso de 1 Kg.

I [m²]: Momento de Inercia de la carga $W1$ más el peso propio del brazo $W2$.

α [rad/s²]: aceleración angular de rotación del brazo.

Para el cálculo de la inercia se usa la *Ecuación 2.2* de momento de inercia tomando al brazo como un objeto rígido, en este caso como un cilindro sólido o disco.(Serway & Jewett, 2008)

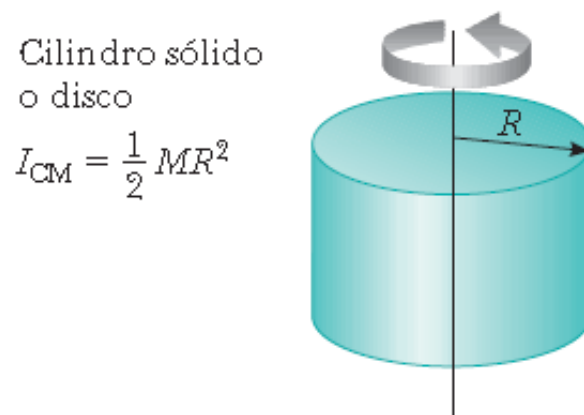


Figura 2.23 Cálculo de Momento de inercia para un cilindro sólido

Ecuación 2.2 Ecuación para el cálculo de Inercia para un cilindro sólido o disco

$$I_{BR} = \left(\frac{1}{2}\right) (M * R^2)$$

Donde:

I_{BR} [Kg*m²): Momento de inercia del brazo.

M [Kg]: Masa del brazo W2 más la masa a levantar W1. (10.7 Kg). Ver Figura 2.22.

R[m]: Longitud del brazo tomada como radio. (1m).

$$I_{BR} = \left(\frac{1}{2}\right)(10.7)Kg(1m)^2$$

$$I_{BR} = 5.35 Kg * m^2$$

Para el cálculo la aceleración angular se usa la *Ecuación 2.3* de movimiento circular uniforme (MCU) y los valores de diseño propuestos. (Vallejo A. & Zambrano O., 2009)

$\omega = 40$ RPM que equivale a 4.189 rad/s

Un tiempo $t=1$ s.

Ecuación 2.3. Velocidad angular Movimiento Curvilíneo Uniforme

$$\omega_{FB} = \omega_o + \alpha * t$$

donde:

ω_{FB} [rad/s]: Velocidad angular final del brazo.

ω_o [rad/s]: Velocidad angular inicial del brazo.

α [Rad/s²): aceleración angular.

t[s]: Tiempo. T=1s valor usado para el cálculo.

Se despeja la aceleración de la *Ecuación 2.3* de velocidad angular:

$$4.189 \frac{rad}{s} = 0 + \alpha * 1s$$

$$\alpha = \frac{4.189 \frac{rad}{s}}{1s}$$

$$\alpha = 4.189 \frac{rad}{s^2}$$

Se calcula el torque necesario con la *Ecuación 2.1*.

$$T_{BR} = (5.35Kg * m^2)(4.189 \frac{rad}{s^2})$$

$$T_{BR} = 22.41 Nm$$

Se multiplica por un factor de seguridad de 2, de acuerdo al Diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño. (Mott, 2006)

$$T_{BR} = 44.82 Nm$$

Con este valor se seleccionará el actuador adecuado para realizar el movimiento de giro para la base del brazo.

2.3 ESPESOR DE LA PLANCHA A USAR PARA EL DISEÑO

Para la construcción se seleccionó el material de aluminio ASTM A 1200 de acuerdo a la *Tabla 1.17* comparativa de materiales.

Porta Brazo: Este elemento se encuentra sometido a los siguientes estados de carga.

Fuerza que ejerce el peso del brazo en posición vertical: 10.7kg ~> 104.9N

Longitud de porta brazo: 133 mm diámetro

Momento en la muñeca: 3.19 Nm

Momento en el codo: 11.57 Nm

Momento en el hombro: 40 Nm

Sumatoria de momentos: 54.76 Nm \sim 55 Nm

En la *Figura 2.24* se muestran las fuerzas actuantes sobre el elemento.

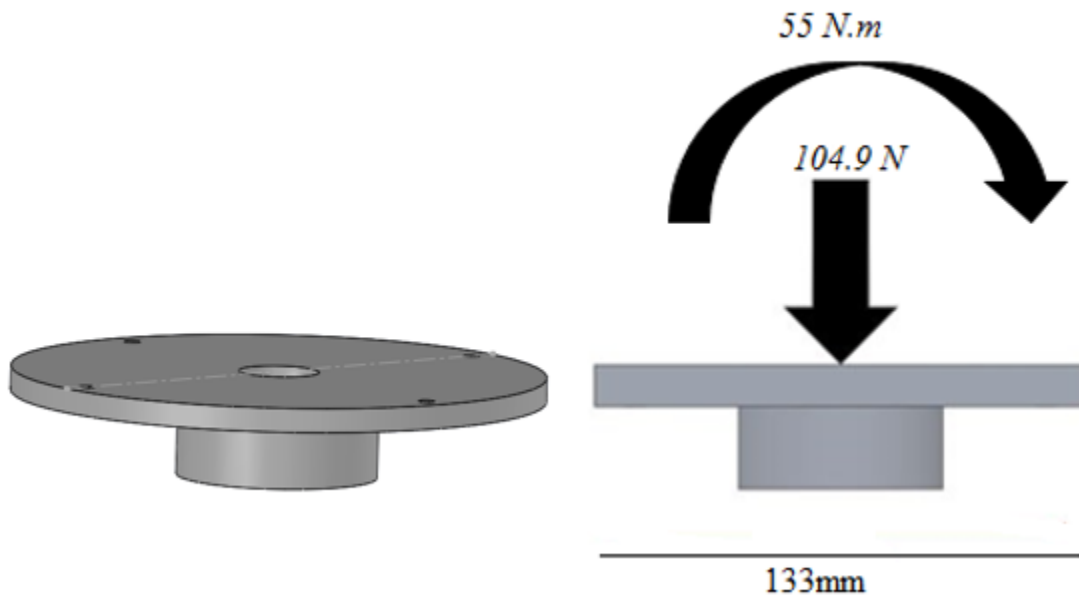


Figura 2.24 Dirección de la Fuerza ejercida sobre el elemento porta brazo

Se hace uso de un software CAD para realizar un análisis de esfuerzos y determinar el espesor necesario para que el elemento soporte dichas cargas, se hace la simulación considerando las restricciones pertinentes. Los resultados se resumen en la *Tabla 2.19*, donde se muestran los puntos críticos en cuanto a esfuerzos, desplazamiento y factor de seguridad.

Tabla 2.19

Resultados de simulación y cambios al diseño del elemento porta brazo.

Espesor (mm)	Esfuerzo máximo Von Mises (Mpa)	Desplazamiento máximo (mm)	Factor de seguridad mínimo	observaciones
10	24.752	0.02386	3.6	Para los dos resultados se observa que el fs es similar, se seleccionaría este grosor para el diseño final del elemento.
8	25.255	0,0343	3.6	
6	30.467	0.0645	3	Las condiciones ya son ideales, se aumenta el espesor un poco más para asegurar un fs más alto.
4	56.358	0.1784	1.6	<i>El fs aún es bajo, se aumenta a un espesor mayor.</i>
3	97.953	0.3925	0.92	Se obtiene un <i>fs</i> demasiado bajo y un esfuerzo por sobre el límite, por lo que se aumenta el espesor de diseño.

En la *Figura 2.25* se observa la simulación de tensión de Von Mises para el elemento porta brazo obtenido con un espesor de *10mm*.

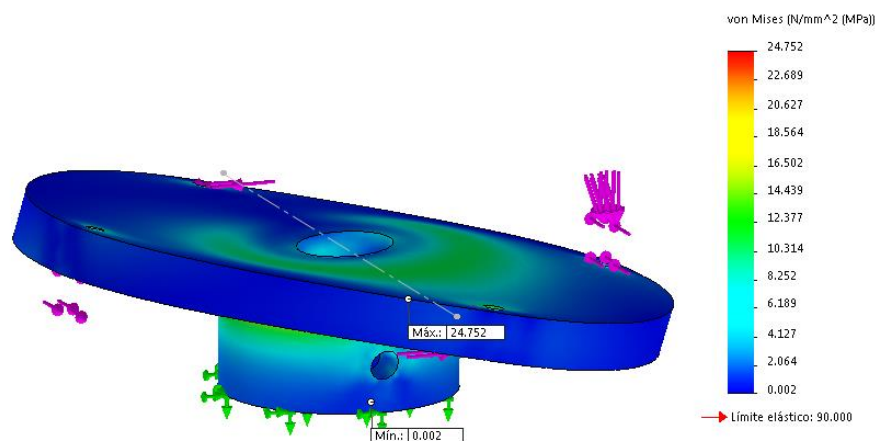


Figura 2.25 Simulación tensión de Von Mises en el elemento porta brazo

En la *Figura 2.26* se observa la simulación de desplazamientos para el elemento porta brazo. Para un espesor de *10mm*.

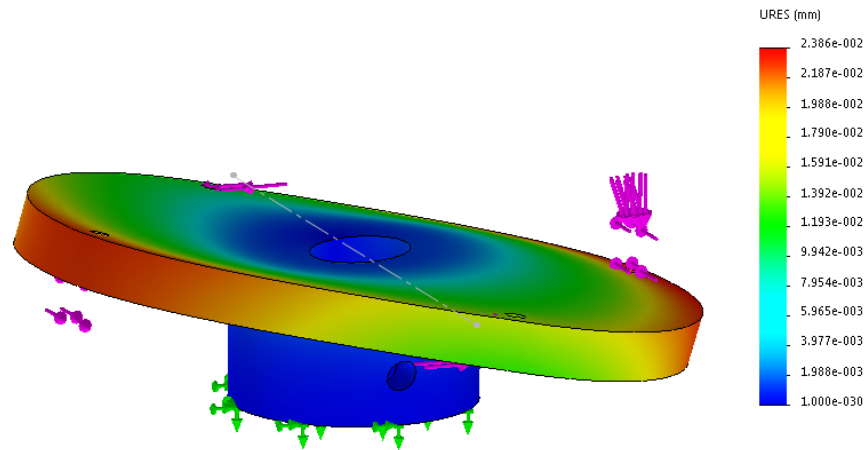


Figura 26 Simulación Desplazamientos en el elemento porta brazo

En la *Figura 2.27* se observa la simulación del factor de seguridad mínimo para el elemento porta brazo obtenido con un espesor de *10mm*.

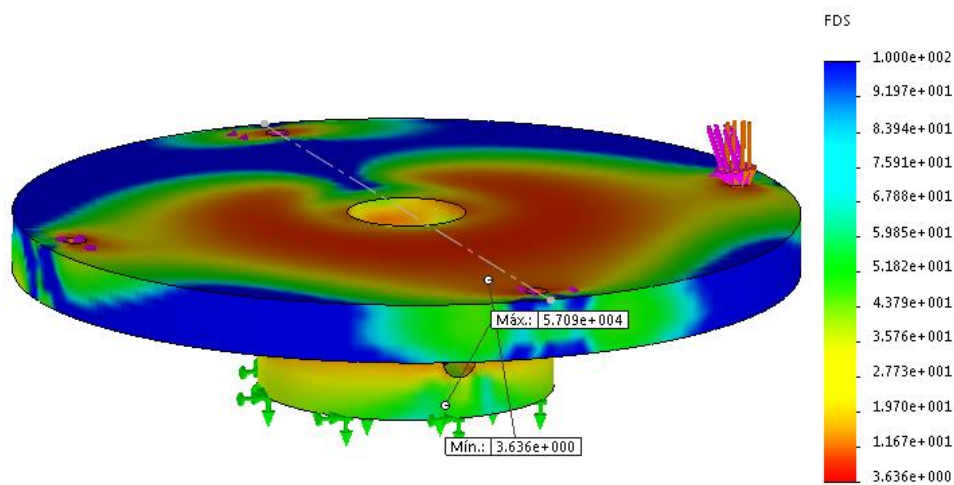


Figura 27 Simulación Factor de seguridad en el elemento porta brazo

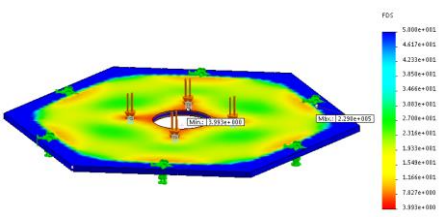
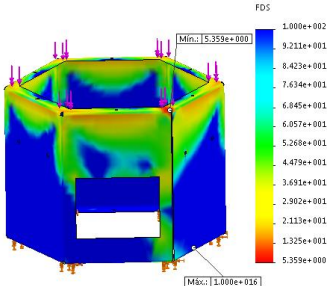
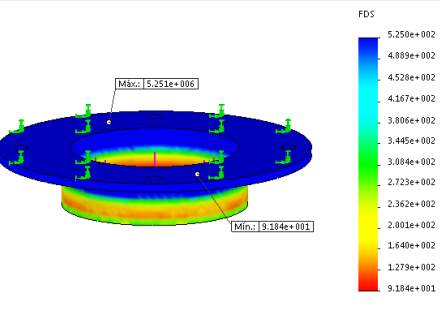
Por disponibilidad, también se realiza un análisis con el material Poliamida 6 (Duralón), dando como resultado un factor de seguridad de 4.2, en un espesor de plancha de

10mm, por lo que se decide usar este material para la manufactura del elemento analizado anteriormente. Los datos obtenidos mediante el análisis de elementos finitos con el material duralón se muestran en el *Anexo I*.

Se realiza también una tabla de valores para los elementos que se desea comprobar su resistencia y confiabilidad para el diseño. Se usa el material aluminio ASTM A1200 y Duralón. La *Tabla 2.20* muestra los resultados de simulaciones para cada elemento.

Tabla 2.20

Resultados de la simulación para el factor de seguridad en diferentes elementos

elemento	material	espesor	FS	observaciones
Tapa superior 	Aluminio	5mm	4	No muestra mayor deformación y da un fs confiable.
Base 	Aluminio	3mm	5.4	Con el espesor seleccionado para la plancha se asegura un fs alto q asegura su resistencia.
Porta rodamiento 	Duralón	3mm	92	El factor de seguridad es demasiado alto debido a que la altura del diseño es muy corta y no provoca mayores deformaciones en el material.

Para los demás elementos a diseñar se usa el valor de espesor de plancha de 3mm.

2.4 DISEÑO DEL EJE DE TRANSMISIÓN DE LA BASE

Las fuerzas que actúan sobre el eje de transmisión son el torque que ingresa por el engrane, el cual fue calculado anteriormente en la sección de cálculo de torque requerido $T = 45 \text{ Nm.}$, y el momento flector $M = 55 \text{ Nm.}$ (ver *Figura 2.28*)

La *Figura 2.28* muestra el diagrama para el eje de transmisión de la base.

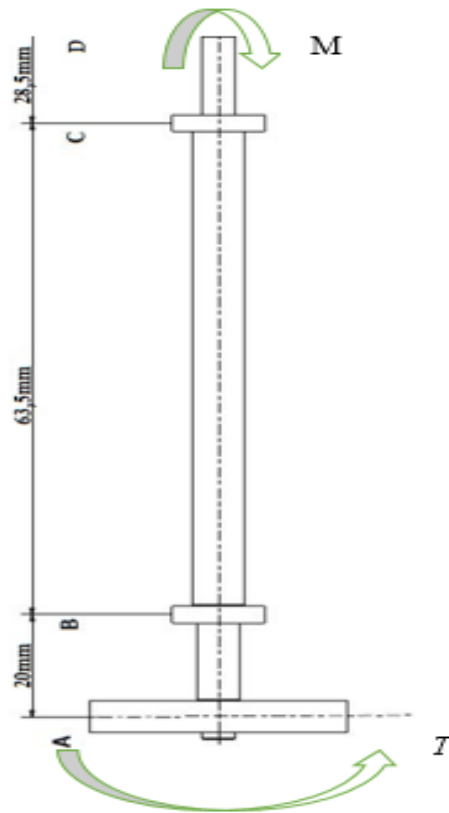


Figura 2.28 Vista lateral del eje de transmisión

La *Figura 2.29* muestra el diagrama de eje de transmisión.

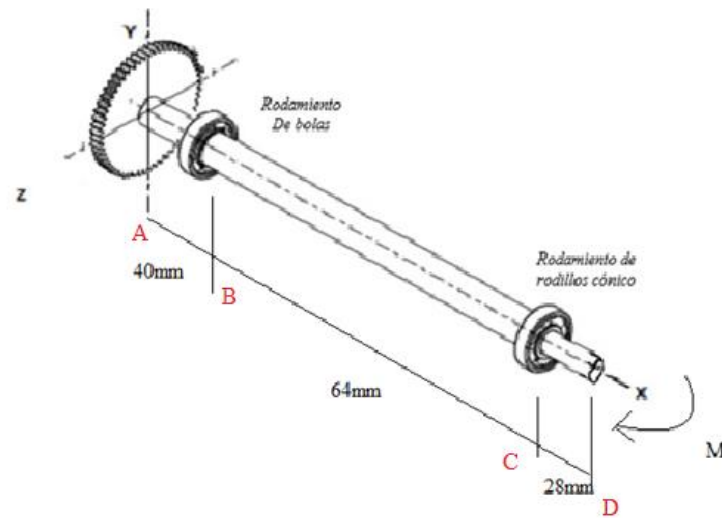


Figura 2.29 Diagrama del eje de transmisión a diseñar

La Figura 2.30 muestra el Diagrama de cuerpo libre para el eje de transmisión.

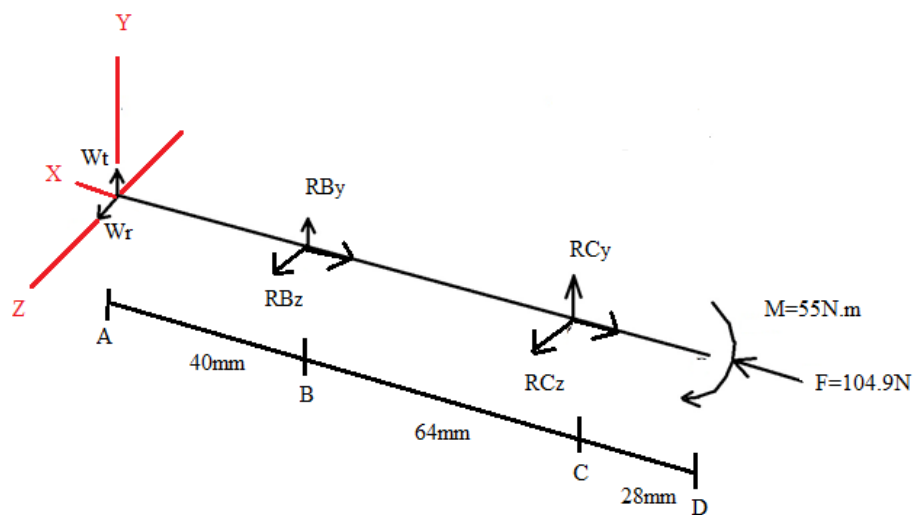


Figura 2.30 Diagrama cuerpo libre para el eje de transmisión

La Figura 2.31 muestra el diagrama de cuerpo libre para los engranes que actúan en el eje de transmisión

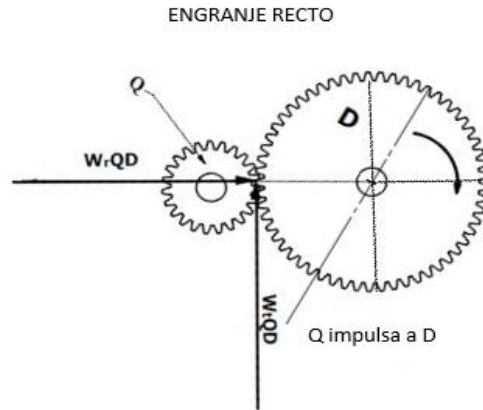


Figura 2.31 Diagrama de cuerpo libre de fuerzas en los engranes

$T_D = 45 \text{ Nm}$ momento torsor que sale por el engranaje en D. (ver Figura 2.31)

$\Phi = 20^\circ$ ángulo de presión del engrane.

