



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

TEMA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ESLABÓN Y ARTICULACIÓN DE
HOMBRO PARA EL BRAZO ROBÓTICO “UTN”**

AUTOR

Alex Danilo Bastidas Jácome

DIRECTOR

Ing. Diego Ortiz

Ibarra – Ecuador

Septiembre 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. 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:	100350773-6
Apellidos y Nombres:	Bastidas Jácome Alex Danilo
Dirección:	Otavaló, Urb. El Valle, Manuel Díaz 114 y Pedro Ortiz
E-mail:	adbastidas@utn.edu.ec
Teléfono fijo:	06 292-6797
Teléfono móvil:	0993055180

DATOS DE LA OBRA	
Título:	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ESLABÓN Y ARTICULACIÓN DE HOMBRO PARA EL BRAZO ROBÓTICO "UTN"
Autor:	Bastidas Jácome Alex Danilo
Fecha:	18/09/2017
Programa:	Pregrado
Título por el que opta:	Ingeniería en Mecatrónica
Director:	Ing. Diego Ortiz

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

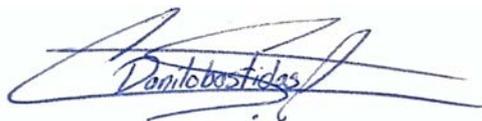
Yo, Alex Danilo Bastidas Jácome, con cédula de identidad Nro. 100350773-6, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación 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 del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior, Artículo 144.

3. 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 asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 18 días del mes septiembre del 2017

EL AUTOR

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Danilobastidas', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Firma

Nombre: Alex Danilo Bastidas Jácome

Cédula: 100350773-6



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

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

Yo, Alex Danilo Bastidas Jácome, con cédula de identidad Nro. 100350773-6, 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 de la obra o trabajo de grado denominado "Diseño y Construcción del Eslabón y Articulación de Hombro para el Brazo Robótico "UTN"", que ha sido desarrollada para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato impreso y digital en la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

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

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Danilobastidas", is written over a horizontal line.

Firma

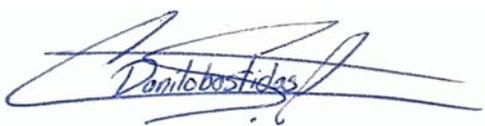
Nombre: Alex Danilo Bastidas Jácome

Cédula: 100350773-6

DECLARACIÓN

Yo, ALEX DANILO BASTIDAS JÁCOME, declaro que el trabajo aquí descrito es de mí autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y certifico la veracidad de las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de a presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte – Ibarra, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Danilo Bastidas', is written over a light blue rectangular background. The signature is stylized and cursive.

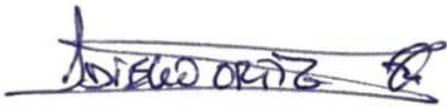
Firma

Nombre: Alex Danilo Bastidas Jácome

Cédula: 100350773-6

CERTIFICACIÓN

En calidad de Director del Trabajo de Grado "*Diseño y Construcción del Eslabón y Articulación de Hombro para el Brazo Robótico UTN*", presentado por el señor Alex Danilo Bastidas Jácome, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico en honor a la verdad que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "DIEGO ORTIZ", is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a small flourish at the end.

Ing. Diego Ortiz
DIRECTOR

DEDICATORIA

Para mis padres Pablo y Adriana, quienes siempre han estado junto a mí y me han apoyado en cualquier decisión, aventura o meta que me he propuesto; siempre a mi lado paso a paso, caída tras caída y triunfo tras triunfo. Esto es por y para ustedes.

Para mis hermanos Andrés y Pamela, siempre me han dicho que soy su fuente de inspiración y eso me ha motivado a ser un buen modelo a seguir. Hoy siento que ustedes me han dado más a mí que yo a ustedes y soy el hermano más orgulloso del mundo.

Para Gabriela, llegaste a mi vida para llenarla de amor e inspiración, me motivaste a no rendirme nunca incluso sacrificando momentos juntos, por ello y más, hoy te dedico este triunfo con la ilusión de seguir cosechando muchas metas más de tu mano.

Para quien lea esta dedicatoria, siempre luchen por sus sueños, sepan que quien sabe luchar y nunca rendirse podrá alcanzar cosas grandes o experiencias inolvidables.

Sueña...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Técnica del Norte que me abrió las puertas a un mundo de conocimiento y sabiduría. A la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas y en especial a la carrera de Ingeniería en Mecatrónica quienes supieron aportar en formación académica y profesional. *“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”* (Albert Einstein).

A mis padres que priorizaron mi educación por sobre cualquier cosa y con mucho esfuerzo me apoyaron en más de un sentido para la consecución de esta meta. Sin su apoyo nada de esto sería posible. El legado que me han entregado va más allá del conocimiento científico y tecnológico. *“Educación es lo que queda después de olvidar lo que se ha aprendido en la escuela”* (Albert Einstein).

A mis hermanos, a mi novia, a mis tías y tíos, a mis primos, demás familiares y amigos, quienes estuvieron al pendiente del avance de este proyecto y en más de una ocasión me supieron brindar palabras de aliento y me ayudaron a jamás desanimarme. Creo que el resultado final cumplió y supero las expectativas.

Al Ingeniero Diego Ortiz por asumir el reto de crear el primer prototipo de brazo robótico creado en la UTN. Gracias por confiar en mi persona para la ejecución de este proyecto y siempre motivarme a alcanzar objetivos más altos. *“Si no puedes volar entonces corre, si no puedes correr entonces camina, si no puedes caminar entonces arrástrate, pero haz lo que hazas, sigue moviéndote hacia adelante”* (Martin Luther King).

RESUMEN

Los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte no cuentan con un manipulador robótico donde los estudiantes puedan poner en práctica sus conocimientos teóricos, por lo tanto, en el presente trabajo se realiza el diseño y construcción del eslabón del brazo y la articulación de hombro que es parte del proyecto general “Brazo Robótico UTN”.

Se realiza el diseño en base a la morfología de brazos robóticos comerciales y con la premisa de que tiene que levantar un kilogramo de peso como carga y el peso de los otros elementos constitutivos. Otra determinante en el diseño es que debe ser adaptable por la parte superior al antebrazo y por la parte inferior a la base.

Después del análisis del diseño estructural y de la transmisión se realiza la comprobación utilizando herramientas de análisis numérico con el fin de validar el diseño. Se realizan los planos de acuerdo a la normativa INEN y se procede a la construcción del prototipo, para que esté disponible para la unión con las demás piezas constitutivas del Brazo Robótico UTN.

ABSTRACT

The laboratories of the Mechatronics Engineering career at the Técnica del Norte university don't have a robotic manipulator where students can put their theoretical knowledge into practice, for that reason, is presented the design and construction of the arm link and the shoulder joint that is part of the "UTN Robotic Arm" project.

The design is made based on the morphology of commercial robotic arms and with the premise that it must lift one kilogram of weight as load and the weight of the other constituent elements. Another determinant in the design is that it must be adaptable from the upper to the forearm and from the bottom to the base.