$D_D = 63,5 \text{ mm}$ diámetro de paso del engrane D.

La Fuerza de reacción tangencial del engranaje Q sobre el engrane D producida por el momento torsor. (Ver Figura 2.31) se determina mediante la Ecuación 2.7.

Ecuación 2.4. Ecuación de fuerza tangencial en el engrane

$$W_{tQD} = \frac{T_D}{\frac{D_D}{2}}$$

$$W_{tQD} = 1417.32 \text{ N}$$

La Fuerza de reacción radial del piñón Q sobre el engrane D, que produce flexión. (Figura 2.31) viene dada por la Ecuación 2.8.

Ecuación 2.5. Ecuación de fuerza radial en el engrane

$$W_{rQD} = W_{tQD} * \tan(\Phi)$$

$$W_{rQD} = W_{tQD} * \tan(\phi) = 515.86 \text{ N}$$

En los puntos B – C irán los rodamientos.

En el punto A se sitúa el engrane conducido, genera dos reacciones W_r y W_t . (Figura 2.29)

En el punto D se sitúa la carga que ejerce el brazo $F=104.9\text{N}$ es una carga axial, también genera un momento $M = 55 \text{ Nm}$. (ver Figura 2.30)

2.4.1 DIAGRAMA DE CORTES Y MOMENTOS DEL EJE EN EL PLANO X –Y

Utilizando un software se realiza el cálculo de las reacciones, cortes y momentos para el eje de transmisión en el plano X-Y, como se muestra en la Figura 2.32.

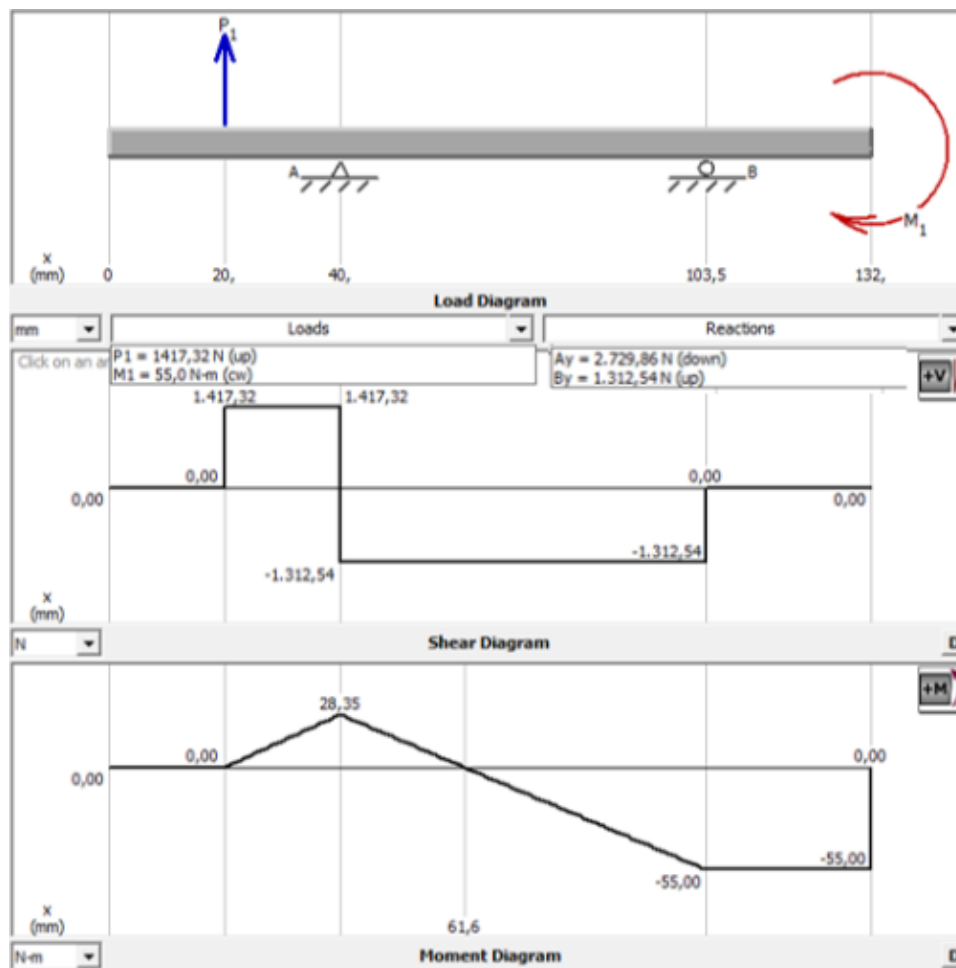


Figura 2.32 Diagrama de cortes y momentos del eje en el Plano X-Y

$$RA_y = 2572.38 \text{ N}$$

$$RB_y = 1312.54 \text{ N}$$

$$M_y = \begin{bmatrix} M_{Ay} \\ M_{By} \\ M_{Cy} \\ M_{Dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 28.346 \\ -55 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

En la *Figura 2.33* se muestra el diagrama de cortes y momentos del eje en el plano X-Z.

2.4.2 DIAGRAMA DE CORTES Y MOMENTOS DEL EJE DE TRANSMISIÓN EN EL PLANO X – Z

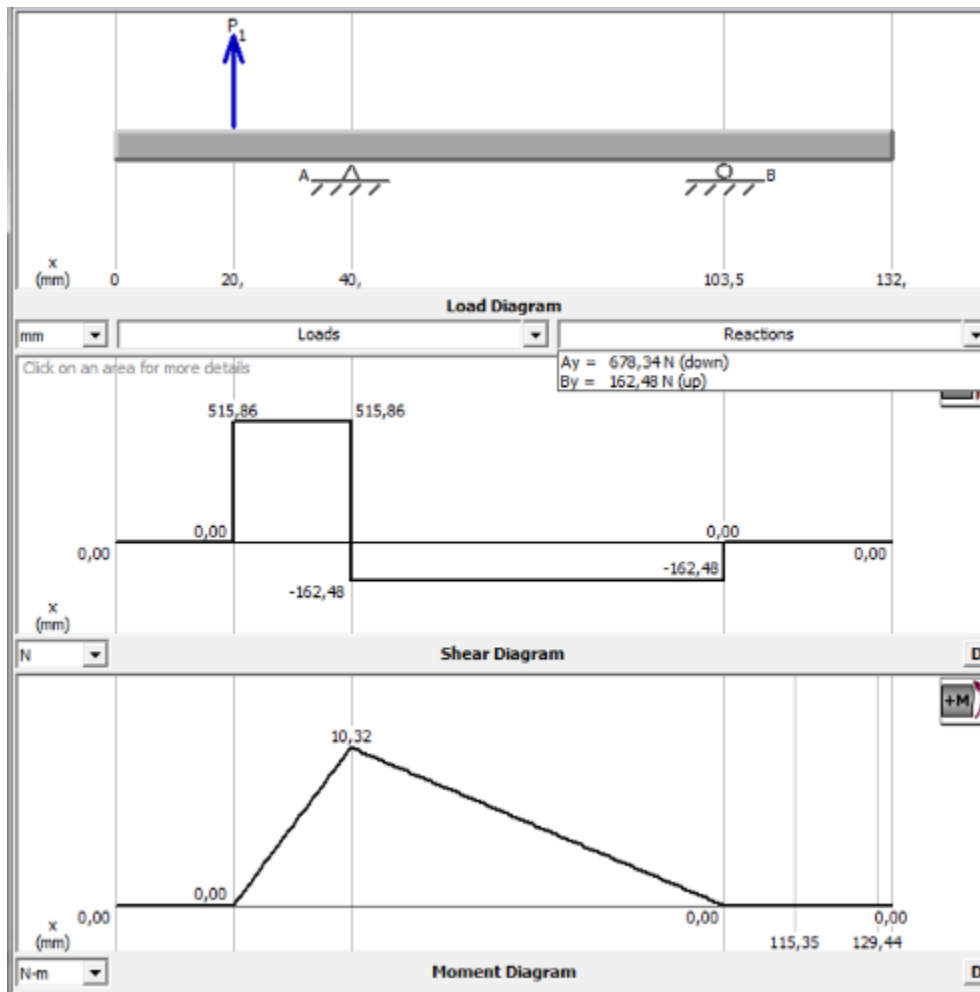


Figura 2.33 Diagrama de cortes y momentos del eje de transmisión en el Plano X-Z

$$RA_z = 678.34 \text{ N}$$

$$RB_z = 162.48 \text{ N}$$

$$M_z = \begin{bmatrix} M_{Az} \\ M_{Bz} \\ M_{Cz} \\ M_{Dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10.317 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

Cálculo del momento total

$$M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 30.166 \\ 55 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

2.4.3 ESFUERZOS CORTANTES Y FLECTORES EN EL EJE EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO

Se calcula los esfuerzos cortantes y flectores en función del diámetro para una sección hueca. Para esto se usa un diámetro externo $D=1m$ como constante dimensional para encontrar los esfuerzos máximos para cada ubicación del eje, y un diámetro interno deseado para el diseño $d = 0.025m$.

Como el torque que ingresa es el mismo torque que sale como se ve en la *Figura 2.34*.

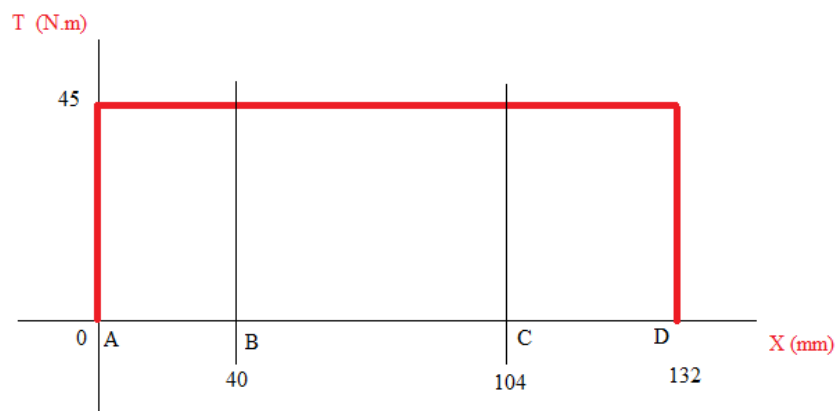


Figura 2.34 Diagrama de Momentos Torsores

$$\tau_B = \tau_C = \tau_D = \tau_A = 45 N.m$$

2.4.4 ESFUERZOS CORTANTES POR TORSIÓN EN EL EJE

Se calcula los esfuerzos cortantes por torsión máximos para las secciones A, B, C y D. que se muestran en la *Figura 2.30*.

La *Ecuación 2.9* para el cálculo de esfuerzo por torsión de una sección redonda hueca (Ma Zan Zapata) viene dada por:

Ecuación 2.6. Ecuación esfuerzo de torsión para una sección redonda hueca.

$$\tau_{torsion} = \frac{16 * T * D}{\pi * (D^4 - d^4)}$$

$$\tau_{torsion} = \begin{bmatrix} 229.183 \\ 229.183 \\ 229.183 \\ 229.183 \end{bmatrix} Pa$$

2.4.5 ESFUERZOS NORMALES POR FLEXIÓN EN EL EJE

Se calcula los esfuerzos normales por flexión máximos para las secciones A, B, C y D. Ver *Figura 2.30*.

La *Ecuación 2.10* para el cálculo de esfuerzo normal por flexión de una sección redonda hueca (Ma Zan Zapata) viene dada por:

Ecuación 2.7 Ecuación esfuerzos normales por flexión

$$\sigma_{flexion} = \frac{32 * M * D}{\pi * (D^4 - d^4)}$$

$$\sigma_{flexion} = \begin{bmatrix} 0 \\ 307.265 \\ 560.224 \\ 0.003 \end{bmatrix} Pa$$

El valor de concentración de esfuerzos para la flexión y torsión serán $Kt = 2.7$ y $Kts = 2.2$ respectivamente ya que se tiene filetes de hombro agudos, como se muestra en la *Tabla 2.21*, (Budynas & Nisbett)

Tabla 2.21
Valores de kt y kts

Punto	$kt_{flexión}$	$kt_{torsión}$
A	2.7	2.2
B	2.7	2.2
C	2.7	2.2
D	2.7	2.2

Fuente: (Budynas & Nisbett)

Con estos valores de concentraciones de esfuerzos, se calcula los esfuerzos reales para el eje en las ubicaciones A, B, C y D. (ver *Figura 2.30*)

$$\sigma_{flexion} = \frac{\sigma_{flexion}}{\sigma_{flexion} * kt_{flexion}}$$

$$\tau_{torsion} = \frac{\tau_{torsion}}{\tau_{torsion} * kt_{torsion}}$$

$$\sigma_{flexion} = \begin{bmatrix} 0 \\ 829.616 \\ 1512.605 \\ 0.007 \end{bmatrix} Pa$$

$$\tau_{torsion} = \begin{bmatrix} 504.203 \\ 504.203 \\ 504.203 \\ 504.203 \end{bmatrix} Pa$$

Al existir esfuerzos combinados en el eje, debe calcularse el esfuerzo de Von Mises.(Mott) mediante la *Ecuación 2.11* de esfuerzo de Von Mises.

Ecuación 2.8 Esfuerzo de Von Mises

$$\sigma_{vonmises} = \sqrt{\sigma_{flexion}^2 + 3 * \tau_{torsion}^2}$$

$$\sigma_{vonmises} = \begin{bmatrix} 1190.871 \\ 1943.829 \\ 3043.755 \\ 1190.871 \end{bmatrix} Pa$$

2.4.6 TEORÍA DE ENERGÍA DE DISTORSIÓN

Se aplica la teoría de falla para materiales dúctiles de Energía de distorsión (ED), asumiendo un $fs = 3$ por ser dinámico con incertidumbre en las cargas. Se usa un material para ejes Acero ASTM A500 con una resistencia a la fluencia de $Sy_{A500} = 230 \text{ MPa}$.

Con esto se obtiene un valor de diámetro preliminar, para la selección de rodamientos y de ser necesario realizar el ajuste requerido en base a los rodamientos.

$$\sigma_{vonmises} = \frac{Sy_{A500}}{fs}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{\sigma_{vonmises} * fs}{Sy_{A500}}}$$

$$d = \begin{bmatrix} 22.5 \\ 25.046 \\ 28.348 \\ 22.5 \end{bmatrix} mm$$

Los diámetros preliminares obtenidos mediante la teoría de falla del esfuerzo de Von Mises, son un diámetro máximo de 28.348 mm y un diámetro mínimo de 22.5 mm; se desea

hacer uso de un tubo de acero al carbono para el eje con diámetro exterior de 32mm y de diámetro interior de 25mm.

2.5 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS PARA EL EJE DE TRANSMISIÓN

Obtenidos los diámetros para las diferentes secciones (ver *Figura 2.28*) del eje de transmisión, se selecciona un rodamiento existente en el mercado. Se hace uso del catálogo de rodamientos SKF. (*Anexo 7*)

Como no existen rodamientos con los diámetros calculados, se realiza un ajuste de diámetro en base al rodamiento seleccionado, se asume como diámetro de eje el de $D = 30mm$ ya que se desea usar un eje hueco de diámetro externo de 32mm y 25mm de diámetro interno.

$$D_B = D_C = 30mm$$

Comparando en el catálogo de rodamientos SKF (*Anexo 7 – Anexo 8*) se observa que existen rodamientos con esas medidas y se procede a su selección.

Para el punto C (Ver *Figura 2.29*) que soporta cargas axiales y radiales se hace uso de un rodamiento de rodillos cónico. Para el punto B (ver *Figura 2.29*) que soporta cargas radiales se hace uso de un rodamiento de bolas.

2.5.1 CALCULO DE LA VIDA DEL RODAMIENTO

De acuerdo al catálogo general de rodamientos SKF (SKF, 2015) la vida útil de un rodamiento de una maquina la cual estará sometida a 8 horas de trabajo diario no siempre utilizadas, transmisión de engranes, motores eléctricos o de uso industrial, será de entre 10000 a 25000 horas. Funcionando 5 días a la semana por 5 años, viene dada por la *Ecuación 12* de Vida útil de un rodamiento en millones de revoluciones.

Revoluciones deseadas para el desarrollo del proyecto $n = 40rpm$.

Ecuación 2.9 Vida esperada en millones de revoluciones en rodamientos

$$L_{10} = 10000 * hr * 40 * \frac{rev}{min} * 60 * \frac{min}{hr} = 24000000 rev$$

$$L_{10} = 24 rev$$

CARGA DEL RODAMIENTO

La *Ecuación 2.13* y *Ecuación 2.14* para el cálculo de la carga en rodamientos de bolas y de rodillos cónicos. (NORTON, 2011) viene dada por:

Ecuación 2.10 Ecuación para el Cálculo de la carga en rodamientos de bolas

$$\text{Cojinetes de bolas} \quad L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

Ecuación 2.11 Ecuación para el cálculo de la carga en rodamientos de cojinetes de rodillos

$$\text{Cojinetes de rodillos} \quad L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$$

En este caso tenemos cargas radiales y cargas axiales como se ve en la *Figura 2.31*, por lo que los rodamientos ideales serán uno de rodillos cónicos y uno rígido de bolas.

$$R_A = \sqrt{RA_y^2 + RA_z^2} \quad R_A = 2.66 \text{ kN}$$

$$R_B = \sqrt{RB_y^2 + RB_z^2} \quad R_B = 1.323 \text{ kN}$$

Se despeja C de la *Ecuación 2.13* que equivale a la carga que soportara el rodamiento.

Para el rodamiento de bolas

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

$$C_A = \sqrt[3]{R_A^3 * 24}$$

$$C_A = 7.674 \text{ kN}$$

Para el rodamiento cónico

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

$$C_B := R_B \sqrt[10]{24^3}$$

$$C_B = R_B * \sqrt[10]{24^3}$$

$$C_B = 3.431 \text{ kN}$$

La Tabla 2.22 se elabora en base a los catálogos de rodamientos SKF y muestra los parámetros como diámetros interiores, exteriores, ancho de cara, la velocidad en rpm, la carga que soportan, entre otros de los rodamientos de bolas y de rodillos cónicos seleccionados.

Tabla 2.22

Parámetros para rodamientos de rodillos cónicos y rodamientos de bolas

Ubicación	d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	Velocidad (rpm)	Designación	d_a (min) (mm)	r_a (max) (mm)
B	30	55	13	12.7	30000	6006	34.6	1*
C	30	58	17	37.5	8500	320/32	50	1*

*Donde B y C son el rodamiento de bolas y el rodamiento cónico respectivamente, y d =diámetro interior, D =diámetro exterior, B =ancho de cara, C =capacidad de carga.

Del catálogo de rodamientos general SKF se selecciona los rodamientos que corresponden a los cálculos obtenidos.

Para el primer rodamiento en el unto C (ver *Figura 2.28*) se selecciona un rodamiento de rodillos cónico (*Anexo 7*) de diámetro externo ($D_e = 58\text{mm}$), diámetro interno ($d_i = 30\text{mm}$), ancho de cara ($T = 17\text{mm}$).

Para el segundo rodamiento (ver *Figura 2.28*), se selecciona un rodamiento rígido de bolas (*Anexo 8*), de diámetro externo ($D_e = 60\text{mm}$), diámetro interno ($d_i = 30\text{mm}$), ancho de cara ($T = 13\text{mm}$).

2.6 ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN LA BASE

Para la realización del análisis de esfuerzos por elementos finitos, primero se diseña la estructura en un software CAD y determinar si el modelo realizado es capaz de soportar las cargas asignadas.

2.6.1 CONDICIONES DE FRONTERA DE LA BASE

El análisis por elementos finitos se realiza con los datos obtenidos de las demás partes del brazo robótico UTN las cuales se conocen previamente. El modelo cuenta con una sujeción rígida en la parte inferior, la que indica que estará sujeto a un lugar firme en su base como se ve en la *Figura 2.35*. Las fuerzas actuantes sobre su parte superior son una fuerza debido al peso de brazo, la torsión generada por el movimiento de giro y un momento flector por la acción de palanca.

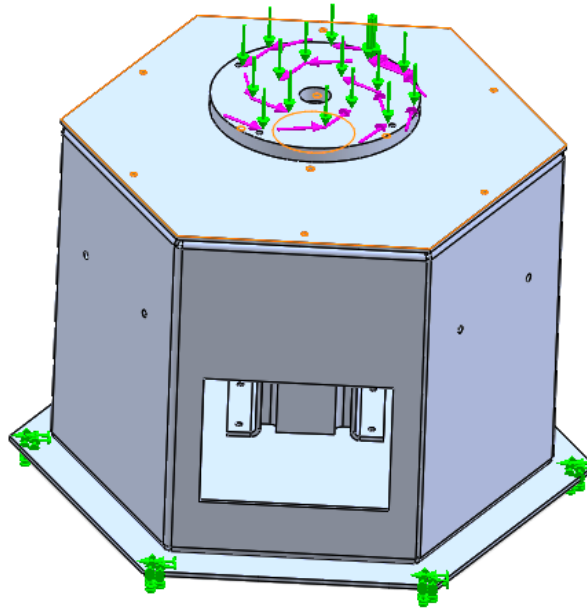


Figura 2.35 Condiciones de frontera de la base de brazo robótico

En la *Figura 2.35* se aprecian las fuerzas que actúan sobre el diseño de la base. La fuerza axial se denota de color verde y el momento torsor de color violeta, estas fuerzas actúan directamente sobre el elemento *porta brazo* la cual va acoplado con el hombro. Establecidas las fuerzas se procede con el análisis de elementos finitos del diseño, los resultados obtenidos serán los de esfuerzo máximo, factor de seguridad y desplazamiento.

2.6.2 ANÁLISIS TENSIÓN DE VON MISES PARA LA BASE

Se realiza la simulación de las cargas sobre la base mediante el software CAD para determinar los esfuerzos combinados utilizando la teoría de falla de von mises la más precisa para materiales dúctiles. Realizado el análisis se verifica que los esfuerzos generados en el modelo, sean inferiores al límite de fluencia del material seleccionado para validar los resultados.

En la *Figura 2.36* se observa la distribución del esfuerzo en el modelo diseñado, donde el mayor esfuerzo es de 60.8 Mpa.

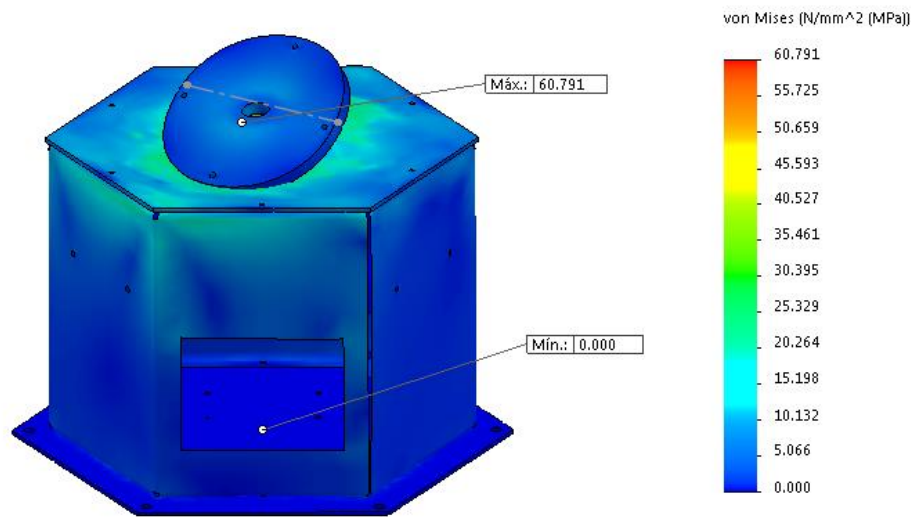


Figura 2.36 Análisis Esfuerzos de Von Mises en la base

En la Figura 2.37 se observa el desplazamiento que se ejerce en el modelo, siendo un desplazamiento mínimo que no afectaría el funcionamiento del diseño.

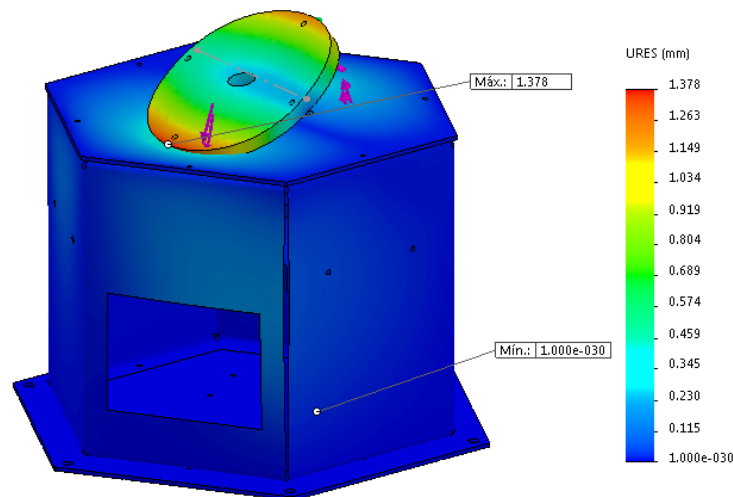


Figura 2.37 Análisis de Desplazamientos en la base

En la Figura 2.38 se muestra el factor de seguridad mínimo requerido para que el diseño no falle, este se encuentra en la perforación de los pernos de sujeción entre la *tapa*

superior y el elemento *porta rodamiento 1*. Es de 1.7 lo que muestra que el diseño esta sobre el límite permitido para evitar su fallo.

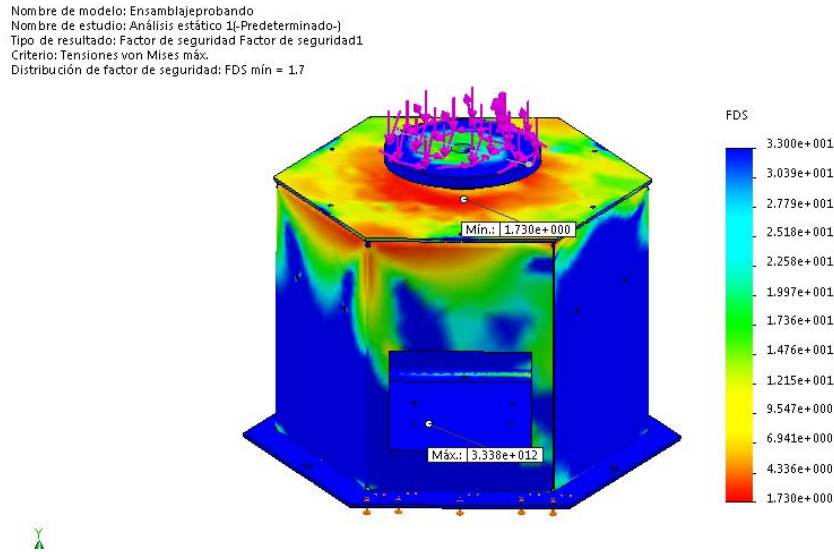


Figura 2.38 Análisis Factor de seguridad en la base

2.7 CINEMÁTICA PARA EL BRAZO UTN

La cinemática del robot trata con el estudio analítico del manipulador con respecto a un eje de coordenadas de referencia fijo, sin considerar las fuerzas que originan el movimiento.(Fu, Gonzales, & Lee)

Se notan dos de los problemas cinemáticos del robot; uno de ellos trata de encontrar la posición y orientación final del robot, a partir de un sistema de coordenadas de referencia y se lo conoce como el problema cinemático directo; el segundo denominado problema cinemático inverso, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.(Antonio. Barrientos, 1997)

Denavit y Hartenberg 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, que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro. (López Apostolovich, 2009)

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

En el brazo robótico UTN el marco de referencia se considera en la base, para el análisis se tomara como referencia el punto inicial al primer eslabón. Y la base al ser una distancia fija no afectará en el estudio cinemático. Como se muestra en la *Figura 2.39*.

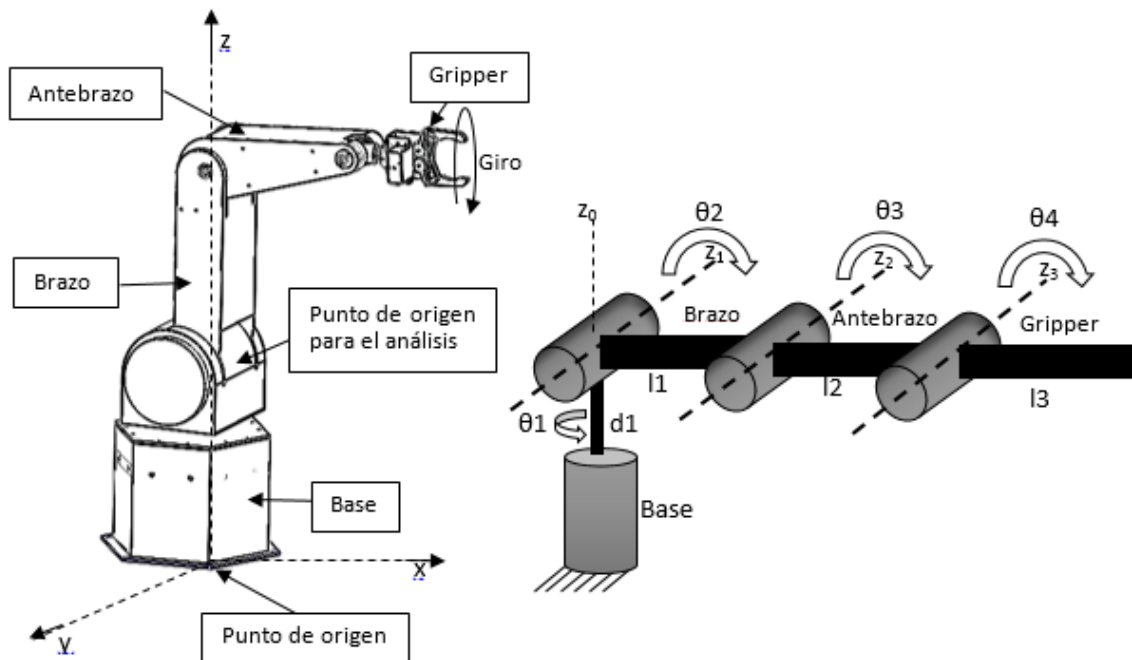


Figura 2.39 marco de referencias y diagrama de bloques para el brazo robot UTN

Los Parámetros Denavit-Hartenberg del brazo robótico UTN que se utilizan para hallar las matrices de transformación homogénea se muestran en la *Tabla 2.23*.

Tabla 2.23
Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo robótico UTN.

articulación	θ	d	A	α
1	θ_1	d1	0	$\pi/2$
2	θ_2	0	11	0
3	θ_3	0	12	0
4	θ_4	0	13	0
5	θ_5	0	0	$\pi/2$

Fuente: (ENDARA VEGA, 2017)

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.
- 11 Longitud del primer eslabón (brazo).
- 12 Longitud del segundo eslabón (antebrazo).
- 13 Longitud del Gripper.

2.8 MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MEDIANTE ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB.

El PhD. Peter Corke (1995), desarrollo un toolbox para MATLAB que provee muchas funciones útiles de la cinemática y dinámica, también la generación de trayectorias para el estudio y simulación de los robots manipuladores.

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)

2.8.1 CINEMÁTICA DIRECTA

Para el estudio de la cinemática directa en Matlab, se crea el robot en el entorno del programa y se hace uso de los parámetros de la matriz Denavit-Hartenberg, mostrados en la *Tabla 2.24*.

Tabla 2.24.

Parámetros Denavit-Hartenberg a utilizarse en Robotics Toolbox de MATLAB

Articulación	θ	d[m]	a[m]	α [°]	Sigma	Offset
1	θ_1	0.26	0	0	0	0
2	θ_2	0.14	0.4	$\pi/2$	0	0
3	θ_3	0	0.3	0	0	0
4	θ_4	0	0.2	0	0	0
5	θ_5	0	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$

Fuente: (ENDARA VEGA, 2017)

Con los parámetros D-H se establece los eslabones de la siguiente manera: **link (θ , d, a, α , Sigma, Offset)**, donde se sobreentiende que las variables desconocidas son los ángulos θ .

Se crean los eslabones con los parámetros de la *Tabla 2.26* y los siguientes códigos de Matlab: (ENDARA VEGA, 2017)

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=Link ([0 0 0 pi/2 0 pi]);

Establecidos los parámetros se compila los links mediante el comando SerialLink.

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

Se obtiene una respuesta en MATLAB como se muestra en la *Figura 2.40*.

```
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 2.40 Parámetros del robot en MATLAB.

Se establecen posiciones para obtener la posición del elemento final, haciendo uso de los siguientes comandos:

P0= [0 0 0 0 0]; articulación de base.
P0= [0 0 -pi/2 0 0]; articulación de hombro.
P0= [0 pi/2 -pi/4 0 0]; articulación de codo.
P0= [pi/2 0 pi/2 0 0]; articulación de muñeca.
P0= [0 0 0 0 pi/2]; giro de la muñeca.

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 realiza mediante la utilización del comando *fkine*. Usando los siguientes códigos. (ENDARA VEGA, 2017)