After the analysis of the structural design and the transmission, the verification is carried out using numerical analysis tools to validate the design. The planes are made per INEN regulations and the prototype is built, so that it is available for joining with the other constituent parts of the UTN Robotic Arm.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
PORTADA	I
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UTN	II
CESIÓN DE DERECHOS A FAVOR DE LA UTN	IV
DECLARACIÓN	V
CERTIFICACIÓN	VI
DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTOS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
ÍNDICE GENERAL	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
ÍNDICE DE ECUACIONES	XVIII
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema	1
Objetivos del proyecto	1
Objetivo general	1
Objetivos específicos	2
Justificación	2
Alcance	2
Estado del arte	3
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO	5
1.1. Robot manipulador	5
1.2. Clasificación de los robots manipuladores	6

1.3.	Estructura de los robots manipuladores.....	6
1.3.1.	Tipos de articulaciones.....	8
1.3.2.	Grado de Libertad (G.D.L.).....	9
1.3.3.	Parámetros de un brazo robótico	10
1.3.3.1.	Número de Grados de Libertad.....	10
1.3.3.2.	Volumen de trabajo	10
1.3.3.3.	Resolución espacial.	11
1.3.3.4.	Exactitud.....	11
1.3.3.5.	Repetibilidad.....	11
1.3.3.6.	Capacidad de Carga	11
1.4.	Brazo Robótico “UTN”	11
1.5.	Materiales.....	13
1.6.	Cinemática	14
1.6.1.	Cinemática Directa.....	14
1.6.2.	Cinemática Inversa.....	16
1.7.	Actuador	16
1.7.1.	Motores Eléctricos.....	17
1.7.1.1.	Motor DC.....	17
1.7.1.2.	Servomotor.....	17
1.7.1.3.	Motor de pasos.....	17
1.7.1.4.	Controlador CI para motores de pasos	18
1.7.2.	Transmisión.....	19
1.8.	Arduino MEGA 2560	20
1.9.	Sensores	20
1.9.1.	Sensor de contacto	20
1.10.	Sistema de Control.....	21
1.10.1.	Sistemas de control en lazo cerrado.....	21

1.10.2.	Sistemas de control en lazo abierto	22
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA		23
2.1.	Parámetros y Requisitos	23
2.1.1.	Parametrización del hombro	23
2.1.2.	Parametrización del brazo	23
2.1.3.	Parametrización del actuador	24
2.2.	Diseño	24
2.2.1.	Análisis estático.....	24
2.2.1.1.	Cargas.....	24
2.2.1.2.	Reacciones.....	25
2.2.1.3.	Momentos.....	27
2.2.2.	Diseño de la transmisión	28
2.2.2.1.	Catarinas	28
2.2.3.	Diseño del eje.....	28
2.2.3.1.	Diámetros del eje	31
2.2.4.	Selección de rodamientos	33
2.2.4.1.	Selección de los rodamientos del catálogo SKF	33
2.2.5.	Espesor de plancha.....	34
2.2.5.1.	Diseño por esfuerzos de contacto o aplastamiento	34
2.2.5.2.	Selección de materiales	35
2.3.	Adquisición, construcción y ensamblaje	36
2.3.1.	Diseño asistido por computadora.....	37
2.3.2.	Análisis del diseño mediante técnicas numéricas	39
2.3.2.1.	Condiciones de frontera	39
2.4.	Automatización del prototipo	41
2.4.1.	Modelo cinemático directo.....	41
2.4.2.	Modelo cinemático inverso.....	43

2.4.3.	Selección del motor.....	44
2.4.4.	Selección del motor a pasos.....	45
2.4.4.1.	Caja reductora planetaria 57HS76304-XG15-100.....	46
2.4.5.	Control de un motor a pasos.....	47
2.4.5.1.	Driver HY DIV268N-5A.....	47
2.4.6.	sistema de control.....	48
2.4.6.1.	Tarjeta de adquisición de datos.....	48
2.4.7.	Programación.....	49
2.4.7.1.	Subrutinas.....	50
CAPÍTULO III. RESULTADOS.....		51
3.1.	Diseño del hombro para brazo robótico “UTN”.....	51
3.1.1.	Análisis de elementos finitos.....	52
3.1.1.1.	Factor de seguridad.....	53
3.1.1.2.	Desplazamiento.....	53
3.1.1.3.	Esfuerzo máximo de Von Mises.....	54
3.2.	Construcción y ensamblaje.....	54
3.3.	Comprobación de la cinemática por software.....	58
3.4.	Pruebas de repetitividad.....	60
3.5.	Pruebas de precisión.....	61
CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		63
4.1.	Conclusiones.....	63
4.2.	Recomendaciones.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		65
ANEXOS.....		67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los robots manipuladores	6
Figura 2. Clasificación de los manipuladores según su configuración.	7
Figura 3. Comparativa de la morfología entre un brazo humano y uno robótico.	7
Figura 4. Tipos de articulaciones y sus grados de libertad.....	8
Figura 5. Volumen de trabajo del robot manipulador IRB 120 de ABB.	10
Figura 6. Partes constitutivas del B.R. “UTN”	12
Figura 7. Gráfica de materiales límite elástico – densidad	13
Figura 8. Gráfica de materiales densidad – precio	14
Figura 9. Parámetros Denavit - Hartenberg.....	14
Figura 10. Sistema de actuador.....	16
Figura 11. Motor de Pasos	18
Figura 12. Puente H.....	19
Figura 13. Arduino MEGA 2560.....	20
Figura 14. Final de carrera tipo rodillo	21
Figura 15. Diagrama de bloques de un sistema de control cerrado.	21
Figura 16. Diagrama de bloques de un sistema de control abierto.	22
Figura 17. Diagrama de los miembros superiores.....	24
Figura 18. Diagrama de cuerpo libre Nota. Unidades en mm	25
Figura 19. Descomposición de reacciones con un ángulo	26
Figura 20. Diseño del eje.....	29
Figura 21. Disposición de la catarina en el punto A.	29
Figura 22. Fuerzas aplicadas en el eje. Vista en perspectiva	30
Figura 23. Diagramas de fuerzas cortantes y momentos flexionantes.....	31
Figura 24. Rodamientos rígidos de una hilera de bolas	34
Figura 25. Modo de falla por aplastamiento	34
Figura 26. Condiciones de borde.....	40

Figura 27. Empotramiento en la base.....	40
Figura 28. Fuerzas externas aplicadas el brazo.....	41
Figura 29. Diagrama de bloques cinemático del B.R. "UTN"	42
Figura 30. DCL para la cinemática inversa.....	43
Figura 31. NEMA 23HS7628	46
Figura 32. Caja planetaria 100:1	46
Figura 33. Driver HY DIV268N-5A.....	47
Figura 34. Esquema electrónico	48
Figura 35. Flujograma control de hombro.....	49
Figura 36. SubVI control de hombro.....	50
Figura 37. Modelo 3D del hombro para el B.R. "UTN".	51
Figura 38. Vista del armazón del prototipo	52
Figura 39. Análisis de convergencia.....	53
Figura 40. Factor de seguridad.....	53
Figura 41. Desplazamiento del modelo	54
Figura 42. Esfuerzo máximo	54
Figura 43. Corte de los laterales para hombro y brazo	55
Figura 44. Torneado del eje en acero AISI 4340.....	55
Figura 45. Torneado porta-rodamiento en nylon	55
Figura 46. Brida de sujeción, porta-rodamiento y eje terminados	56
Figura 47. Ensamblaje del brazo y hombro con el BRUTN	56
Figura 48. Brazo Robótico UTN.....	57
Figura 49. Parámetros DH comprobados por software.	58
Figura 50. Representación 3D del BRUTN.....	58
Figura 51. Matriz Homogénea para una traslación.....	59
Figura 52. Brazo Robótico después de su primer movimiento	59
Figura 53. Trayectoria recorrida durante un ciclo de trabajo	60