```
Cd0=R.fkine (p0)
Cd1=R.fkine (p1)
Cd2=R.fkine (p2)
Cd3=R.fkine (p3)
Cd4=R.fkine (p4)
Cd5=R.fkine (p5)
```

Se obtiene un resultado del análisis cinemático directo para el punto p_0 como una matriz, así:

$$Cd_0 = \begin{bmatrix} -0.0000 & -1.0000 & 0.0000 & 0.7000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 0 \\ -1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.2600 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

La *Figura 2.41* muestra una gráfica de la simulación del robot, de acuerdo a los parámetros ingresados.

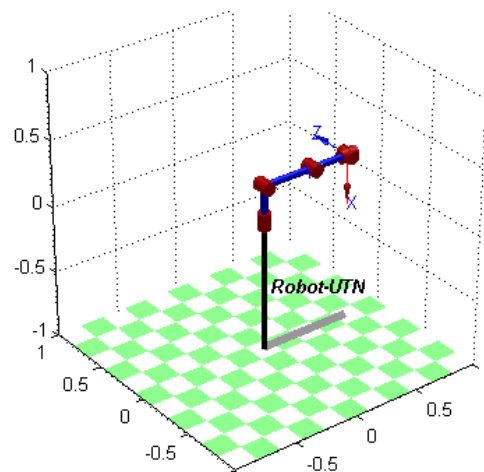


Figura 2.41 Simulación del Robot UTN entorno Matlab

2.8.2 CINEMÁTICA INVERSA

La cinemática inversa, permite determinar el movimiento necesario para lograr que el efector final se ubique en una posición definida. El análisis de la cinemática inversa se lo realiza con la ayuda del comando *ikene*. (ENDARA VEGA, 2017) Los parámetros para el análisis cinemático inverso del brazo robótico UTN son los siguientes:

$$M = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0]$$

$$Q1 = R.ikene (NOAP0, p0, M)$$

$$Q2 = R.ikene (NOAP1, p1, M)$$

$$Q3 = R.ikene (NOAP2, p2, M)$$

$$Q4 = R.ikene (NOAP3, p3, M)$$

$$Q5 = R.ikene (NOAP4, p4, M)$$

donde:

[NOAP] = Es la matriz que contiene la posición en la que se encontrara el efector final.

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

Se ejecutar el programa para la posición **p1** se tiene únicamente una rotación de la articulación del codo en $-\pi/2$ para llegar a la posición deseada, obteniendo los siguientes valores para la posición 1.

$$Q_2 = \begin{matrix} 0 & 0 & -1.5708 & 0 & 0 \\ Base & Hombro & Codo & Muñeca & Giro \end{matrix}$$

2.9 SIMULACIÓN DEL MODELO DINÁMICO DEL BRAZO ROBÓTICO

MEDIANTE ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®.

La dinámica del robot trata con las formulaciones matemáticas de las ecuaciones del movimiento del brazo. Ecuaciones que son útiles para la simulación en computadora del movimiento, el diseño de ecuaciones de control y evaluar el diseño y estructura del brazo. (Fu et al.)

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

El análisis dinámico sirve para la obtención de valores de torsión requeridos en cada articulación para generar el giro y simular el comportamiento del robot en condiciones de operación.

Usando en entorno *Simulink* de matlab se analiza la dinámica del brazo robot, se importa los datos obtenidos de las trayectorias y se observan los resultados de cada articulación de una forma independiente. Los datos de longitud, masa y posición provienen del modelo CAD realizado en SolidWorks por lo que no es necesario definir los parámetros exactos iniciales. (ENDARA VEGA, 2017)

Exportado el modelo CAD al entorno de matlab se tiene un modelo de bloques igual al de la *Figura 2.42*.

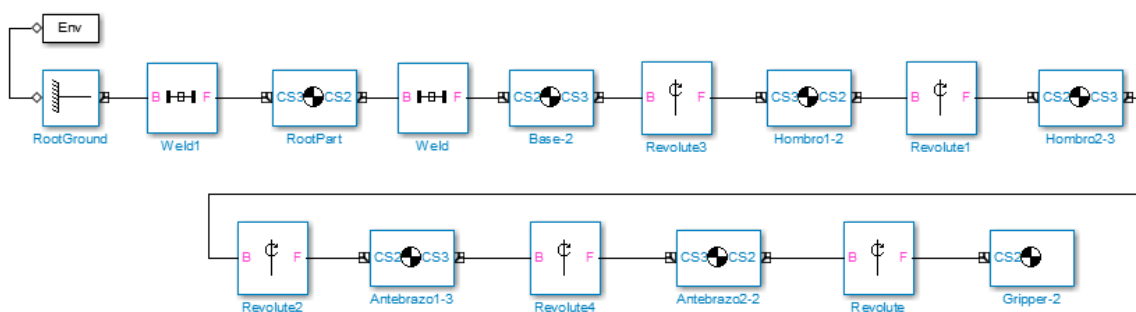


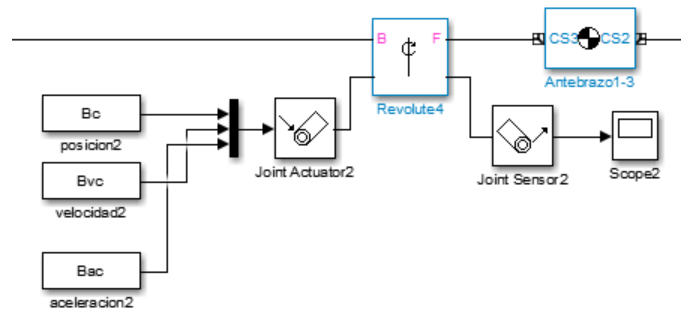
Figura 2.42 Diagrama de bloques en Simulink del modelo CAD del brazo robot.

Para usar este bloque de programación se debe anexar tres bloques adicionales de programación (ver *Figura 2.43*) que sirven para la comunicación entre el entorno de Matlab

y Simulink, donde se importan los datos de la posición, velocidad y aceleración desde el modelo CAD. (ENDARA VEGA, 2017)

Se establece un sensor en cada articulación como se observa en la *Figura 2.43*, el cual permite obtener el torque requerido en los actuadores del robot para generar el movimiento..

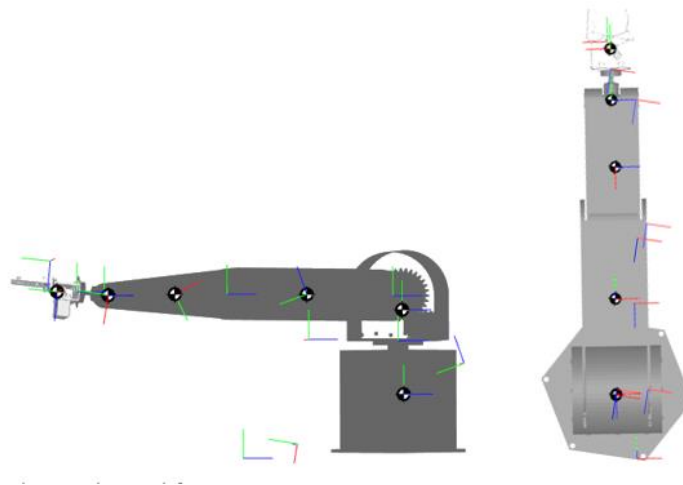
Bloque de programación completo ver *Anexo 11*.



*Figura 2.43 Bloque de programación adicional para la programación en matlab
fuente: (ENDARA VEGA, 2017)*

El brazo empieza su movimiento desde una posición inicial de cero en cada una de sus articulaciones como se observa en la *Figura 2.44*.

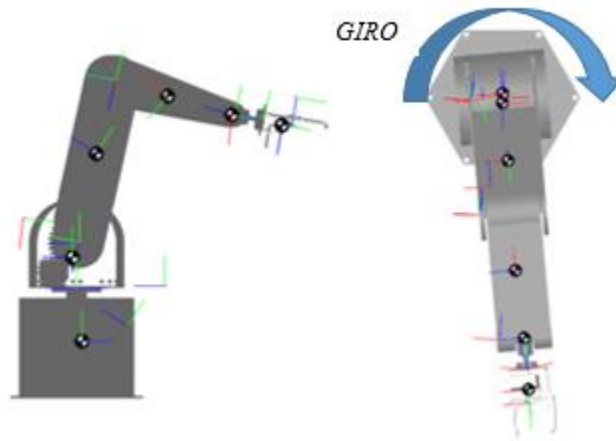
$$P_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$



*Figura 2.44 posición inicial del brazo robótico
a) vista lateral b) vista superior*

Se proporcionara una posición (P_1) en la cual el brazo alcanzara los valores distintos de cero y reflejara el torque necesario para esa posición.

$$P_0 = [\pi \ -5\pi/12 \ -\pi/4 \ 0 \ 0]$$



*Figura 2.45 posición final del brazo
a) vista lateral b) vista superior*

El brazo se ha movido en su base el valor de π (180°), en el hombro un valor de $-5\pi/12$ (75°), en el codo $-\pi/4$ (45°), y en la rotación y giro de la muñeca cero ya que no influye en el análisis.

Realizado el estudio dinámico se obtiene el torque requerido para realizar el movimiento de giro en la base del brazo robótico. Como se muestra en la *Figura 2.45*.

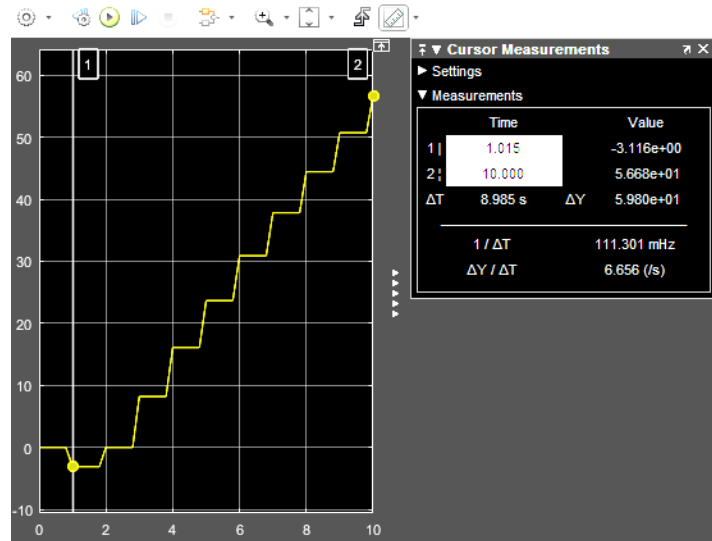


Figura 46 Torque obtenido en la base mediante simulación en Matlab.

En la *Figura 2.46* se observa el torque obtenido para mover la articulación de la base desde una posición inicial hasta una posición final.

- Torque obtenido para realizar el giro de la base es: $\pm 56\text{Nm}$

El resultado es semejante al obtenido en la sección de cálculo de torque requerido para la base, con lo cual se corrobora que los análisis están dentro del rango esperado.

2.13 DISEÑO DE CONTROL PARA LA BASE DEL BRAZO ROBÓTICO

Se debe saber que la base tiene un grado de libertad, es decir; un movimiento de rotación o giro hacia la derecha o izquierda. Para lograr este movimiento el diseño de control requiere de un actuador que proporcione un alto par, que sea capaz de posicionarse con precisión y una velocidad adecuada para no alterar su posicionamiento. Como se muestra en la *Figura 2.47*.

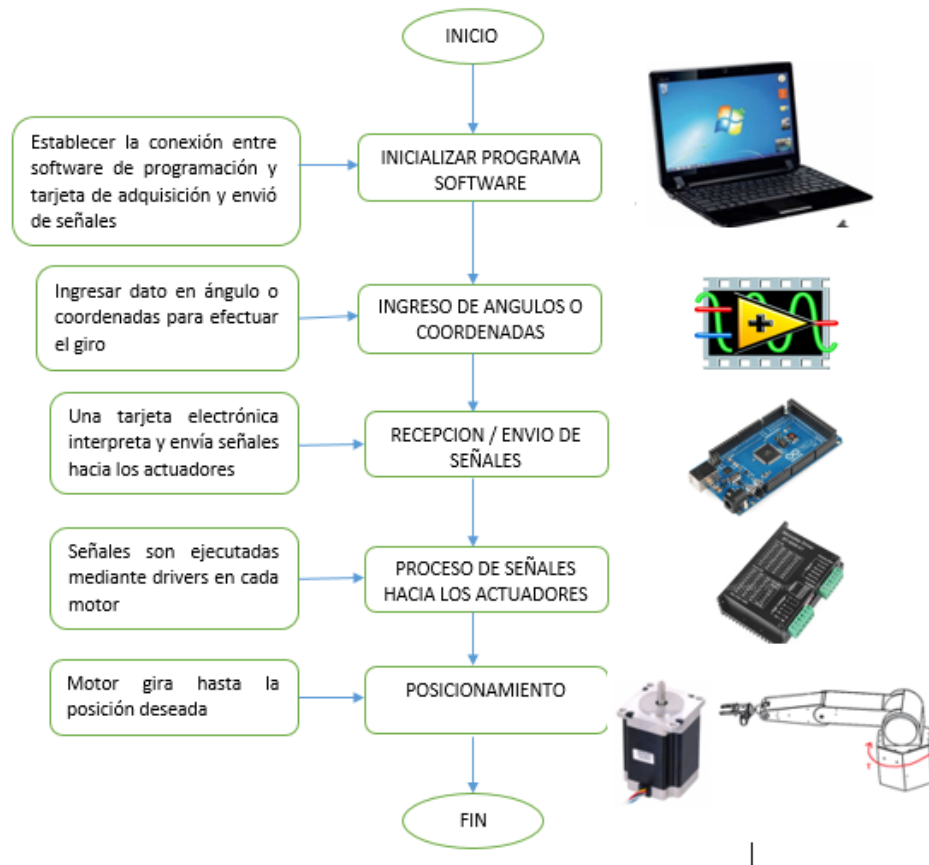


Figura 2.47 Diagrama de programación simplificado para la base del brazo robótico

Se usa un motor paso a paso debido a la precisión de posicionamiento en relación a los demás motores revisados. Su sistema de control se utiliza un lazo abierto al no necesitar una retroalimentación. El motor ira ubicado dentro de la estructura de la base y proporcionara el movimiento a través de un sistema de transmisión compuesto por engranajes rectos. (Anexo 9)

2.13.2 CONTROL DE MOTOR A PASOS

Su principio de funcionamiento está basado en el mismo fenómeno que los motores de corriente continua. Este tipo de motores poseen cualidades especiales debido a que se los mueve desde un paso hasta una secuencia interminable de pasos dependiendo de la cantidad

de pulsos que se le aplique. El paso puede ir desde pequeños movimientos de 1.8° hasta movimientos de los 90° .

Estos motores poseen la habilidad de enclavarse en una posición si hay una corriente circulando por una de sus bobinas o también cuando no existe corriente alguna circulando. Están compuestos básicamente por un rotor que es un imán permanente y bobinas excitadoras que son parte del estator.

Al número de grados que gira el rotor, cuando se efectúa un cambio de polaridad en las bobinas del estator, se le denomina "*ángulo de paso*".

Existen dos tipos de motores paso a paso más utilizados en robótica, unipolares y bipolares. El tipo de motor utilizado en este proyecto es bipolar. Por lo cual se hace enfoque en el control de este tipo de motor.

CONTROL MOTOR BIPOLAR

Están constituidos por dos bobinas y poseen cuatro cables de salida como se ve en la *Figura 2.48*. Para que el motor funcione, la corriente que circula por las bobinas cambia de sentido en función de la tensión, de ahí el nombre de bipolar, debido a que en los extremos de una misma bobina se pueden tener distintas polaridades.

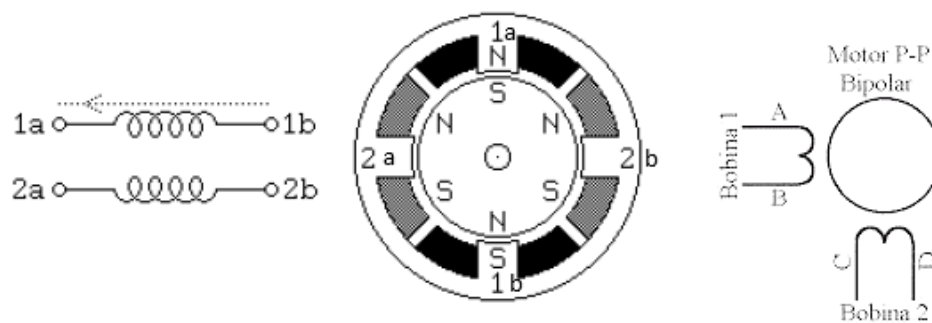


Figura 2.48 bobinas motor bipolar

A diferencia de los unipolares que son más sencillos de utilizar, en los bipolares su dificultad reside en el control de la alimentación y el cambio de polaridad. Estos motores necesitan la inversión de la corriente que circula en sus bobinas en una secuencia determinada. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro va determinado por la secuencia seguida. La *Tabla 2.25* muestra la secuencia de pasos de un motor bipolar.

Tabla 2.25
Secuencia para manejar motores bipolares

PASO	BOBINA A	BOBINA B	BOBINA C	BOBINA D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

Existen tres formas de controlar motores a pasos las cuales se muestran en la *Tabla 2.26*.

Tabla 2.26
Secuencia de pasos motores paso a paso unipolares

FORMA	DESCRIPCIÓN	PASO	BOB. A	BOB. B	BOB. C	BOB. D
SENCILLO	Activa una bobina por pulso.	Paso 1	ON	OFF	OFF	OFF
		Paso 2	OFF	ON	OFF	OFF
		Paso 3	OFF	OFF	ON	OFF
		Paso 4	OFF	OFF	OFF	ON
PASO NORMAL	Activar bobinas en pares para mayor fuerza de giro y retención.	Paso 1	ON	ON	OFF	OFF
		Paso 2	OFF	ON	ON	OFF
		Paso 3	OFF	OFF	ON	ON
		Paso 4	ON	OFF	OFF	ON

MEDIO PASO	Una combinación de las anteriores se obtiene mayor fuerza en el motor.	Paso 1	ON	OFF	OFF	OFF
		Paso 2	ON	ON	OFF	OFF
		Paso 3	OFF	ON	OFF	OFF
		Paso 4	OFF	ON	ON	OFF
		Paso 5	OFF	OFF	ON	OFF
		Paso 6	OFF	OFF	ON	ON
		Paso 7	OFF	OFF	OFF	ON
		Paso 8	ON	OFF	OFF	ON

Para tener un arranque suave y preciso se recomienda iniciar con una frecuencia de pulso baja y gradualmente ir incrementándola hasta la velocidad deseada. Si la frecuencia es muy elevada el motor podría reaccionar de las siguientes formas:

- Puede que no realice movimiento alguno.
- Puede haber vibración sin llegar a girar.
- Puede girar erráticamente.
- Puede girar en sentido contrario.

Número de pasos por vuelta: Es la cantidad de pasos que ha de efectuar el rotor para realizar una revolución completa.

Ecuación 2.12 Ecuación para el cálculo de número de pasos motor a pasos

$$NP = \frac{N^\circ \text{ de pasos por vuelta}}{\text{angulo deseado}} = \frac{200}{\alpha}$$

Donde **NP** es el número de pasos y α el ángulo de paso.

CONTROLADOR DE MOTOR

Para el control del motor se hará uso de un driver Micro Step Driver ST-4045-A1 debido a que la placa microcontrolador usada para la programación no proporciona la corriente necesaria para alimentar al motor. Se puede ver en la *Figura 2.49*.

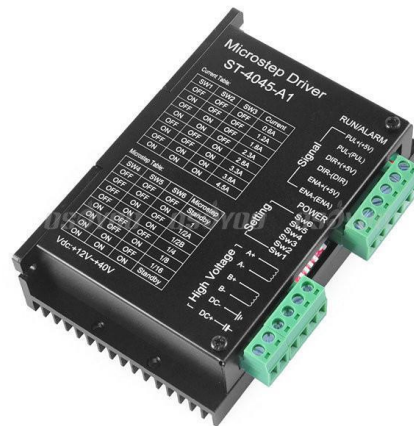


Figura 2.49 Micro Step driver St-4045-A1

(AliExpress, 2016)

El modo de conexión típica para el driver se lo muestra en la *Figura 2.50*.

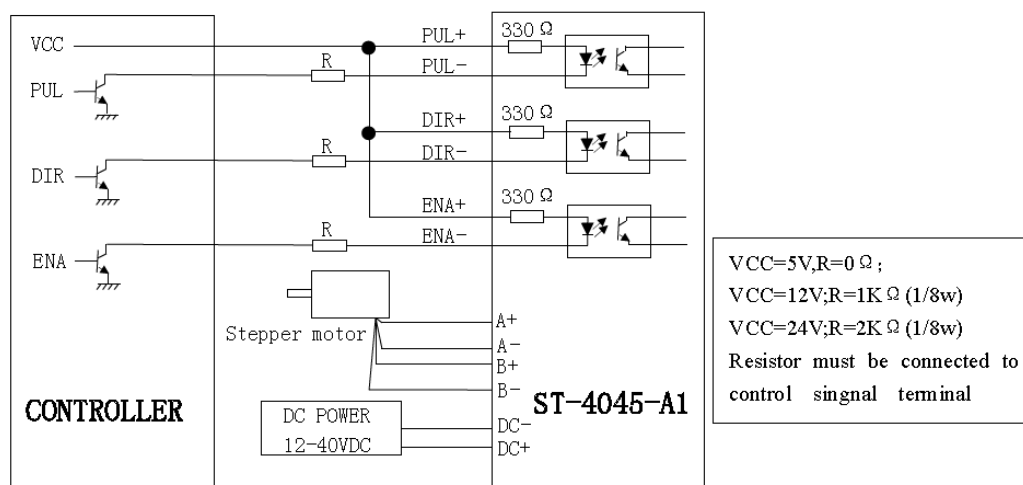


Figura 2.50 Conexión Típica Step driver ST-4045-A1
fuente: hoja del fabricante

Las características del microcontrolador, la configuración de los switches de salida de corriente (amperaje) y control la subdivisión de pasos (resolución) se revisa en el *Anexo 6*.

2.14 PROGRAMACIÓN

La programación para el control de la base se realiza mediante software de LabVIEW y utilizando una tarjeta Arduino mega para la adquisición de señales y el envío de las mismas, usando como cerebro principal un computador o PC. El programa para el control de la base brazo robot se esquematiza en la *Figura 2.51*.



Figura 2.51 Diagrama de flujo control de la base del brazo robot

En la *Figura 2.52* se muestra el diagrama de programación de la base del brazo robot realizado en LabVIEW.

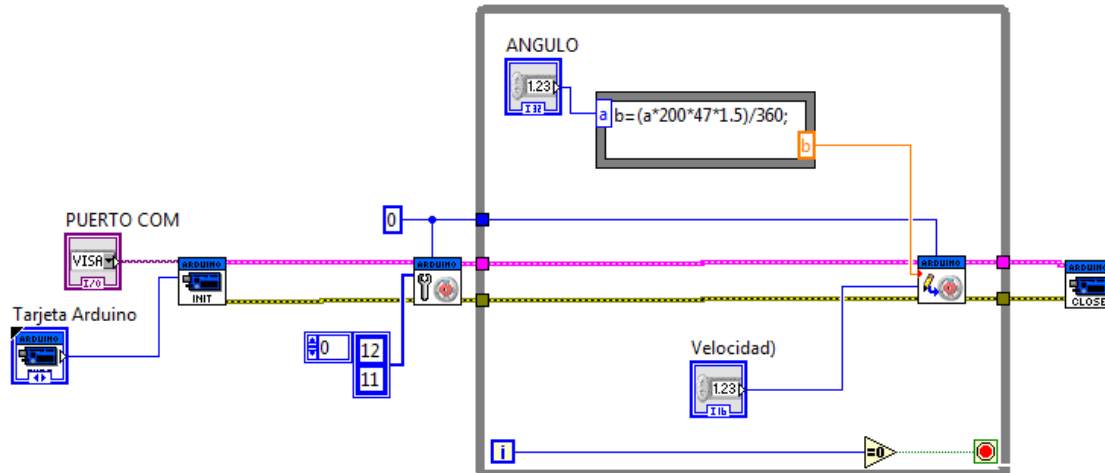


Figura 2.52 Diagrama de programación para la articulación de la base del brazo robótico en software de LabVIEW

En la Figura 2.53 se muestra la pantalla principal de la interfaz de usuario del programa que controla al brazo robótico UTN. Donde se ingresa valores de forma manual a cada articulación para generar su movimiento.



Figura 2.53 Interfaz de programación general del brazo robótico en software de LabVIEW

2.15 MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Se obtiene la función de transferencia del actuador utilizando la herramienta IDENT de Matlab y haciendo uso de la Tabla 2.27 de valores obtenidos de posición angular.

Tabla 2.27
 Ángulos medidos motor pasos

ÁNGULOS MEDIDOS MOTOR PASOS	
ANGULO DADO	ANGULO OBTENIDO
0	0
5	5
10	9
20	21
30	30
45	44,5
60	60
90	90
105	103
120	120
135	134
150	150
180	178

Para obtener la función de transferencia para el sistema, se toman datos en tiempo real de varios valores de posición del actuador como se muestra en la *Tabla 2.27* y se ingresa al entorno *IDENT* de matlab para su estimación. Dando como resultado la siguiente función de transferencia.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{0.9895 s + 42.58}{s + 42.75}$$

La función de transferencia obtenida tiene una estimación del 99.01%. Valor que garantiza que la estimación es fiable. En la *Figura 2.54* se muestra la curva que genera la estimación de la función de transferencia del sistema.

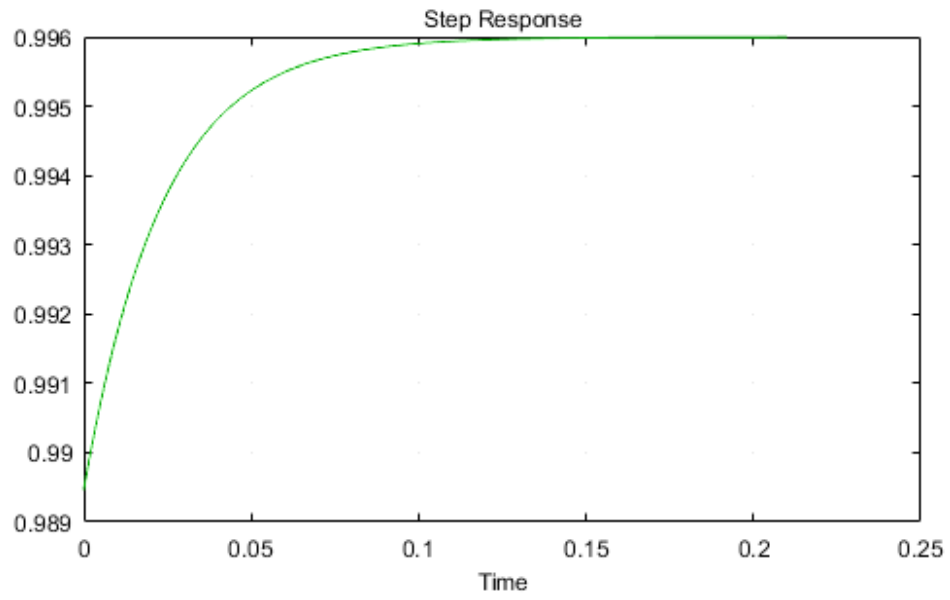


Figura 2.54 Curva generada por la estimación de la Función de transferencia

CAPITULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 DISEÑO MECÁNICO

El diseño de la base del robot se hizo de acuerdo a las especificaciones que se plantearon durante el desarrollo de la investigación. Puede ser mejorado en su geometría, disminuyendo las distancias y alturas ya que se diseñó de este modo por motivo que acogerá motores y drivers dentro de la misma.

En el sistema de transmisión se utiliza engranajes planos seleccionados mediante catálogos (*Anexo 9*) en una relación (3:2) para amplificar el par entregado por el actuador. También se puede mejorar optimizando el espacio utilizando, con otro tipo de transmisión como bandas dentadas, engranajes cónicos o cadenas.

3.2 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA BASE

El material empleado en el proyecto cumple con las especificaciones requeridas de diseño, soporta las cargas propuestas y no presenta deformación significativa. Como característica es de una excelente maquinabilidad pero tiende a ser propenso a rayones y golpes que lo dañarían. Una forma de optimizarlo es aplicando una capa de pintura o material de cobertura externa que lo proteja contra rayones.

Se puede optimizar la capacidad de resistir a rayones o golpes utilizando un material diferente como el acero o polímeros como el duralón. Todo de acuerdo a las especificaciones y requerimientos de diseño, la facilidad de adquisición en el mercado y el entorno de trabajo en el cual se desempeñará.

3.3 SISTEMA DE CONTROL PARA LA BASE

3.3.1 CINEMÁTICA

A través del análisis cinemático se obtuvieron los valores de fuerzas y momentos requeridos para del diseño mecánico, el sistema de transmisión y la selección de actuadores. Todo esto de una manera estática, para luego ser simulados a través de un software específico de una manera dinámica obteniendo así valores más reales y que se asemejan a los ya calculados con anterioridad, comprobando que los resultados son confiables y proceder a la manufactura.

3.3.2 DINÁMICA

En el análisis dinámico se usó el robotic toolbox de matlab, generando trayectorias y posiciones que el robot seguirá. De esa forma obtener los torques requeridos para realizar el giro en el sistema, de una manera más cercana a la real y verificar los cálculos ya realizados en la parte de diseño mecánico.

3,4 MANUFACTURA DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS

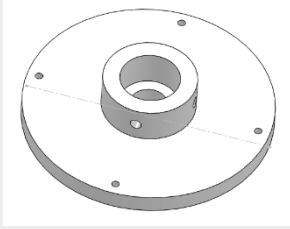
El manufacturado de los elementos mecánicos se realizó adquiriendo una plancha de aluminio de 3mm de espesor, el diseño se hizo trazando el modelo de cada elemento directamente en la plancha para luego ser cortado y doblado de la forma deseada.

En la *Tabla 3.28* se detalla los procesos de fabricación.

Tabla 3.28

Procesos de fabricación de los elementos mecánicos de la base

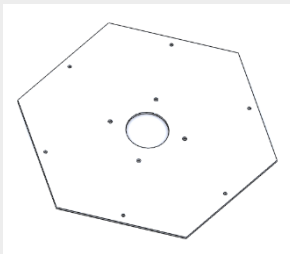
PIEZA	PROCESO DE MANUFACTURA
Porta Brazo	Trazado.- se realizó el trazado en un bloque cilíndrico de poliamida 6 (Duralón).

**Eje**

Torneado.- se realizó un tornado de la pieza hasta llegar a obtener las dimensiones requeridas en el diseño.

Perforado.- se realizó perforaciones de acuerdo al diámetro de los pernos a usar.

Torneado.- se utilizó un tubo de acero el cual se le realizo un torneado para reducir su diámetro exterior hasta llegar a la medida deseada de diseño.

Tapa superior**Soporte medio**

Trazado.- se realizó un trazado del diseño de la pieza sobre la plancha de aluminio.

Cortado.- le corte se lo realizo mediante una cizalla de la forma requerida en el diseño.

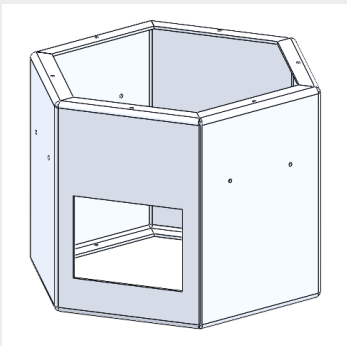
Perforado.- se realizó perforaciones de acuerdo al diámetro de los pernos a usar.

Trazado.- se realizó un trazado del diseño de la pieza sobre la plancha de aluminio.

Cortado.- le corte se lo realizo mediante una cizalla de la forma requerida en el diseño.

Perforado.- se realizó perforaciones de acuerdo al diámetro de los pernos a usar.

Doblado.- se realizó los dobleces necesarios para darle la forma requerida de diseño utilizando una dobladora manual.

Base cuerpo

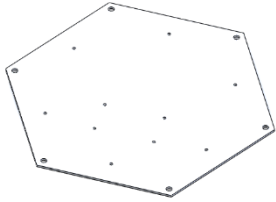
Trazado.- se realizó un trazado del diseño de la pieza sobre la plancha de aluminio.

Cortado.- le corte se lo realizo mediante una cizalla de la forma requerida en el diseño.

Perforado.- se realizó perforaciones de acuerdo al diámetro de los pernos a usar.

Doblado.- se realizó los dobleces necesarios para darle la forma requerida de diseño utilizando una dobladora manual.

Tapa interior

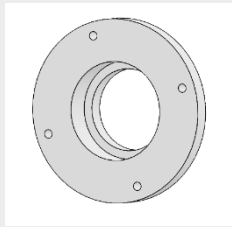


Trazado.- se realizó un trazado del diseño de la pieza sobre la plancha de aluminio.

Cortado.- le corte se lo realizo mediante una cizalla de la forma requerida en el diseño.

Perforado.- se realizó perforaciones de acuerdo al diámetro de los pernos a usar.

Porta rodamiento 1

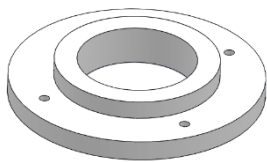


Trazado.- se realizó el trazado en un bloque cilíndrico de poliamida 6 (Duralón).

Torneado.- se realizó un tornado de la pieza hasta llegar a obtener las dimensiones requeridas en el diseño.

Perforado.- se realizó perforaciones de acuerdo al diámetro de los pernos a usar.

Porta rodamiento 2

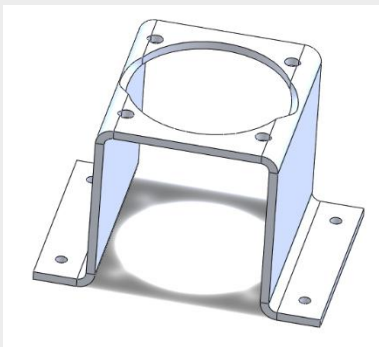


Trazado.- se realizó el trazado en un bloque cilíndrico de poliamida 6 (Duralón).

Torneado.- se realizó un tornado de la pieza hasta llegar a obtener las dimensiones requeridas en el diseño.

Perforado.- se realizó perforaciones de acuerdo al diámetro de los pernos a usar.

Soporte motor



Trazado.- se realizó un trazado del diseño de la pieza sobre la plancha de aluminio.

Cortado.- le corte se lo realizo mediante una cizalla de la forma requerida en el diseño.

Perforado.- se realizó perforaciones de acuerdo al diámetro de los pernos a usar.