Figura 54. Pruebas de repetitibilidad	61
Figura 55. Marcas graduadas para pruebas de precisión	61
Figura 56. Datos obtenidos de las pruebas de precisión.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características y parámetros del B.R “UTN”	13
Tabla 2. Parámetros del hombro	23
Tabla 3. Parámetros del brazo	23
Tabla 4. Descripción de los elementos de la Figura 17.....	25
Tabla 5. Características de las catarinas.....	28
Tabla 6. Propiedades del acero AISI 4340	32
Tabla 7. Diámetros	32
Tabla 8. Rodamientos rígidos de una hilera de bolas	34
Tabla 9. Comparativa de materiales.....	36
Tabla 10. Materiales del hombro y brazo del BRUTN	37
Tabla 11. CAD de los elementos de brazo y hombro	37
Tabla 12. Materiales para el análisis	39
Tabla 13. Parámetros Denavit - Hartenberg.....	42
Tabla 14. Comparativa de motores	45
Tabla 15. Características de tres motores de pasos bipolares.....	45
Tabla 16. Características de la caja planetaria 57HS76304-XG15-100.....	46
Tabla 17. Análisis de convergencia del modelo	52
Tabla 18. Pruebas de repetitividad	60
Tabla 19. Resultados de las pruebas de precisión.....	62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Número de grados de libertad en mecanismos planos.....	9
Ecuación 2. Número de G.D.L. para mecanismos espaciales.	9
Ecuación 3. Transformación Homogénea para cada eslabón.....	15
Ecuación 4. Reacciones en el punto D para distintos ángulos.....	26
Ecuación 5. Fórmula general del torque.....	27
Ecuación 6. Torque en la articulación de hombro	27
Ecuación 7. Diámetro primitivo de una catarina.	28
Ecuación 8. Diámetro de un eje.....	31
Ecuación 9. Resistencia a la fatiga estimada real	32
Ecuación 10. Cálculo de la vida nominal de un rodamiento	33
Ecuación 11. Área de aplastamiento	35
Ecuación 12. Perímetro en la zona de aplastamiento	35
Ecuación 13. Esfuerzo de aplastamiento en perforaciones.....	35
Ecuación 14. Grados a pasos.....	50
Ecuación 15. Error porcentual	61

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La revolución industrial fue dada por la explotación de obreros a los cuales se les obligaba a trabajar en procesos en serie durante largas horas y con salarios muy bajos. Esta violación de derechos dio 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, cansancio, enfermedades o vacaciones.

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

Considerando lo anteriormente expuesto es fundamental que las universidades capaciten a sus ingenieros (especializados en la industria) en sistemas de brazos robóticos. Lastimosamente en la actualidad la carrera de Ingeniería en Mecatrónica no cuenta con un Brazo Robótico experimental que permita al estudiante y docente poner en práctica la teoría de su funcionamiento.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir el eslabón y la articulación de hombro para un prototipo de brazo robótico para el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros y requisitos de funcionamiento del eslabón y hombro para articularse al brazo robótico "UTN".
- Diseñar los componentes mecánicos y de la estructura del hombro para el Brazo Robótico "UTN"
- Construir y ensamblar los elementos mecánicos para el eslabón y hombro del Brazo Robótico "UTN"
- Realizar el diseño del sistema de control de la articulación de hombro para el Brazo Robótico "UTN".

JUSTIFICACIÓN

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 en donde ellos pueden aprender a desempeñar tareas relacionadas con las cadenas de producción y la logística empleada en un proceso.

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

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

A su vez los docentes podrán disponer de una herramienta didáctica que les facilite el proceso de enseñanza y valide los conocimientos dados en la pizarra con un objeto funcional.

ALCANCE

La construcción de un prototipo de brazo robot articulado, será realizada de tal manera que el usuario pueda asignar tareas para que el manipulador las ejecute. La

información para poder realizar una tarea será administrada a través de un computador y estará constituida por coordenadas iniciales, en las que se encuentra el objeto o pieza que se desea mover, y las coordenadas finales, el lugar hacia el cual se desea mover la pieza de trabajo.

El brazo robótico estará diseñado para trabajar con una capacidad de carga máxima de un kilogramo y será capaz de alcanzar objetos a una distancia entre 70 a 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.

La articulación de hombro será activada con un motor con una relación de transmisión especial para alto torque, pues como análisis inicial se considera que este será un punto crítico de diseño. Se realizará un estudio para determinar el material más adecuado para el eslabón adjunto al hombro, siguiendo las consideraciones de peso y resistencia.

ESTADO DEL ARTE

La robótica industrial en conjunto se ha enfocado en los robots manipuladores pues la mayoría de industrias automatizadas de hoy en día cuentan con varios brazos robóticos con el fin de incrementar la velocidad y calidad de producción.

Los Brazos Robóticos han pasado por largos procesos de investigación y mejoramiento para conseguir modelos de gran capacidad de trabajo y por sobretodo velocidad de respuesta. Están por ejemplo entre sus primeros diseños el brazo robótico de "Labvolt" que utilizaba motores PAP y correas dentadas para su transmisión de movimiento; seguido a este destaco el modelo "Pegasus" que siguió la misma base mecánica de su predecesor, pero en este aparecieron por primera vez en brazos robóticos el control por servomotores.

En la actualidad los robots de la marca "KUKA" son quienes dominan el mercado en cuando a manipuladores se trata; entre algunas de sus características es que son brazos completamente industriales, con altas capacidades de carga, repetitividad mínima y programación y control bastante intuitivos y fáciles de manipular. Además de que ofrecen diversos elementos terminales(Grippers) para distintas operaciones en la industria como pinzas, soldadores, pintores, cortadoras, taladros,

succionadores, etc.; con la gran ventaja de que todos estos son acoplables y se puede disponer de ellos cuando la actividad lo requiera.

Los avances que se están dando en este campo es la integración de visión artificial a estos sistemas con el fin de que puedan ser cada vez más autónomos y no necesiten retroalimentación por parte de un operador. Además, se están incluyendo velocidades de trabajo y de respuesta casi instantáneas superando en mucho al trabajo de un tradicional operador manual.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ROBOT MANIPULADOR

Resulta complejo adaptar una sola definición que abarque todo lo que representan los manipuladores industriales; se debe en gran parte a la velocidad de avance tecnológico que sufren estas máquinas o la difícil globalización de conceptos entre mercados especialmente el americano, el alemán y el japonés. A continuación, se cita algunas definiciones que, a pesar de haber sido propuestas a finales del siglo pasado, son valideras para los manipuladores industriales de la actualidad; pues, enmarcan sus características y descripciones más generales.

La definición de mayor acogida es la propuesta por la Asociación de Industrias de Robótica (RIA - Robotic Industry Association, 1980), según la cual: "Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas".

Una definición más precisa es la que presenta la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR, 1983) que propuso dos definiciones por separado:

- **Manipulador:** 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.
- **Robot:** manipulador automático servo-controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material.

La ISO (Organización Internacional de Estándares) bajo la norma ISO 8373:1994 adopta definición de la RIA y la modifica; proponiendo: "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".

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS MANIPULADORES

Al ser complejo instituir una definición que se adapte a todos los tipos de manipuladores existentes se los clasifica para darles definiciones independientes. Después de investigar a varios autores sobre el tema se presenta un cuadro resumen (*Figura 1*) de la clasificación de los tipos de brazos robóticos.