Doblado.- se realizó los dobleces necesarios para darle la forma requerida de diseño utilizando una dobladora manual.

3.5 MONTAJE

Terminado con la manufactura de todos los elementos constitutivos de la base, se realiza el montaje o ensamble de los mismos.

En la *Figura 3.55* se observa una vista explosionando de todos los elementos que conforman la base.

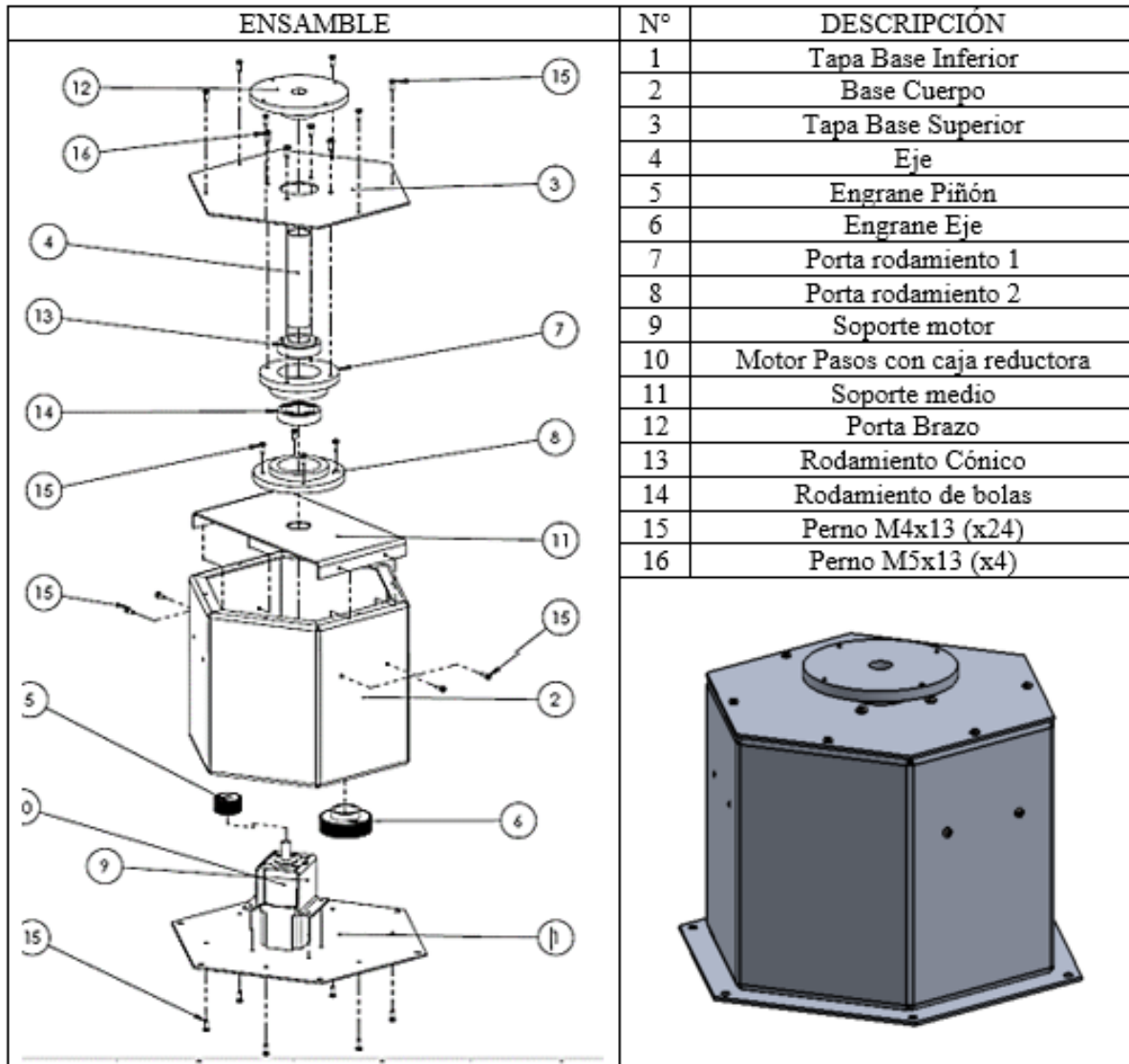
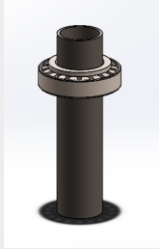
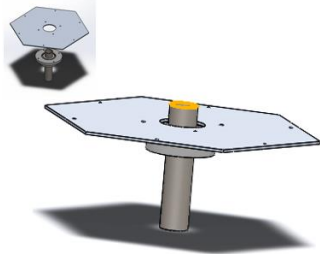
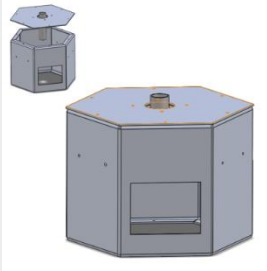
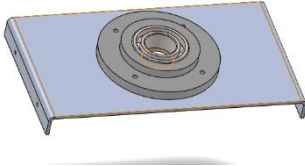
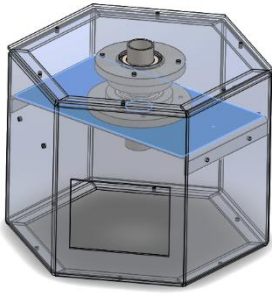


Figura 3.55 Explosionado de los elementos de la base

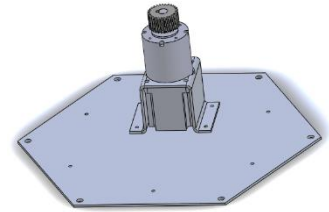
En la *Tabla 3.29* se detalla el montaje de los elementos mecánicos de la base, y un detalle de los pasos a seguir con cada elemento mecánico.

Tabla 3.29
Montaje de los elementos mecánicos de la base

PASO	ACCIÓN	DETALLE	VISTA
1	Ensamble Rodamiento y eje	Insertar el rodamiento cónico en el eje hasta la distancia requerida.	
2	Ensamble Tapa superior	Colocar el rodamiento con el eje en el porta rodamiento y sujetarlo a la parte interna de la tapa superior mediante pernos.	
		Colocar el ensamble de la tapa en la parte superior del cuerpo de la base y ajustar con pernos.	
		Ensamblar el rodamiento de bolas y el porta rodamiento2 a la pieza que va dentro de la base utilizando pernos.	
3	Ensamble parte interna - base	Colocar el ensamble dentro de la base y ajustar con pernos.	

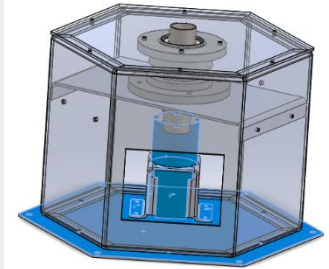
Sobre la pieza inferior de la base
colocar los drivers de los motores y el
motor respectivo de la base.

Ajustar con pernos



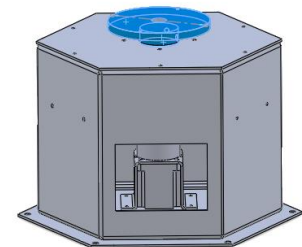
4 Ensamble parte
inferior de la base

Sujetar el ensamble al cuerpo de la base
por la parte inferior y ajustar con
pernos.



5 Conexiones
eléctricas

Colocar la pieza unión soporte para el
brazo y realizar la conexión del
cableado eléctrico de los componentes
de la base. Líneas de alimentación y
controladores de motores.



3.6 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA EL ACTUADOR DE LA BASE

Para el sistema de control de la base se hace de un computador, un driver ST-4045-A1 (*ver Anexo 6*) y una tarjeta Arduino Mega para controlar al actuador que regirá el movimiento en la base del brazo robótico UTN, el cual consiste en un motor a pasos *NEMA 23* con caja reductora de engranajes en relación 47:1. El diagrama del circuito de control se muestra en la *Figura 3.56*.

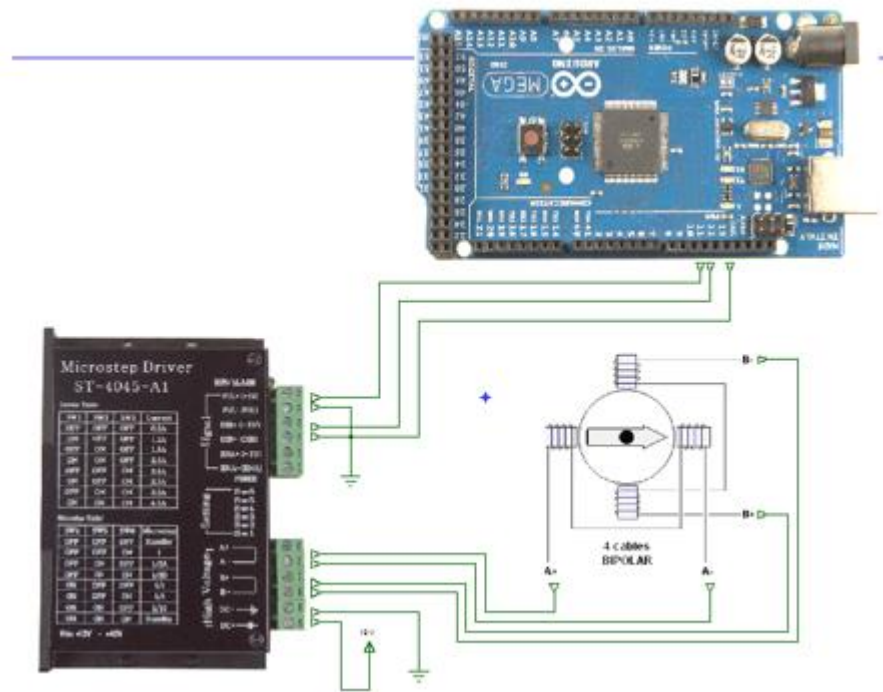


Figura 3.56 Diagrama Circuito de control para el actuador de la base

3.7 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.

Ensamblada la base y todos los demás componentes del brazo robot, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento. Estas consisten en ejecutar ordenes (introducir valores angulares) y medir el posicionamiento en dos instancias, con carga – sin carga. Obtenidos los datos se realiza una tabla comparativa como se muestra en la *Tabla 3.30* y se saca el porcentaje de error que tiene el sistema.

Tabla 3.30
Ángulos medidos de la base con carga y sin carga

ÁNGULOS MEDIDOS EN LA BASE				
ANGULO DADO	ANGULO OBTENIDO SIN CARGA	% error individual	ANGULO OBTENIDO CON CARGA	% error individual
0	0	0,00%	0	0
5	5	0,00%	4	20,00%
10	9	10,00%	9	10,00%
20	21	5,00%	19	5,00%

30	30	0,00%	29	3,33%
45	44,5	1,11%	43	4,44%
60	60	0,00%	58	3,33%
90	90	0,00%	89	1,11%
105	103	1,90%	103	1,90%
120	120	0,00%	118	1,67%
135	134	0,74%	133	1,48%
150	150	0,00%	148	1,33%
180	178	1,11%	177	1,67%
210	209	0,48%	207	1,43%
TOTAL	TOTAL		TOTAL	
1160	1153,5		1137	
	% de error total sin carga		% de error total con carga	
	0,56%		1,98%	

En la *Tabla 3.30* se observa el porcentaje de error obtenido en la base, tanto con carga como sin carga, el error obtenido es del 2%. Existe una desviación de $\pm 1^\circ$ entre cada medición, esto se debe a la holgura que existe en su sistema de transmisión conformado por engranes rectos.

En la *Figura 3.57* se muestra los valores angulares medidos en la articulación de la base, se nota tres valores siendo la línea de color azul el ángulo ingresado, la de color gris el ángulo obtenido con una carga de 1kg y la de color naranja el ángulo obtenido sin ninguna carga.

En la *Figura 3.58* se muestra la curva generada del posicionamiento angular de la base de acuerdo a los datos de la *Tabla 3.30*.

Ángulos medidos de la base

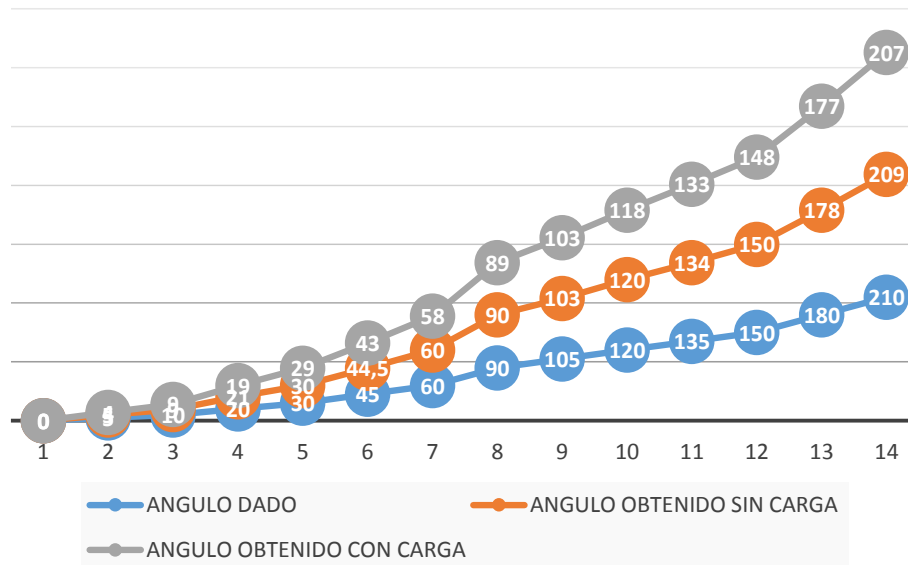


Figura 3.57 Mediciones angulares en la base

Color azul: ángulo dado,
 color naranja: ángulo obtenido sin carga,
 color gris: ángulo obtenido con carga

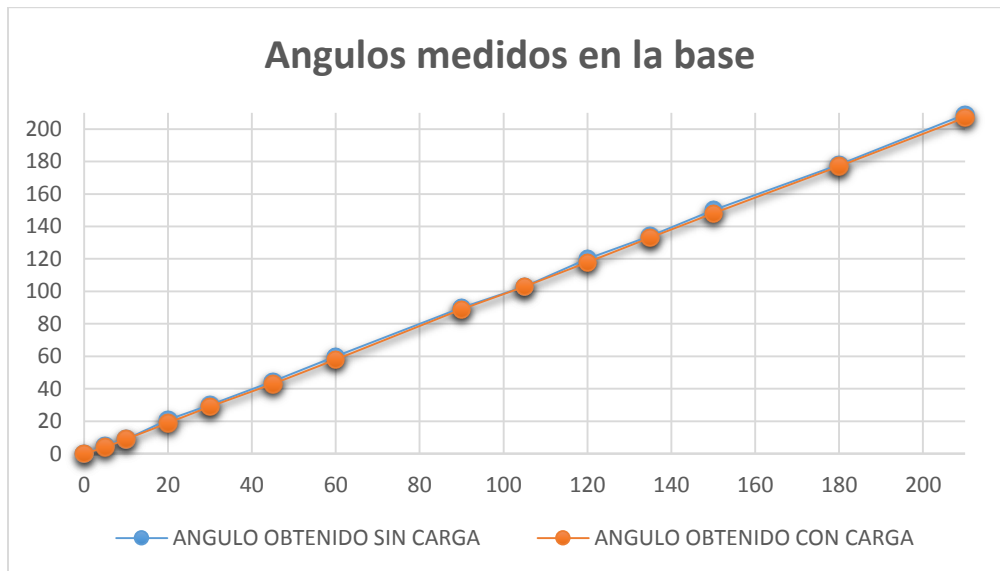


Figura 3.58 Curva obtenida en la medición de posicionamiento angular de la base

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- El diseño de la base para el prototipo del brazo robótico se realizó de acuerdo a las medidas requeridas de manera que acoja los componentes a usar como: motores, drivers y el cableado eléctrico, entre otros.
- La diversa información recopilada en relación a robots industriales fue esencial en el diseño morfológico del prototipo.
- El material utilizado para la construcción fue seleccionado de acuerdo a tablas elaboradas en base a características de cada material como resistencia, maquinabilidad, peso y el costo de adquisición. El material que se adapta a estas exigencias es el aluminio ASTM A1200.
- Para el diseño mecánico de la base se tomó en cuenta que el brazo soportará una carga máxima de 1 Kg incluyendo el peso de los componentes, por lo tanto en los cálculos se asume un peso de 10.7 Kg para evitar una posible falla
- La selección de actuadores se realiza elaborando una tabla comparativa con similares características que el sistema requiera, se seleccionó el más adecuado para cumplir con los objetivos del proyecto como velocidad, un alto par y precisión en el posicionamiento.
- Los cálculos para dimensionar los componentes se realizó aplicando teorías de falla como von mises. Se calculó de una manera estática y los resultados fueron analizados mediante un software adecuado, y se verifica que están correctos en una gran medida.

- Para el diseño del sistema de control se utilizó una tarjeta arduino para recibir y enviar señales desde el computador hacia el brazo y viceversa. La programación se realizó utilizando software (LabVIEW) el cual recibe, procesa y genera las señales que van hacia los actuadores para alcanzar el movimiento y posición final.
- El uso de motores paso a paso simplifica el diseño de control al realizarse en lazo abierto y no necesitar de una señal de retro-alimentación para lograr su posicionamiento. Con esto se logra obtener la posición deseada de manera más rápida y directa.
- La simulación del proyecto en un software apoyo en el análisis de la mecánica de los componentes y detección de posibles fallas en el diseño general como en la resistencia del material.

4.2 RECOMENDACIONES

- El diseño del prototipo de brazo robot se deja como un tema abierto a seguir en la línea de investigación, enfocarse en el tipo de materiales con el fin de reducir el peso. Este será una herramienta para fortalecer el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería, y se recomienda tomar como continuación en un futuro trabajo de tesis.
- Al estar construido con un material susceptible a rayones y golpes que podrían dañar su estructura, se recomienda su uso con responsabilidad y mantener su funcionamiento óptimo. Trabajar en ambientes idóneos para no obstruir el espacio de trabajo del brazo robot.

- Los actuadores, sensores y tarjetas electrónicas utilizadas en el proyecto trabajan a distintos niveles de voltaje y amperaje, se recomienda utilizar fuentes de alimentación distintas par cada elemento o a su vez incorporar una que proporcione el voltaje y amperaje requeridos para todo el sistema, revisar la hoja de datos del fabricante para cada componente con el fin de evitar posibles daños por malas conexiones.

- Al ser un prototipo para laboratorio, el proyecto queda abierto a modificaciones y adaptaciones en función del entorno de trabajo. Pudiendo ser rediseñado tanto en su parte mecánica como en su sistema de control y programación. Se recomienda hacer énfasis en la mejora de velocidad enfocándose en los sistemas de transmisión y actuadores.

- Se recomienda ampliar o modificar la programación si se desea realizar movimientos más complejos de sus articulaciones y usar otros los componentes electrónicos como las tarjetas de adquisición de datos para asegurar una mayor fiabilidad en la adquisición de señales y precisión de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. M., & Bravo, M. E. (2014). *Diseño, Construcción y Control de un Brazo Robótico*. Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- Barahona Quelal, B. J. (2011). Construcción de una maquina etiquetadora automática para envases cilíndricos con etiquetas autoadhesivas. In. Quito.
- Barrientos, A. (1997). *Fundamentos de Robótica*.
- Barrientos, A. (1997). *Fundamentos de Robótica* (2da ed.): McGraw Hill.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. k. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*.