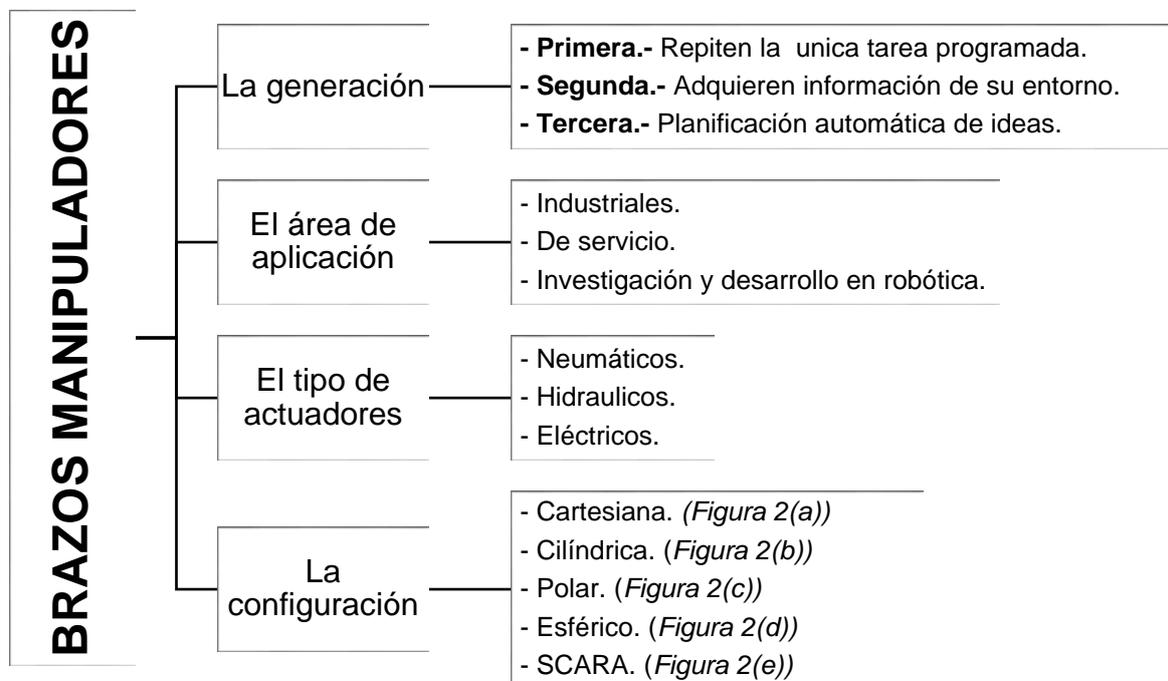


Figura 1. Clasificación de los robots manipuladores

1.3. ESTRUCTURA DE LOS ROBOTS MANIPULADORES

Los robots manipuladores industriales, semi industriales o educativos constan de una secuencia de elementos estructurales rígidos, denominados *eslabones*, conectados entre sí mediante juntas o *articulaciones*, permitiendo de esta manera el movimiento de dos eslabones consecutivos. Cada articulación debe tener por lo menos un grado de libertad (G.D.L.), es decir movimientos independientes con

respecto a la anterior. La unión de eslabones y articulaciones se denomina *cadena cinemática*.

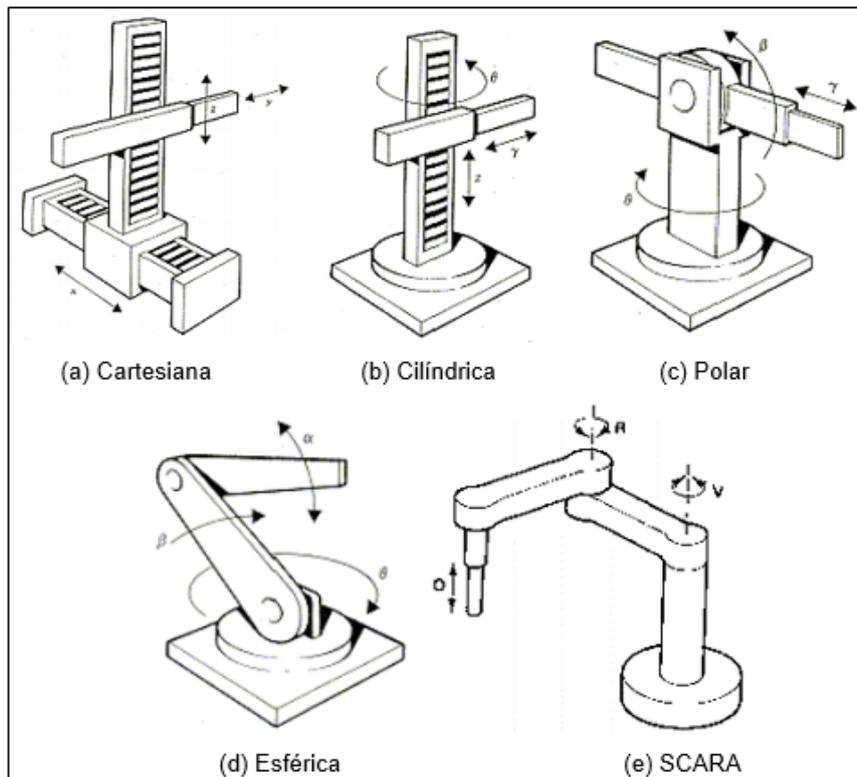


Figura 2. Clasificación de los manipuladores según su configuración.
Fuente: (Jabonero Cámara, 2010)

Se dice que una cadena cinemática es abierta si, numerando secuencialmente los enlaces desde el primero, cada enlace está conectado mediante articulaciones exclusivamente al enlace anterior, y al siguiente, excepto el primero, que se suele fijar al suelo, y el último, uno de cuyos extremos queda libre y equipado con una herramienta apropiada para manipular objetos. (Córdova & Stalin, 2009)

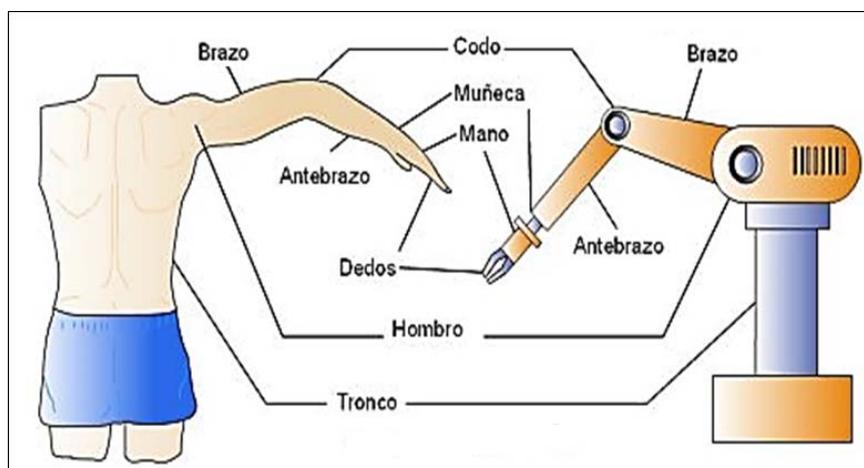


Figura 3. Comparativa de la morfología entre un brazo humano y uno robótico.
Fuente: (Bueno, 2015)

Un robot manipulador es denominado también brazo robótico pues su estructura se asemeja a la de un brazo humano (*Figura 3*). Es un manipulador compuesto por eslabones y articulaciones formando una cadena cinemática abierta. Con la particularidad de que en su extremo se coloca un elemento terminal o efector final como una pinza (gripper) o algún dispositivo especial para alguna tarea específica.

1.3.1. TIPOS DE ARTICULACIONES

En robótica existen varias articulaciones con el fin de dar movimiento o G.D.L. a un elemento o una serie de elementos. En la *Figura 4*, se describe los grados de libertad y el tipo de articulaciones que se encuentra en los manipuladores.

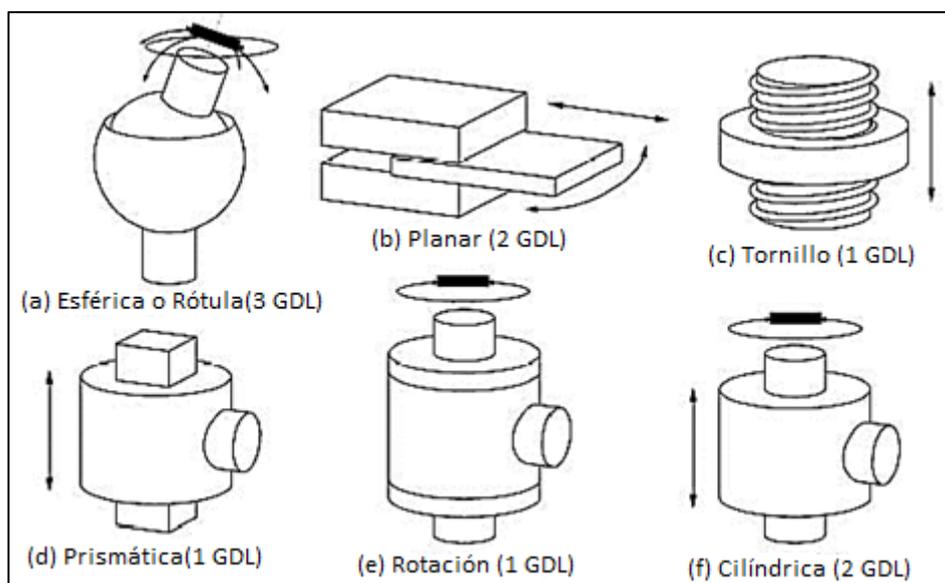


Figura 4. Tipos de articulaciones y sus grados de libertad.

Fuente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2007)

- La *articulación esférica* combina tres giros en tres direcciones perpendiculares en el espacio.
- La *articulación planar* está caracterizada por el movimiento de desplazamiento en un plano, existiendo dos grados de libertad.
- La *articulación de tornillo* provee al sistema de un grado de libertad lineal pues no se considera al giro a través del tornillo.
- En la *articulación prismática* el grado de libertad consiste en una traslación a lo largo del eje de la articulación.

- e) La *articulación de rotación* suministra un grado de libertad consistente en una rotación alrededor del eje de la articulación.
- f) En la *articulación cilíndrica* existen dos grados de libertad: una rotación y una traslación.

1.3.2. GRADO DE LIBERTAD (G.D.L.)

Se denomina grado de libertad (DOF, por sus siglas en inglés) a cada una de las coordenadas independientes que son necesarias para describir el estado del sistema mecánico del robot (posición y orientación en el espacio de sus elementos). Normalmente, en cadenas cinemáticas abiertas, cada par eslabón-articulación tiene un solo grado de libertad, ya sea de rotación o de traslación. Pero una articulación podría tener dos o más G.D.L. que operan sobre ejes que se cortan entre sí. (CFIE, 2015)

El número de grados de libertad se obtiene con el criterio de Grübler – Kutzbach:

Ecuación 1. Número de grados de libertad en mecanismos planos

$$m = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2$$

Fuente: (Pérez González, 2008)

Donde:

- m , movilidad.
- n , número de elementos (eslabones, barras, piezas, etc.) de un mecanismo.
- j_1 , número de uniones de 1 grado de libertad.
- j_2 , número de uniones de 2 grados de libertad.

Para el caso de mecanismos espaciales la *Ecuación 1*, sufre una variación:

Ecuación 2. Número de G.D.L. para mecanismos espaciales.

$$m = 6 \cdot (n - 1) - \sum_i j_i$$

Fuente: (Pérez González, 2008)

Sin embargo, el número de grados de libertad para los brazos robóticos se calcula mediante la suma del número de rotaciones que presentan sus articulaciones.

1.3.3. PARÁMETROS DE UN BRAZO ROBÓTICO

1.3.3.1. Número de Grados de Libertad

En el caso de brazos robóticos como ya se expuso en el apartado 1.3.2 no se utiliza la *Ecuación 1* o la *Ecuación 2*, solo se suman todos los movimientos que permiten cada una de sus articulaciones. En el caso de los brazos robóticos el número de grados de libertad es de 6, para cubrir un amplio volumen de trabajo; si los robots tienen más de 6 G.D.L., se denomina como un robot redundante.

1.3.3.2. Volumen de trabajo

Es el conjunto de puntos en el espacio a los cuales el manipulador puede acceder, esto va a depender de la configuración del robot. Es importante conocer las limitaciones del robot como su posición angular y distancia entre eslabones. Se recomienda no considerar al elemento terminal dentro del cálculo del volumen de trabajo de un manipulador pues al ser estos reemplazables, se debería volver a hacer el cálculo para cada efector final que se utilice. La *Figura 5*, ilustra el volumen de trabajo de un brazo robótico de 6 G.D.L. de la empresa ABB.

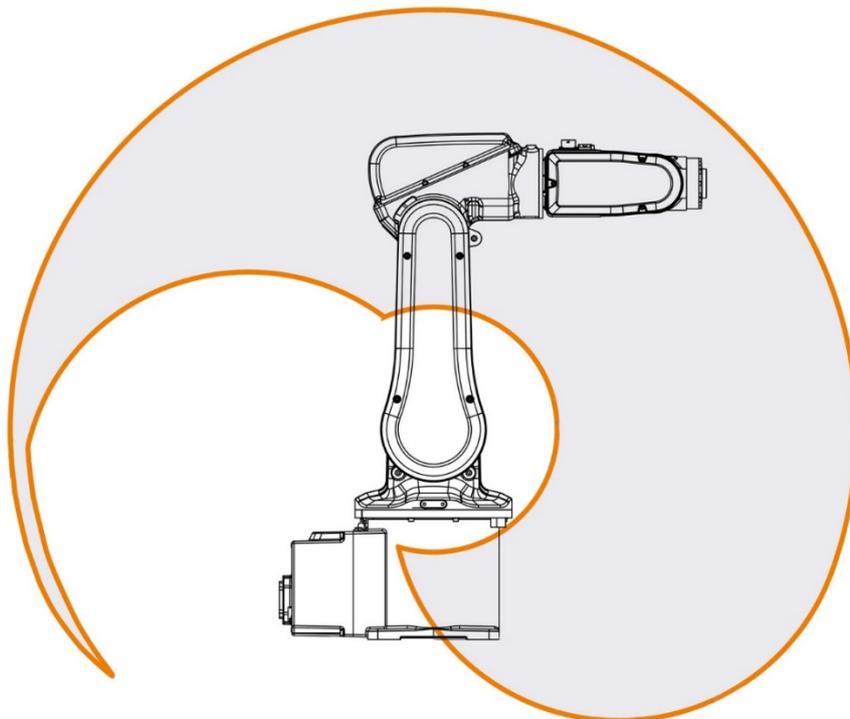


Figura 5. Volumen de trabajo del robot manipulador IRB 120 de ABB.

Fuente: (ABB, 2017)

1.3.3.3. Resolución espacial.

“Es la variación mínima entre el punto deseado con respecto al área circundante donde está ubicado el punto real. Se determina por los bits de resolución en los sensores de posición, en actuadores y en los conversores A/D y D/A” (Peña Pardo, Pérez Sarmiento, & Suárez Saavedra, 2005).

1.3.3.4. Exactitud

La exactitud es la distancia entre la posición final del efector y la posición deseada. La imprecisión de esta se debe a errores de calibración, deformaciones mecánicas o errores de control.

1.3.3.5. Repetibilidad

Es la capacidad que tiene el brazo robótico de regresar a un mismo punto bajo condiciones iguales (carga, temperatura, ruido, etc.). Generalmente los problemas de repetibilidad vienen dados por problemas mecánicos, histéresis, deterioro, entre otros. Los robots de la marca ABB por ejemplo ofrecen un 0.01 [mm] de error en la repetibilidad.

1.3.3.6. Capacidad de Carga

Es el peso que transporta el elemento terminal del manipulador, sin considerar el peso del mismo robot. Es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un manipulador. El brazo robótico “UTN” tiene una capacidad de carga máxima de 1 [Kg].

1.4. BRAZO ROBÓTICO “UTN”

El brazo robótico “UTN” es un proyecto multidisciplinario que reúne a expertos en mecánica, electrónica y control, mecatrónica y a estudiantes aspirantes a conseguir el título de ingenieros en mecatrónica; con el fin de diseñar y construir un manipulador que sea un aporte al laboratorio de robótica de la Universidad Técnica del Norte y que sirva de ayuda didáctica para estudiantes y profesores.