- ENDARA VEGA, C. A. (2017). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CODO Y MUÑECA PARA EL BRAZO ROBÓTICO UTN*. IBARRA.
- Fu, K. S., Gonzales, R. C., & Lee, C. S. G. *ROBÓTICA: Control, Detección, Visión e Inteligencia*. Madrid: Mc-Graw Hill.
- González Fdez, V. R., López Cruzado, A., & Cabero Esteban, J. A. (2015). Robots Industriales. Retrieved from http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm
- Granta, D. I. (2005). CES EduPack (Version 4.6). United Kingdom: Cambridge.
- Iñigo Madrigal, R., & Vidal Idiarte, E. (2002). *Robots Industriales Manipuladores*. España.
- J.Q., I. (2016). Plásticos de Ingeniería. In.
- 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.
- Ma Zan Zapata, J. F. *DISEÑO DE ELEMENTOS DE MAQUINAS 1*. Perú.
- Moreno, E. G. (2001). *Automatización de procesos industriales*: Alfaomega Valencia.
- Mott, R. L. *Diseño de elementos de maquinas*.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*.
- NORTON, R. L. (2011). *DISEÑO DE MAQUINAS, Un enfoque integrado* (CUARTA EDICION ed.).
- Ollero Baturone, A. (2001). *ROBÓTICA Manipuladores y Robots Moviles*. Barcelona (España)
- Ollier Caparros, I., Avilés, O., & Hernández Bello, J. (1999). *Una Introducción a la Robótica Industrial*.
- Plastigen Plásticos de Ingeniería. (2015, 10 26). Retrieved from http://www.plastigen.cl/site/plasticos_ing04.html
- Quizhpi, M. (2014). Monografías. Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos99/robotica-industrial/robotica-industrial.shtml>
- Reyes, F. (2011). *Robótica-Control de robots manipuladores*: Alfaomega Grupo Editor.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (S. Cervantes Ed. septima edicion ed.).
- SKF. (2015). Catalogo General de Rodamientos SKF. In.
- STEREN. *ABC de la Mecatrónica*.
- 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,

Vallejo A., P., & Zambrano O., J. (2009). *FÍSICA VECTORIAL 1*. Ecuador.

ANEXOS

ANEXO 1: ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN EL ELEMENTO PORTA BRAZO CON EL MATERIAL DURALÓN.

Parámetros a considerar

Fuerza que ejerce el peso del brazo: 104.9N

Longitud de diámetro del elemento porta brazo: 133 mm

Sumatoria de momentos: 54.76 Nm ~ 55 Nm

Torque = 45Nm

Se realiza un análisis por elementos finitos en software (SolidWorks) para determinar los esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y el factor de seguridad. El material utilizado es Poliamida 6 (duralón), como se ve en la *Figura 59*.

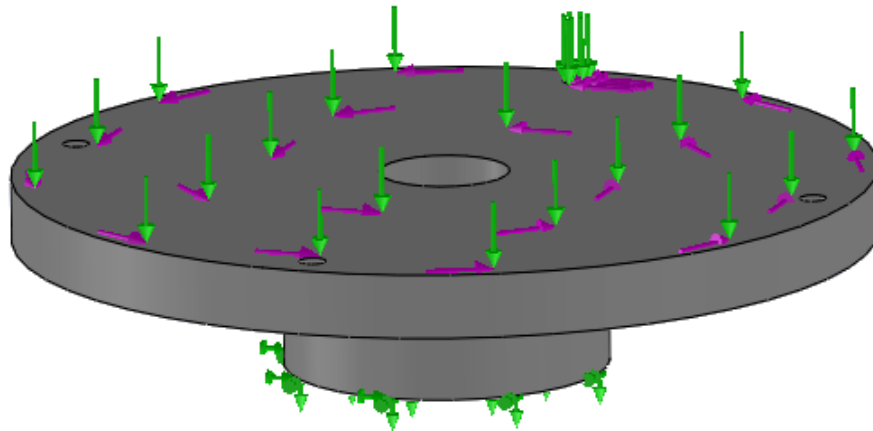


Figura 59 Condiciones de frontera sobre el elemento porta brazo con material Duralón.

En la *Figura 60* se observa el análisis de tensión de Von Mises, los esfuerzos están por debajo del límite elástico del material Duralón. (24.707Mpa)

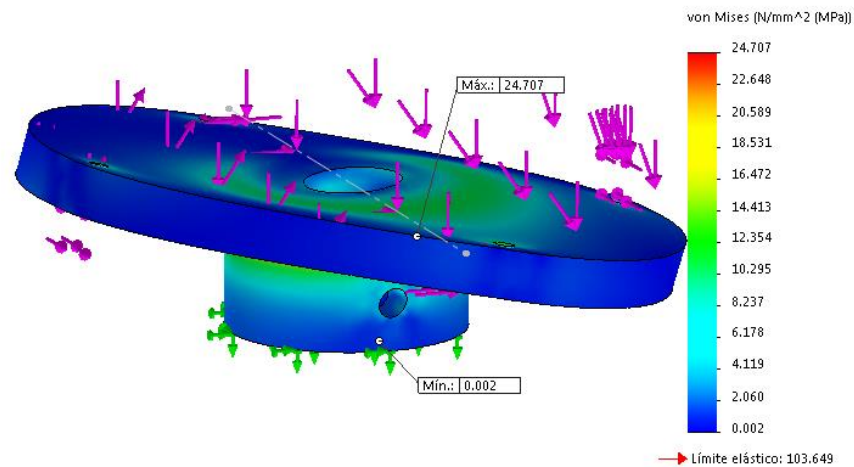


Figura 60 Análisis tensión de von mises con material Duralón

En la *Figura 61* se observa que el desplazamiento que se genera sobre el elemento porta brazo con material Duralón, es bastante mínimo de 0.62mm por lo tanto el diseño y funcionalidad no se verán afectados.

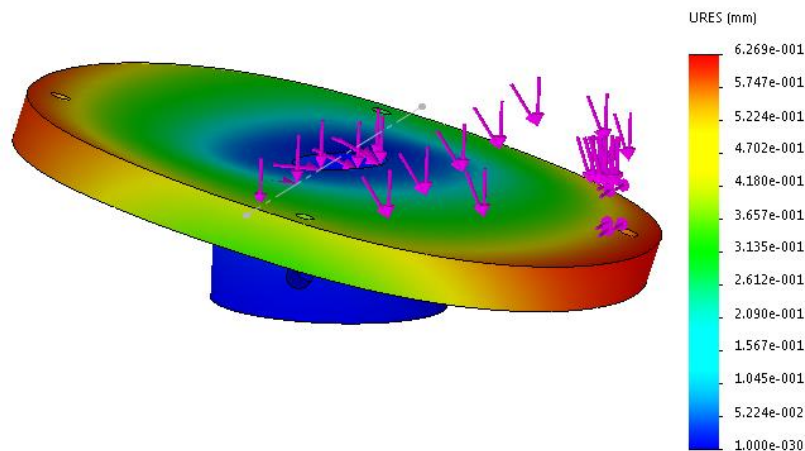


Figura 61 Análisis de desplazamiento con material Duralón

En la *Figura 62* se observa que el factor de seguridad mínimo obtenido es 4.2 lo que garantiza que el diseño soportará las cargas a las cuales estará sometido, sin presentar mayor problema.

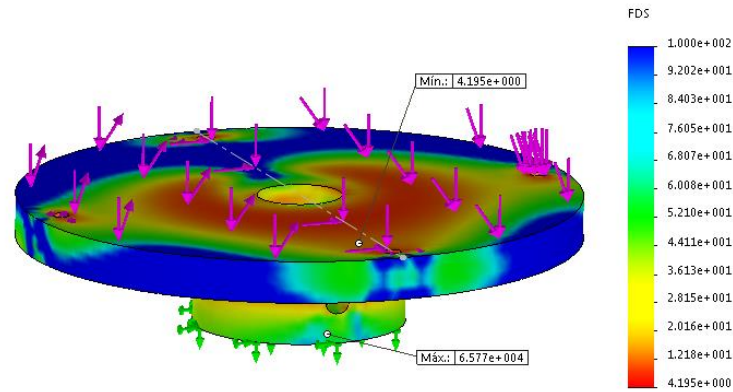


Figura 62 Factor de seguridad obtenido con material Duralón

ANEXO 2 Barra de acero al carbono perforada para ejes.

BARRA PERFORADA
Norma: EN 10294-1



Especificaciones Generales

Calidad EN 102494-1
Descripción Barra perforada de alta resistencia de acero con aleación de vanadio (0,12%), que le otorga mayor resistencia que otros aceros de bajo carbono en estado natural de fácil maquinado y soldabilidad.
Aplicaciones Ejes, bujes, cilindros, cajas de engranajes y conectores, flechas, equipos para minería y petróleo, espaciadores, cilindros de exhibición, entre otros.

Composición Química					
%C	%Mn	%Si	%V	%S	%P
0,22	0,16	0,35	0,12	0,04	0,03

Dimensiones		Desde	Hasta
		Interior	30 mm
	Exterior	50 mm	115 mm
	Longitud	5,85 m	7 m

Propiedades Mecánicas			
Resistencia Mecánica	Punto de fluencia	Elongación % Min.	Dureza HB
650 / 800	<16 mm - 480	18	240
	>16 - 30 mm - 460		
	>30 mm - 440		

EJES

Fuente: Catalogo DIPAC – Características plancha de aluminio lisas.

ANEXO 3: Tabla de características del material



ALUMINIO PLANCHAS LISAS



Especificaciones Generales

Descripción ASTM A 1200 - TEMPLE H 14

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

Dimensiones 1220 x 2440 mm (estándar)

Espesor mm	Densidad Mecánica	% elongación
0.7 - 4.00	127 - 136 Kg/mm ²	8.6 - 7.5

Composición Química %								
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Alu
0.24	0.07	0.030	0.028	0.01	0.047	-	0.01	REMAINDER

ALUMINIO

Fuente: Catalogo DIPAC – Características plancha de aluminio lisas.

ANEXO 4: Características del Acero para ejes



DISERVICIOS

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

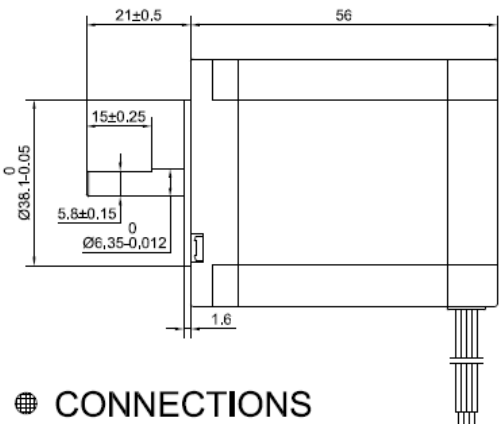
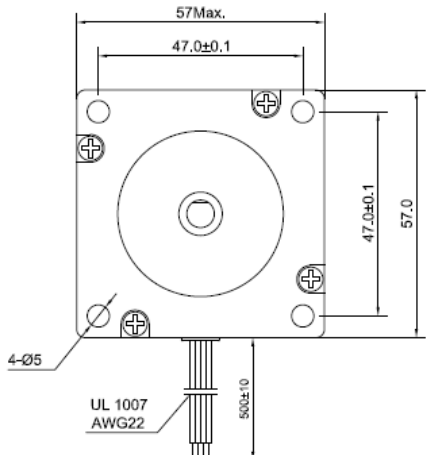
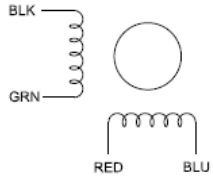
DIAMETRO	LONGITUD
32 mm	6m.
38 mm	6m.
45 mm	6m.
50 mm	6m.
60 mm	6m.
70 mm	6m.

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 – Especificaciones generales acero para ejes.

ANEXO 5: Hoja de Datos Técnicos del Motor pasó a paso

Nema 23 Stepper Motor		Rev: A										
		Date:										
<p>● COMMON RATINGS</p> <p>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 : 300gcm² Weight : 0.7Kg</p>												
<p>● SPECIFICATIONS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Holding Torque (2 phases on) Nm</th> <th>Rated Current/Phase (Amps DC)</th> <th>Phase Resistance (ohms) ±10%</th> <th>Voltage Current/Phase (V DC)</th> <th>Phase Inductance (mH)±20%(1KHz) Typical</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.26</td> <td>2.8</td> <td>0.9</td> <td>2.5</td> <td>2.5</td> </tr> </tbody> </table>			Holding Torque (2 phases on) Nm	Rated Current/Phase (Amps DC)	Phase Resistance (ohms) ±10%	Voltage Current/Phase (V DC)	Phase Inductance (mH)±20%(1KHz) Typical	1.26	2.8	0.9	2.5	2.5
Holding Torque (2 phases on) Nm	Rated Current/Phase (Amps DC)	Phase Resistance (ohms) ±10%	Voltage Current/Phase (V DC)	Phase Inductance (mH)±20%(1KHz) Typical								
1.26	2.8	0.9	2.5	2.5								
<p>● DIMENSIONS unit=mm</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>												
<p>● CONNECTIONS</p> 												

Fuente: Datasheet Fabricante Stepper Motor Nema 23

ANEXO 6: Características Driver controlador de motor

Características del micro controlador:

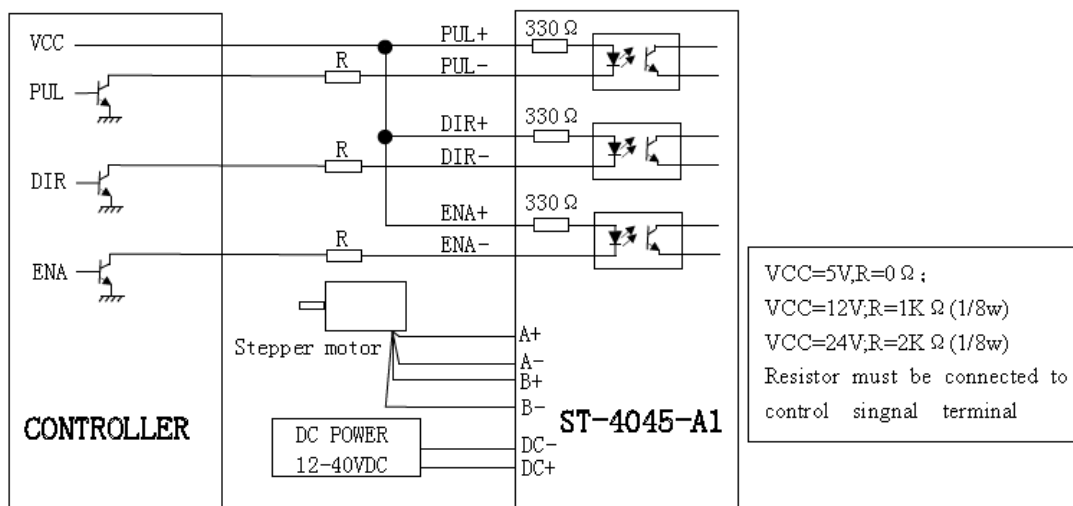
1. Entrada de voltaje: 12V – 40V DC
2. Corriente de salida: 0.6 ~ 4.5^a
3. Micro Step: 1, 2, 4, 8, 16.
4. Protección: protección sobre voltaje, protección sobre corriente y protección de conexiones inversas de la fuente de alimentación.
5. Radio máximo de pulsos: 200KHz
6. Dimensiones : 118mm*87mm*35mm
7. Peso: 253 gr.
8. Ambiente de trabajo: temperatura -15°C ~ 50°C - humedad < 90%.

Puertos de entrada y salida

1. DC+ : DC polo positivo de alimentación.
Nota: no debe exceder los 45V, o dañara el modulo.
2. DC- : DC polo negativo alimentación.
3. A+, A- : cableado primera bobina
4. B+, B- : cableado segunda bobina
5. PUL+, PUL - : pulso de entrada +5V (Rising edge effective , rising edge duration >10μS)
6. DIR +, DIR- : entrada dirección del Stepping motor, nivel de voltage off, high level adelante, low level reversa
7. ENA+, ENA-: motor libre

CONEXIÓN TÍPICA

Typical Connection:



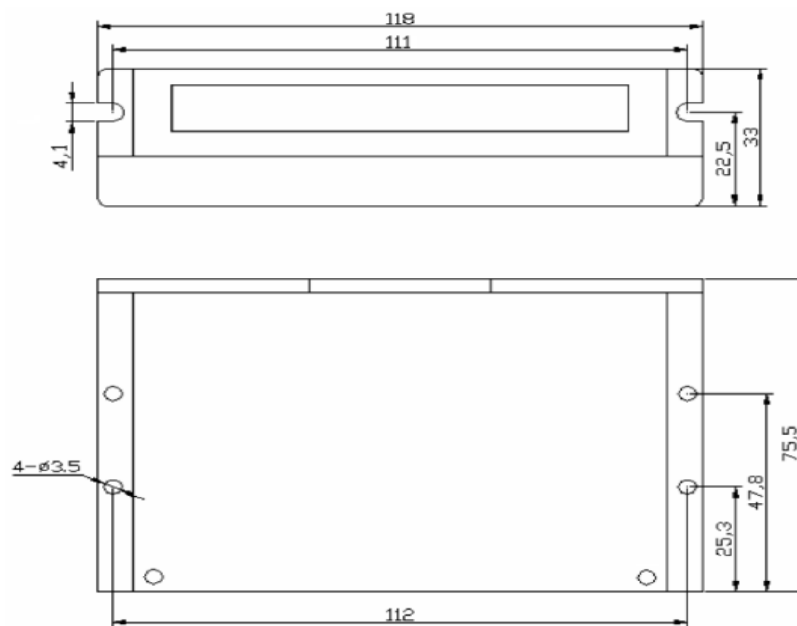
Switch Choice:

1、 Microstep choice:

Microstep	Pluse/rev. (for 1.8° motor)	SW4	SW5	SW6
Standby	----	OFF	OFF	OFF
1	200	OFF	OFF	ON
1/2(A)	400	OFF	ON	OFF
1/2(B)	400	OFF	ON	ON
1/4	800	ON	OFF	OFF
1/8	1600	ON	OFF	ON
1/16	3200	ON	ON	OFF
Standby	----	ON	ON	ON

2、 Current choice:

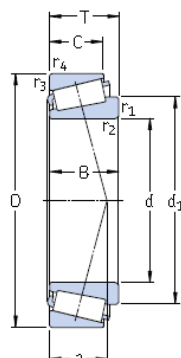
Peak current	SW1	SW2	SW3
0.6A	OFF	OFF	OFF
1.2A	ON	OFF	OFF
1.8A	OFF	ON	OFF
2.3A	ON	ON	OFF
2.8A	OFF	OFF	ON
3.3A	ON	OFF	ON
3.8A	OFF	ON	ON
4.5A	ON	ON	ON

Shell Dimension:

Fuente: Datasheet fabricante

ANEXO 7: Rodamiento cónico y sus especificaciones técnicas

Rodamientos de una hilera de rodillos cónicos métricos
d 15 – 32 mm



Dimensiones principales	Capacidad de carga básica	Carga límite de fatiga	Velocidades		Masa	Designación	Serie de dimensiones según la ISO 355 (ABMA)			
			dinámica C	estática C ₀				Velocidad de referencia	Velocidad límite	
d D T	kN	kN	rpm	rpm	kg	-	-			
15	42	14,25	22,4	20	2,08	13 000	18 000	0,095	30302 J2	2FB
17	40	13,25	19	18,6	1,83	13 000	18 000	0,075	30203 J2	2DB
	47	15,25	28,1	25	2,75	12 000	16 000	0,13	30303 J2	2FB
	47	20,25	34,7	33,5	3,65	11 000	16 000	0,17	32303 J2/Q	2FD
20	42	15	24,2	27	2,7	12 000	16 000	0,097	32004 X/Q	3CC
	47	15,25	27,5	28	3	11 000	15 000	0,12	30204 J2/Q	2DB
	52	16,25	34,1	32,5	3,6	11 000	14 000	0,17	30304 J2/Q	2FB
	52	22,25	44	45,5	5	10 000	14 000	0,23	32304 J2/Q	2FD
22	44	15	25,1	29	2,85	11 000	15 000	0,10	320/22 X	3CC
25	47	15	27	32,5	3,25	11 000	14 000	0,11	32005 X/Q	4CC
	52	16,25	30,8	33,5	3,45	10 000	13 000	0,15	30205 J2/Q	3CC
	52	19,25	35,8	44	4,65	9 500	13 000	0,19	32205 B J2/Q	5DC