El proyecto está dividido en cuatro sub-proyectos dependientes uno del otro; la división está realizada de forma estratégica para que cada grupo participante diseñe y construya una parte constitutiva del brazo robótico; el diseño y la construcción del hombro y brazo es parte de del proyecto denominado Brazo Robótico UTN que para

evitar confusiones de términos con el eslabón de brazo de aquí en adelante se denomina al proyecto general “B.R. UTN”. En la *Figura 6* se presenta una vista explosionada del B.R “UTN” con las divisiones para cada grupo de trabajo; la *Figura 6.1* es realizada por Luis Amanta bajo el título “Diseño y construcción de la base para el Brazo Robótico UTN”, la *Figura 6.3* corresponde al proyecto de Carlos Endara denominado “Diseño y construcción de las articulaciones y eslabón del codo y muñeca para el brazo robótico UTN”, la *Figura 6.4* es autoría de Andres Proaño bajo el título “Diseño y construcción del gripper para el brazo robótico UTN” y la *Figura 6.2* corresponde al presente trabajo escrito.

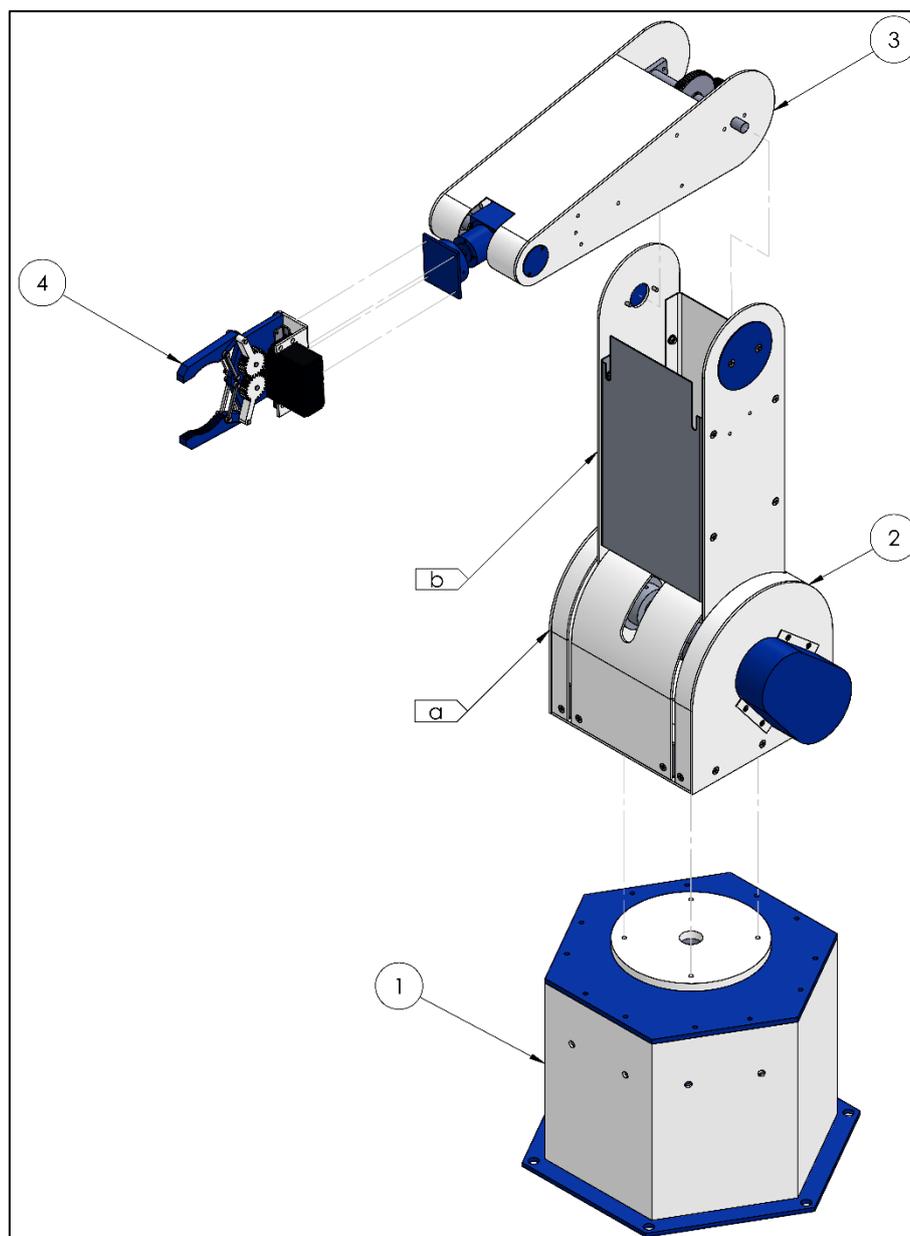


Figura 6. Partes constitutivas del B.R. “UTN”
Nota. 1) Base; 2.a) Hombro, 2.b) Brazo; 3) Antebrazo; 4) Gripper.

Tabla 1.
Características y parámetros del B.R “UTN”

Parámetro	Selección	Descripción
Generación	Primera	Responde a tareas programadas.
Área de aplicación	Investigación	Será usado en el Laboratorio de Robótica de la UTN.
Tipo de actuadores	Eléctricos	Aportan mayor precisión en el control automático.
Configuración	Esférica	Para alcanzar un mayor volumen de trabajo.
Grados de libertad	Seis	Uno por cada articulación.
Tipos de articulaciones	Rotacionales	Proporcionan un GDL y movimientos angulares.
Capacidad de carga	1 [Kg]	Carga máxima y recomendada.

1.5. MATERIALES

“La selección de un material para construir una parte de máquina o un elemento estructural es una de las decisiones más importantes que debe tomar el diseñador”(Budynas & Nisbett, 2008). A continuación, en la *Figura 7* y la *Figura 8* se presenta una comparación entre densidad-límite elástico y densidad-precio respectivamente de varios materiales en los que se fabrican brazos robóticos como: madera, nailon, fibra de vidrio, aleaciones de aluminio, acero de baja aleación y acero inoxidable con el objetivo de presentar opciones para una posterior selección.

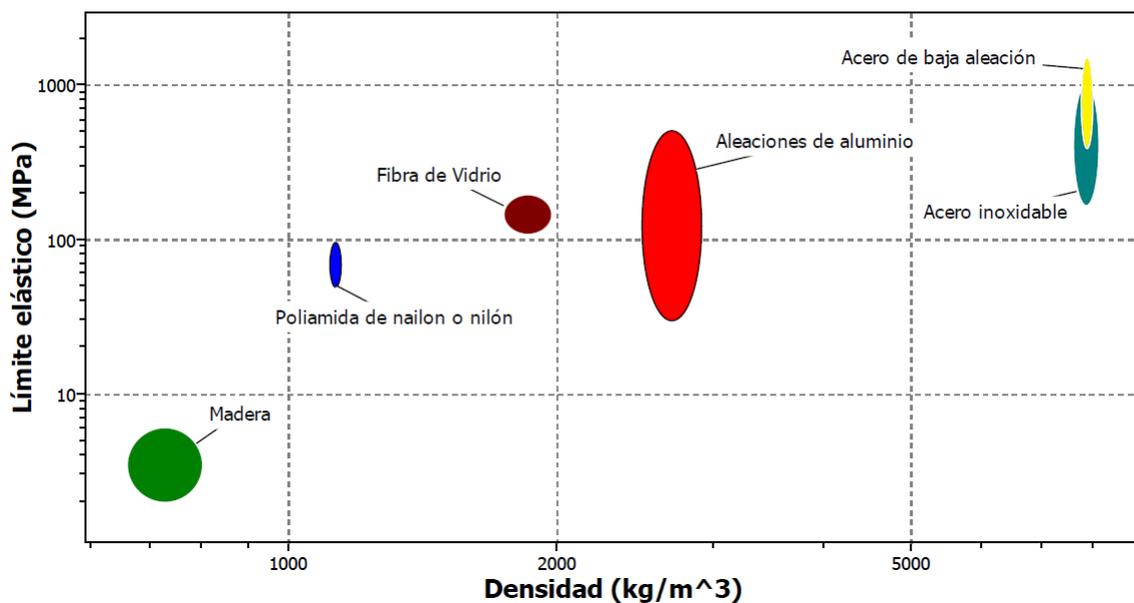


Figura 7. Gráfica de materiales límite elástico – densidad

Fuente: Tablas Ashby

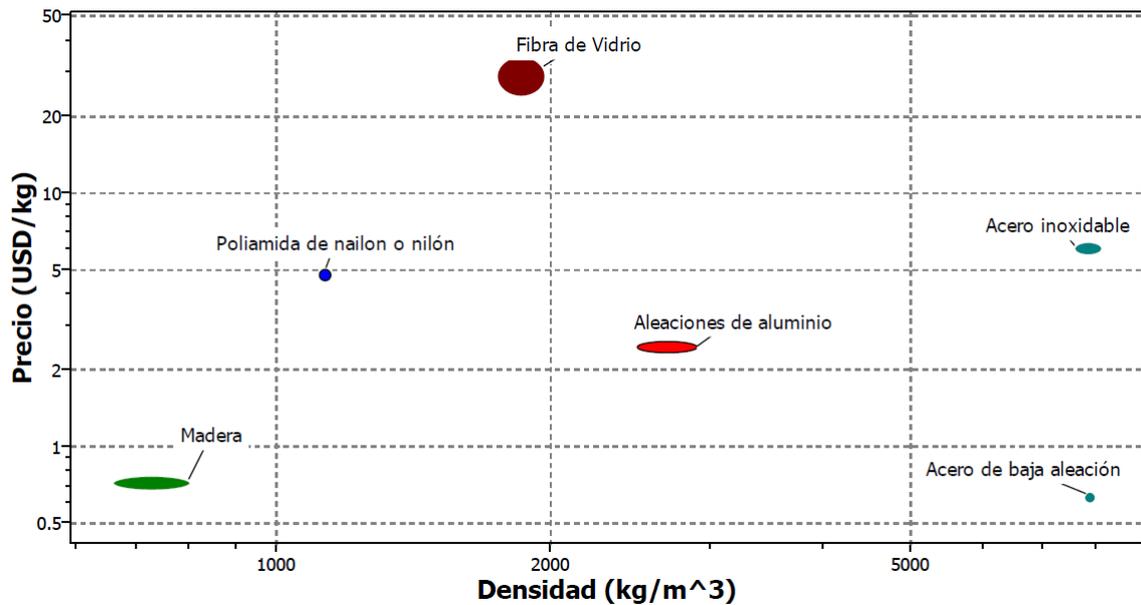


Figura 8. Gráfica de materiales densidad – precio
Fuente: Tablas Ashby

1.6. CINEMÁTICA

1.6.1. CINEMÁTICA DIRECTA

“El problema cinemático directo consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia” (Barrientos et al., 2007).

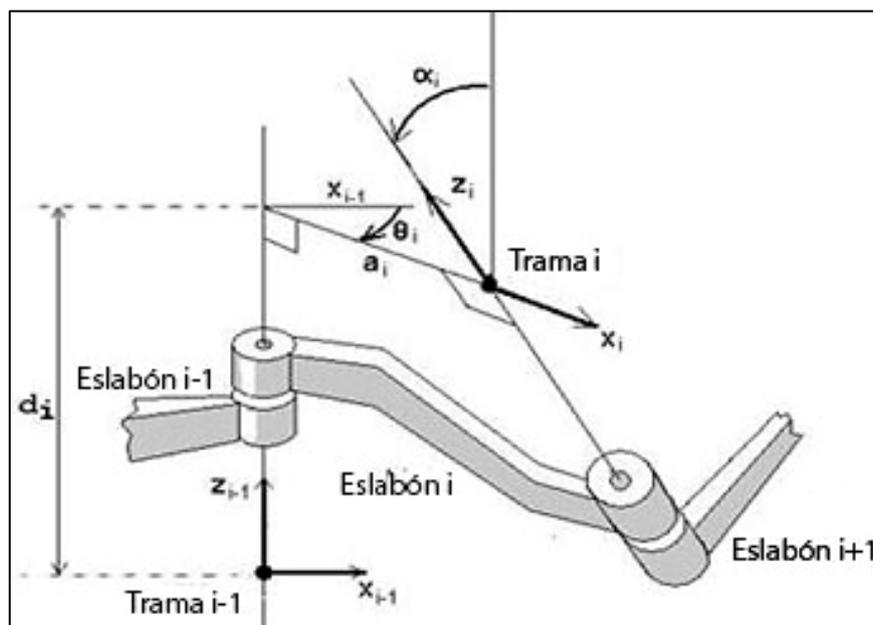


Figura 9. Parámetros Denavit - Hartenberg.
Fuente: (Jaramillo Rojas, 2010)

Tómese en cuenta que en la *Figura 9* varios autores y softwares especializados en cálculos cinemáticos no usan la traducción de las definiciones *trama* y *eslabón* y usan las palabras en inglés *frame* y *link* respectivamente.

“Denavit y Hartenberg propusieron un método matricial que permite establecer un sistema de coordenadas ligado a cada eslabón para determinar las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa” (Paul, 1981). Los parámetros Denavit – Hartenberg $\alpha_i, \alpha_1, \theta_1, d_i$ dependen de las características geométricas de cada eslabón y de sus articulaciones. A continuación, se definen cada uno de ellos.

- α_i es la distancia a lo largo del eje X_i que va desde la intersección del eje Z_{i-1} con el eje X_i hasta el origen del sistema i – *esimo*, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes Z_{i-1} y Z_i .
- α_1 es el ángulo de separación del eje Z_{i-1} y el eje Z_i , medido en un plano perpendicular al eje X_i , utilizando la regla de la mano derecha.
- θ_1 es el ángulo que forman los ejes X_{i-1} y X_i medido en un plano perpendicular al eje Z_{i-1} , utilizando la regla de la mano derecha.
- d_i es la distancia a lo largo del eje Z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $(i - 1)$ – *esimo* hasta la intersección del eje Z_{i-1} con el eje X_i . (Jaramillo Rojas, 2010)

A partir de los parámetros se procede a construir la matriz de transformación para cada parámetro y su producto de las representa la transformación homogénea de cada eslabón.

Ecuación 3. Transformación Homogénea para cada eslabón

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

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

Fuente:(Barrientos et al., 2007)

Nótese que en la *Ecuación 3* las letras C y S representan las funciones coseno y seno respectivamente, muchos autores utilizan esta simbología para ahorrar espacio en las hojas de cálculo.

1.6.2. CINEMÁTICA INVERSA

“El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y se oriente según una determinada localización espacial” (Barrientos et al., 2007). Este método depende específicamente de la configuración del robot y no existe linealidad en sus soluciones y se le suma el problema de que puede haber muchas soluciones para un mismo efector final (Soto Bravo, 2016). Esto se complica al tener más grados de libertad en el sistema.

El análisis de la cinemática inversa en el presente trabajo se realiza mediante la resolución geométrica en varios problemas de geometría plana y se desacopla los primeros ejes (base, hombro, codo, muñeca) del gripper y base para hacer un análisis en un plano 2D.

1.7. ACTUADOR

La función de un actuador es transformar algún tipo de energía en otro tipo de energía deseado; en robótica la energía deseada a obtener generalmente es la mecánica. Es común confundir al motor como actuador, cuando en realidad el motor forma parte de este y es su componente principal; junto con la transmisión, amplificación, alimentación y/u otros accesorios componen al sistema denominado actuador (*Figura 10*).