	52	22	54	56	6	10 000	13 000	0,23	* 33205/Q	2DE
	62	18,25	44,6	43	4,75	9 000	12 000	0,26	30305 J2	2FB
	62	18,25	38	40	4,4	7 500	11 000	0,26	31305 J2	7FB
	62	25,25	60,5	63	7,1	8 000	12 000	0,36	32305 J2	2FD
28	52	16	36,5	38	4	10 000	13 000	0,15	* 320/28 X/Q	4CC
	58	17,25	38	41,5	4,4	9 000	12 000	0,25	302/28 J2	-
	58	20,25	41,8	50	5,5	8 500	12 000	0,25	322/28 B J2/Q	5DD
30	55	17	35,8	44	4,55	9 000	12 000	0,17	32006 X/Q	4CC
	62	17,25	40,2	44	4,8	8 500	11 000	0,23	30206 J2/Q	3DB
	62	21,25	50,1	57	6,3	8 500	11 000	0,28	32206 J2/Q	3DC
	62	21,25	49,5	58,5	6,55	8 000	11 000	0,30	32206 B J2/QCL7CVA606	5DC
	62	25	64,4	76,5	8,5	7 500	11 000	0,37	33206/Q	2DE
	72	20,75	56,1	56	6,4	7 500	10 000	0,39	30306 J2/Q	2FB
	72	20,75	47,3	50	5,7	6 700	9 500	0,39	31306 J2/Q	7FB
	72	28,75	76,5	85	9,65	7 000	10 000	0,55	32306 J2/Q	2FD
32	53	14,5	27	35,5	3,65	9 000	12 000	0,11	JL 26749 F/710	(L 26700)
	58	17	36,9	46,5	4,8	8 500	11 000	0,19	320/32 X/Q	4CC

* Rodamiento SKF Explorer

618

Polígono Industrial O Rebullón s/n. 36416 - Mos - España - rodavigo@rodavigo.com

SKF

Fuente: Catalogo Rodamientos SKF – Rodamiento de hilera de rodillos cónicos.

ANEXO 8: Rodamiento de bolas Axial

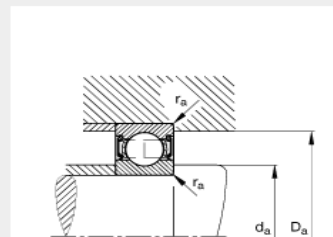
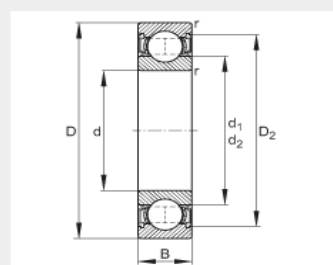
Rodamientos rígidos de bolas SKF E2 tapados

d 17 – 80 mm

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades nominales		Masa	Designaciones
d	D	B	C	C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
17	35	10	5,85	3	0,127	49 000	25 000	0,039	E2.6003-2Z
	35	10	5,85	3	0,127	-	15 000	0,038	E2.6003-2RSH
	40	12	9,56	4,75	0,2	41 000	21 000	0,065	E2.6203-2Z
	40	12	9,56	4,75	0,2	-	13 000	0,065	E2.6203-2RSH
	47	14	13,8	6,55	0,275	37 000	19 000	0,12	E2.6303-2Z
	47	14	13,8	6,55	0,275	-	12 000	0,112	E2.6303-2RSH
20	42	12	9,36	5	0,212	41 000	21 000	0,069	E2.6004-2Z
	42	12	9,36	5	0,212	-	12 000	0,067	E2.6004-2RSH
	47	14	12,7	6,55	0,28	35 000	19 000	0,11	E2.6204-2Z
	47	14	12,7	6,55	0,28	-	11 000	0,10	E2.6204-2RSH
	52	15	16,3	7,8	0,34	34 000	18 000	0,15	E2.6304-2Z
	52	15	16,3	7,8	0,34	-	11 000	0,143	E2.6304-2RSH
25	47	12	11,1	6,1	0,26	35 000	18 000	0,08	E2.6005-2Z
	47	12	11,1	6,1	0,26	-	11 000	0,077	E2.6005-2RSH
	52	15	13,8	7,65	0,325	30 000	16 000	0,13	E2.6205-2Z
	52	15	13,8	7,65	0,325	-	10 000	0,13	E2.6205-2RSH
	62	17	22,9	11,6	0,49	28 000	15 000	0,23	E2.6305-2Z
30	55	13	12,7	7,35	0,31	30 000	15 000	0,12	E2.6006-2Z
	62	16	19,5	11,2	0,475	26 000	14 000	0,20	E2.6206-2Z
	72	19	28,1	15,6	0,67	22 000	12 000	0,36	E2.6306-2Z
35	62	14	15,3	9,15	0,39	26 000	13 000	0,15	E2.6007-2Z
	72	17	25,5	15,3	0,64	22 000	12 000	0,30	E2.6207-2Z
	72	17	25,5	15,3	0,64	-	7 300	0,28	E2.6207-2RST
	80	21	33,8	19	0,83	20 000	11 000	0,48	E2.6307-2Z

Rodamiento rígido a bolas 6006-2RSR

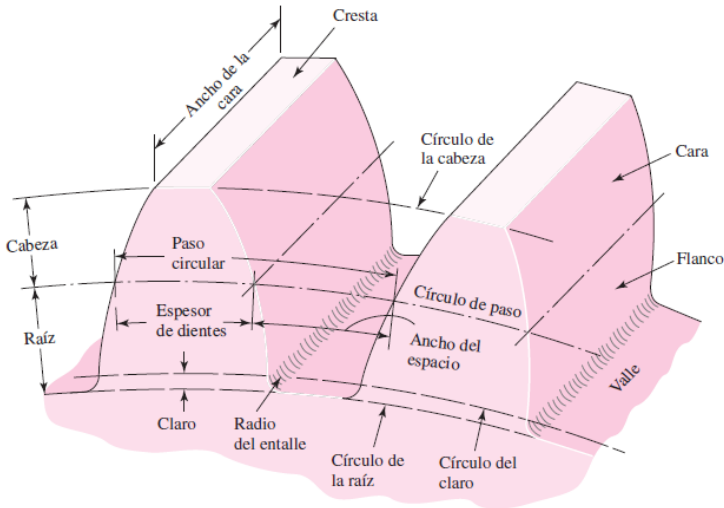
medidas principales según DIN 625-1, obturación de labio en ambos lados



d	30 mm	
D	55 mm	
B	13 mm	
D ₂	49,2 mm	
D _{a max}	50,4 mm	
d ₁	38,3 mm	
d _{a min}	34,6 mm	
r _{a max}	1 mm	
r _{min}	1 mm	
m	0,126 kg	Peso
C _r	13500 N	Capacidad de carga dinámica, radial
C _{0r}	8000 N	Capacidad de carga estática, radial
n _G	7000 1/min	Velocidad límite
C _{ur}	390 N	Carga límite de fatiga, radial

Fuente: Catalogo SKF – Rodamientos rígidos de bolas

ANEXO 9: NOMENCLATURA PARA ENGRANES RECTOS



NOMENCLATURA FORMULAS		
Módulo (m)	Relación entre diámetro de paso y el número de dientes.	$m = \frac{dp}{N}$
Paso Diametral (P)	Relación entre número de dientes y el diámetro de paso.	$P = \frac{N}{dp}$
Paso Circular (Pc)	Relación entre el producto de Pi por el diámetro de paso entre el número de dientes.	$Pc = \frac{\pi dp}{N} = \pi * m$
Altura de Cabeza (hc)	Toma el valor del módulo.	$hc = m$
Altura de Pie (hp)	Toma el valor de 1,25 veces el módulo.	$hp = 1,25 * m$
Diámetro Ext. (Dex)	Diámetro de paso más dos veces la altura de cabeza.	$D_{ex} = dp + 2hc$
Diámetro Int. (Din)	Diámetro de paso menos dos veces la altura de pie.	$D_{in} = dp - 2hp$
Relación de transmisión (r)	ω_1 =vel. Angular rad/s n =vel. Angular rpm. dp = diámetro primitivo. N = número de dientes.	$r = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{dp_2}{dp_1} = \frac{N_2}{N_1}$

Fuente: (Mott, 2006) _ Nomenclatura de fórmulas para el cálculo de engranes rectos.

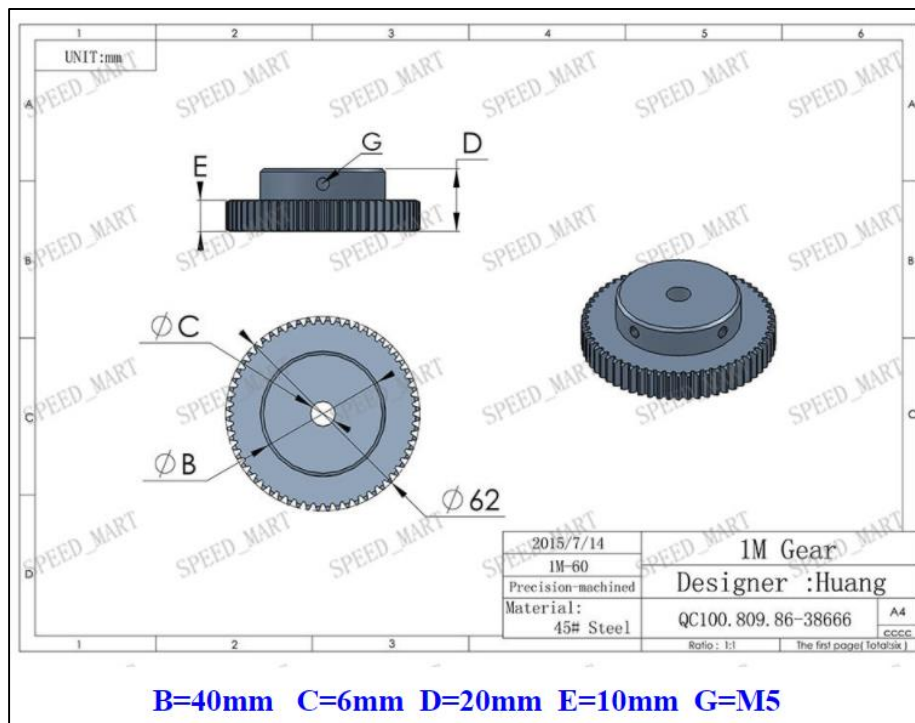


Figura 63 Datos técnicos del engrane

<http://www.ebay.com/itm/141735089221#rpdCntId>

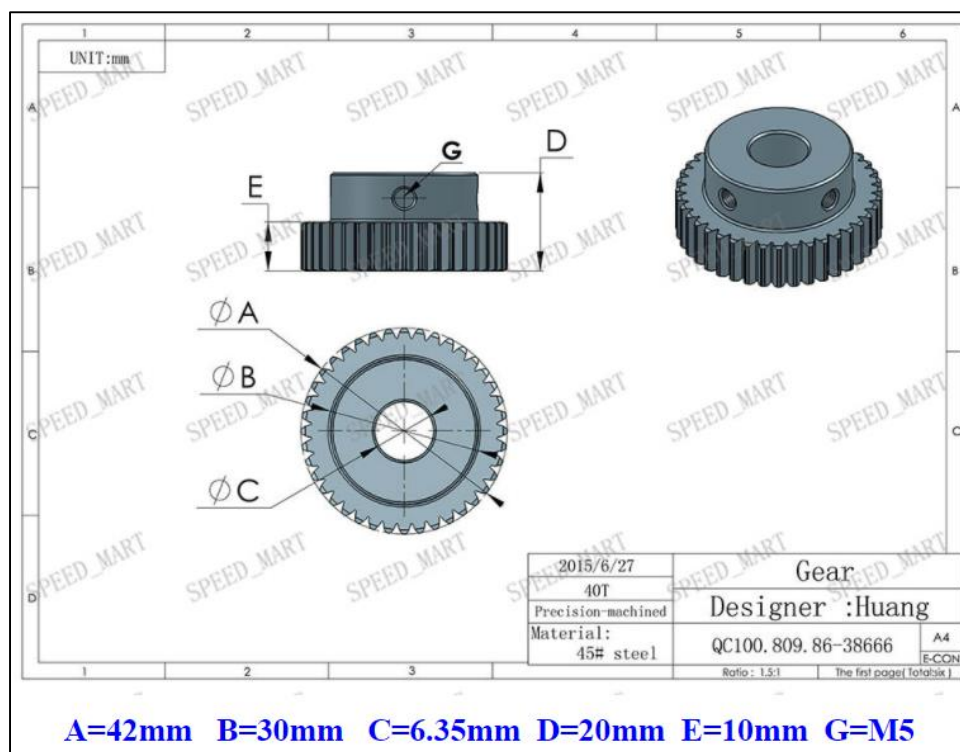


Figura 64 Datos técnicos de piñón

<http://www.ebay.com/itm/262744422967>

DATOS A TOMAR PARA EL DISEÑO DE ENGRANES EN SOLIDWORKS		
ENGRANE		PIÑÓN
$D_{intmm} := D_{int} \cdot 1 \text{ in}$ $D_{intmm} = 60.325 \text{ mm}$	paso circular $P_{cmm} = 3.99 \text{ mm}$	$D_{intcmm} := d_{int} \cdot 1 \text{ in}$ $D_{intcmm} = 38.735 \text{ mm}$
$D_{pmm} := D_p \cdot 1 \text{ in}$ $D_{pmm} = 63.5 \text{ mm}$	razon de engrane $mG = 1.515$	$D_{pcmm} := D_{pc} \cdot 1 \text{ in}$ $D_{pcmm} = 41.91 \text{ mm}$
$D_{extmm} := D_{ext} \cdot 1 \text{ in}$ $D_{extmm} = 66.04 \text{ mm}$	torque $T = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$	$D_{extcmm} := d_{ext} \cdot 1 \text{ in}$ $D_{extcmm} = 44.45 \text{ mm}$
Número de dientes $N_e = 50$ $\text{modulo1} = 1.27 \text{ mm}$	distancia - centros $C_{mm} = 52.705 \text{ mm}$	Número de dientes $N_p = 33$ $\text{modulo2} = 1.27 \text{ mm}$

Figura 65 Parámetros para el diseño de engranajes rectos

Se diseñó también como opción para el sistema de transmisión los engranes para ser fabricados en material duralón o nylon si no existiera la posibilidad de adquirirlos a través de catálogos y en centros de especializados. Los datos a tomarse en consideración se muestran en la Figura 63.

ANEXO 10: Programación en matlab para el análisis cinemático y 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.

%Se obtiene el valor de las masas de cada eslabón

L1.m=str2num(get_param('brazo4/Base-2','mass'));

L2.m=str2num(get_param('brazo4/Hombro2-3','mass'));

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 inercia para cada eslabón.

L2.I=str2num(get_param('brazo4/Hombro2-3','inertia')); %

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 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 11: Diagramas de bloques en Simulink-Matlab para el análisis cinemático – dinámico

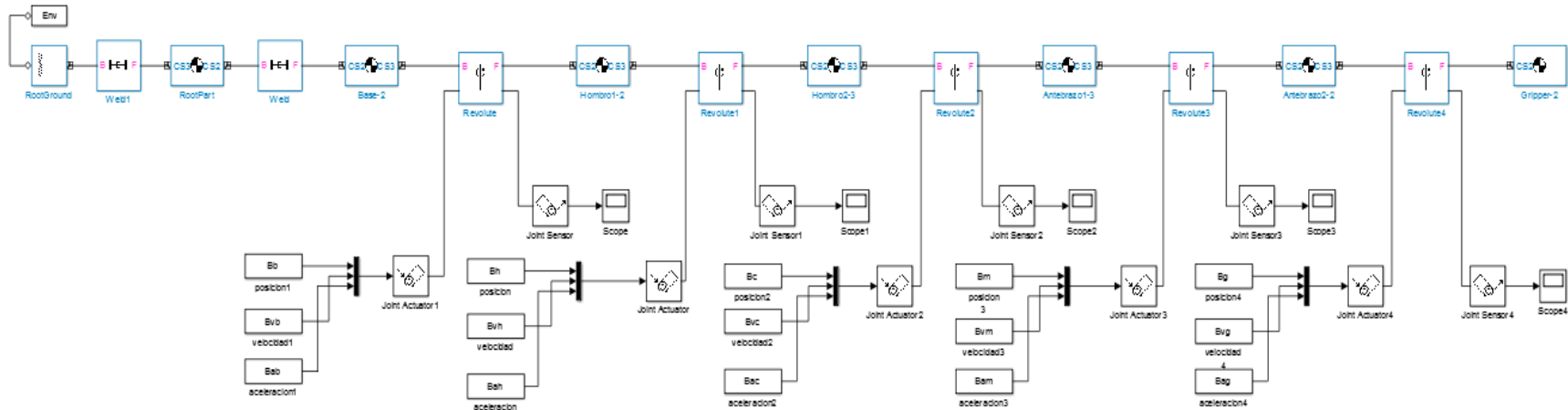


Figura 66 Bloques de programación en Matlab para el análisis dinámico del brazo robótico

En la Figura 66 se observa los bloques de programación de las articulaciones de base, hombro, codo, muñeca y giro con sus respectivos bloques adicionales para realizar el análisis cinemático – dinámico del brazo robótico UTN.

ANEXO 12: Interfaz gráfica de la programación general del brazo robótico UTN

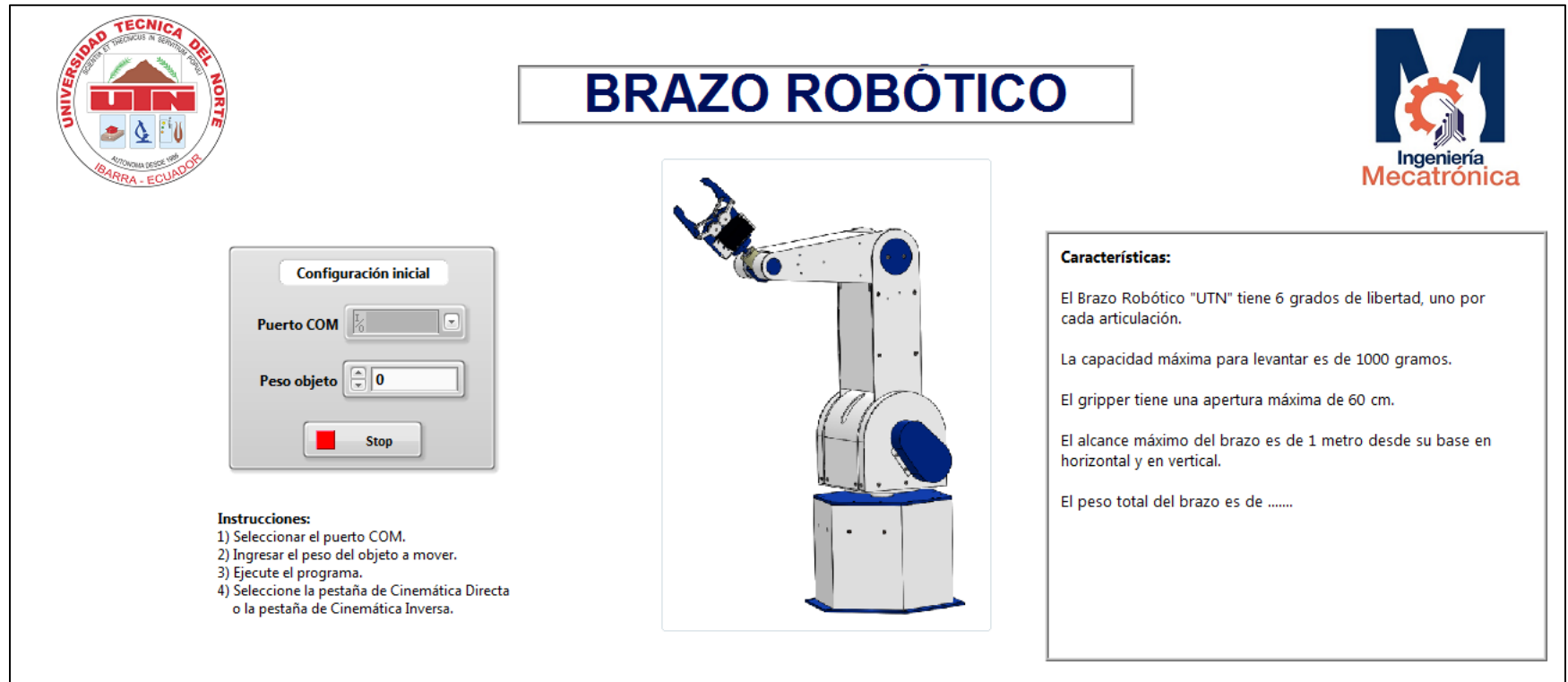


Figura 67 Pantalla principal de la interfaz gráfica de programación del brazo robótico UTN en LabVIEW

En la Figura 67 se observa la pantalla principal de programación para el brazo robótico UTN, se debe ingresar el peso del objeto el cual será de 1 kg como máximo y seleccionar el puerto COM de comunicación del computador. Se debe realizar estos pasos previos para que el programa corra y se pueda operar el brazo, caso contrario el brazo no funcionara por problemas de conexión.

Operación manual

BASE 180 0 Home

HOMBRO 90 0 Home

CODO Encoder 0 -120 Home

MUÑECA 90 -90 Home

GIRO MUÑECA 300 0 Home

GRIPPER Abrir hasta: 150 Sensor de fuerza 0

Home

Gripper

Stop

Instrucciones:

- 1) Presione el botón HOME.
- 2) Mover las perillas para ubicar al brazo en la ubicación deseada.
- 3) La ubicación del Gripper en el espacio se representa en el recuadro "Localización espacial".
- 4) Presione el botón GRIPPER para abrir o cerrar la pinza y tomar el objeto.
- 5) Si desea finalizar el programa presione STOP caso contrario cambie de pestaña.

Localización espacial

X 0 Y 0 Z 0 Giro Muñeca 0

CINEMÁTICA DIRECTA:

El problema cinemático directo plantea la resolución de matrices con el fin de encontrar la localización en el espacio del efector final "Gripper" ingresando valores a los ángulos de cada articulación.

El Brazo Robótico UTN puede moverse libremente hasta 100cm desde su base en los ejes X, Y, Z como muestra la figura "localización espacial".

Nota. Los límites angulares para cada articulación están determinados en cada perilla, no mover ninguna sin antes haber puesto a HOME el brazo.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
SANGA, ECUADOR

Ingeniería Mecatrónica

Figura 68 Pantalla de operación general del brazo robótico UTN en LabVIEW

En la Figura 68 se observa la interfaz de programación para todas las articulaciones del brazo robótico UTN. Se debe ingresar valores angulares a cada articulación y presionar el botón home para iniciar el movimiento. Se usa un botón extra en el Gripper para realizar la acción de abrir y cerrar.

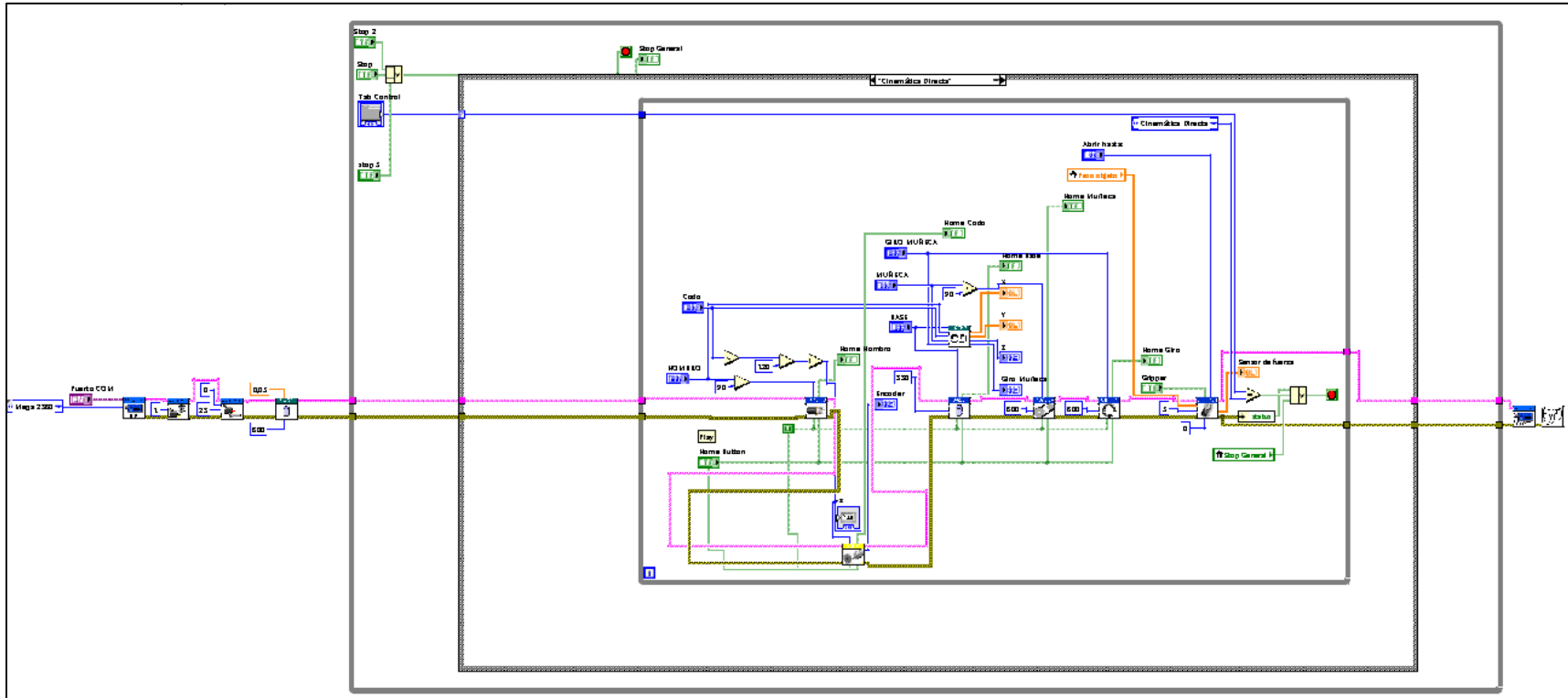


Figura 69 Programación Completa del brazo robótico UTN

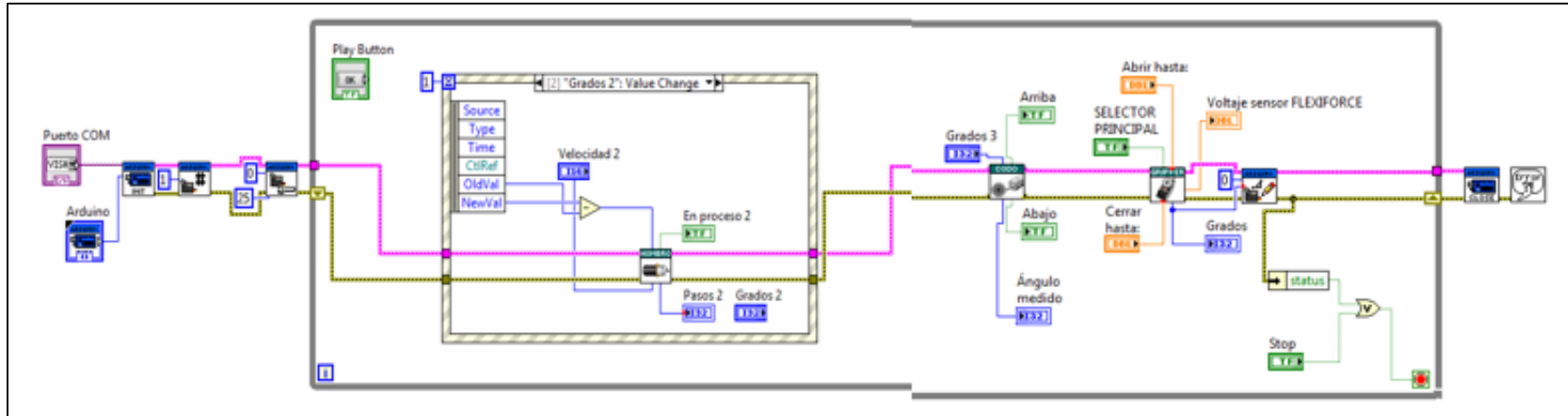


Figura 70 Programación completa simplificada del brazo robótico UTN

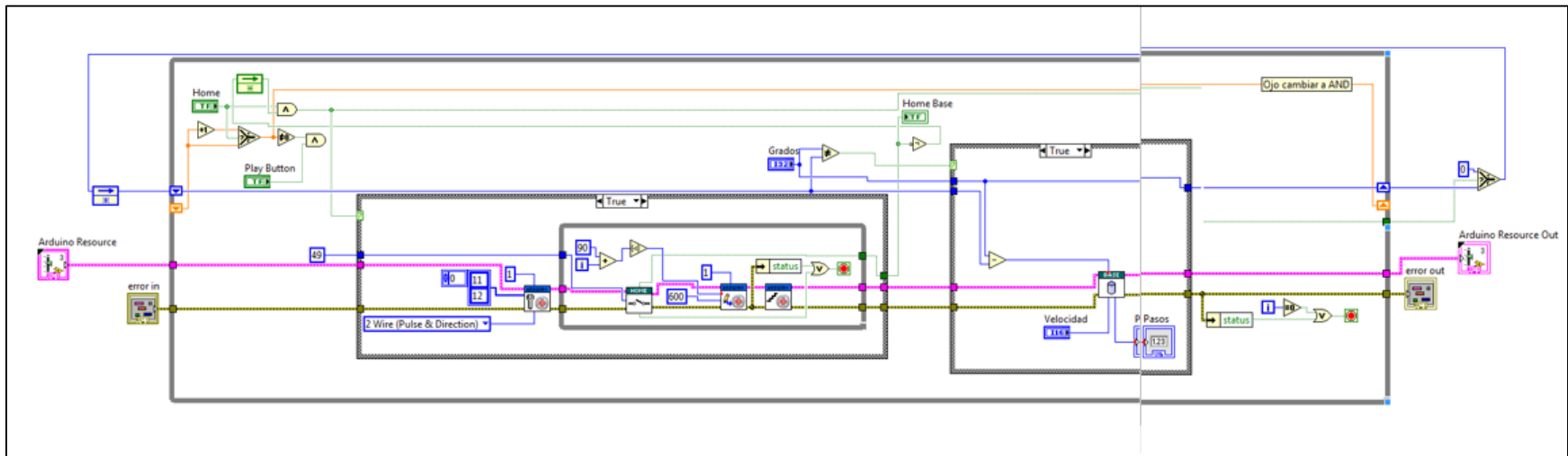


Figura 71 SubVI de la programación para la posición de inicio de la base