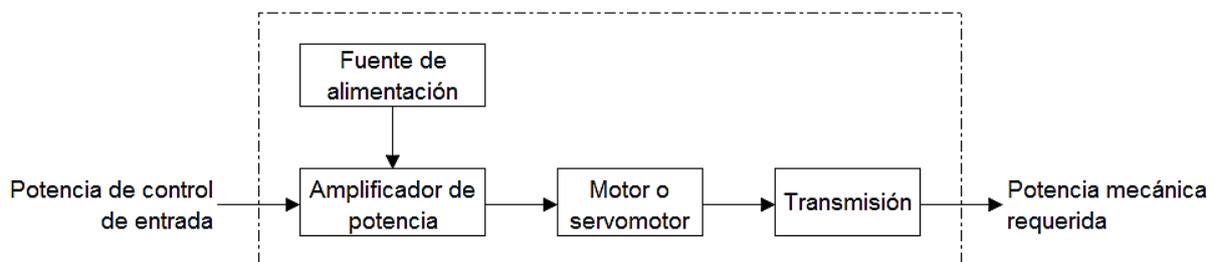


Figura 10. Sistema de actuador
Fuente: (Saha, 2010)

En la robótica la energía que se transforma es la eléctrica para obtener energía mecánica. Dependiendo de la fuente de energía que usen los actuadores para

obtener la energía mecánica pueden ser hidráulicos, neumáticos y/o eléctricos. Para poder seleccionar el tipo de actuador a usar en el hombro se descartan las opciones que usan energía hidráulica o neumática por las razones que expone Saha (2010):

- necesidad de módulos de compresibilidad,
- sistemas de alimentación ruidosos (igual y/o mayor a 70 [dB]),
- económicamente más costosos,
- abundantes y complejos equipos de hardware para lograr un buen control de posición y velocidad,
- no son convenientes para cargas pesadas con controles de movimiento precisos, entre otras.

1.7.1. MOTORES ELÉCTRICOS

En la robótica existen tres tipos de motores más usados: motores DC, motores de pasos y los servomotores.

1.7.1.1. Motor DC

Los motores de corriente directa son los más usados en la robótica. Para su funcionamiento en un brazo robótico es necesario acoplarles cajas reductoras, sensores de posición y complejos sistemas de control; con el paso del tiempo se han mejorado las características de estos motores y para utilizarlos en sistemas específicos de control de posición en la actualidad se dispone de motores de pasos y servomotores.

1.7.1.2. Servomotor

Los servomotores que trabajan con corriente directa en la robótica están limitados a aplicaciones de pequeña escala, en gran parte porque el torque que tienden a proporcionar al sistema es relativamente bajo para aplicaciones industriales o semi industriales donde el momento torsor no es un parámetro despreciable. Cuando la aplicación robótica tiene una escala mayor, la elección es un servomotor AC. En la industria actual todos los brazos robóticos comerciales usan este tipo de actuador.

1.7.1.3. Motor de pasos

Los motores de pasos son una clase de motores CD de conmutación electrónica. Son ideales para aplicaciones de alta precisión y repetitibilidad. Entre sus características están la de quedar enclavados en una posición, mientras una o más

bobinas están energizadas; así como el poder moverlos un paso a la vez por cada pulso dado, logrando dar movimientos angulares hasta de $1.8 [^\circ]$. Debido a la precisión que brindan estos motores no necesitan retroalimentación y el sistema de control se implementa con un lazo cerrado.

Los motores de pasos (...) no tienen escobillas ni conmutador mecánico. En lugar de ello, la acción de conmutación necesaria para que funcione el motor se logra con transistores externos. Además, el rotor no tiene devanado de armadura. Solo es un conjunto de imanes permanentes de polos salientes... (Maloney, 2006)

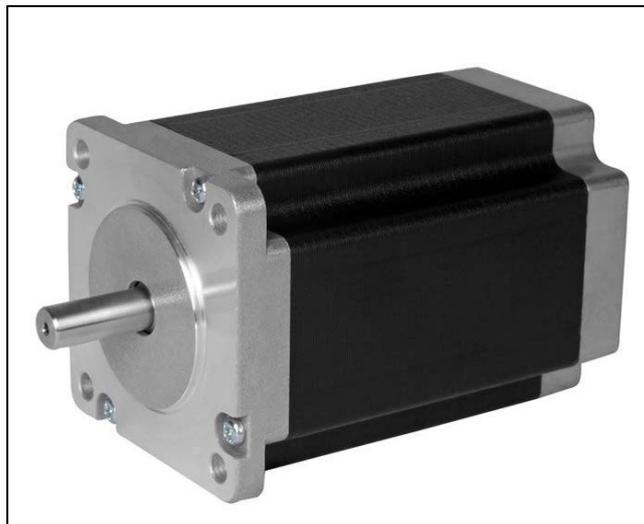


Figura 11. Motor de Pasos
Fuente: (SACOR, 2017)

1.7.1.4. Controlador CI para motores de pasos

Los motores paso a paso requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de sus bobinas en la secuencia apropiada. Este proceso se lleva a cabo mediante la configuración electrónica de puente H capaz de direccionar el flujo bidireccional de corriente. Es necesario utilizar un puente H para cada bobina del motor PAP. La secuencia y temporización de pulsos se realiza mediante un microcontrolador. (Hernández Bello & Ochoa Luna, 2004).

Sin embargo, “algunos fabricantes han elaborado circuitos integrados (CI) que suelen contener los transistores de conmutación de potencia, junto con la lógica digital que determina la secuencia específica de conmutación” (Maloney, 2006). De esta manera se envían valores lógicos digitales a los pines de estos circuitos y se controla eficientemente el motor de pasos.

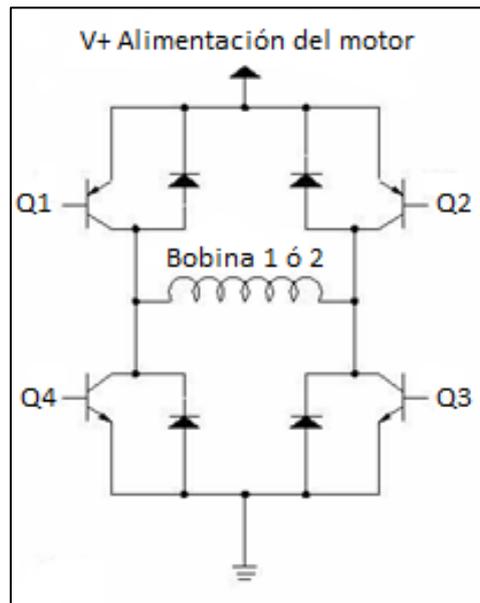


Figura 12. Puente H
Fuente: (Ramos D., 2012)

1.7.2. TRANSMISIÓN

Es la encargada de transmitir el movimiento de los motores a los eslabones de un manipulador. Dependiendo de la aplicación se diseñan las transmisiones para mejorar características como la velocidad o el torque para el movimiento final de los eslabones. En robótica las transmisiones más usadas son: bandas, cadenas y engranes.

La transmisión por bandas síncronas es muy utilizada en la robótica sin embargo no se toma en cuenta para el diseño de este trabajo de grado por tener una vida útil reducida pues dependen de la tensión entre polea y polea.

La transmisión por engranes es más utilizada para reducciones o ampliaciones de velocidad; la vida útil supera a las otras transmisiones, sin embargo, para este proyecto no se toman en cuenta por el juego entre dientes y la precisión que se necesita para no perder grados.

La transmisión por cadenas es muy utilizada para sistemas de alta potencia mecánica y es la seleccionada para este proyecto. Tiene mayor vida útil que las bandas y mejor precisión que los engranes. La desventaja de este sistema cadena-catarina es el lado tenso y lado flojo que se toma muy en cuenta el momento de realizar el diseño.

1.8. ARDUINO MEGA 2560

“Arduino Mega es una tarjeta de desarrollo open-source construida con un microcontrolador modelo Atmega2560 que posee pines de entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales” (Arduino.com, 2014). Posee las siguientes características:

- Microcontrolador ATmega2560.
- Voltaje de entrada de – 7-12 [V].
- 54 pines digitales de Entrada/Salida (14 de ellos son salidas PWM).
- 16 entradas analógicas.
- 256k de memoria flash.
- Velocidad de reloj de 16 [Mhz]

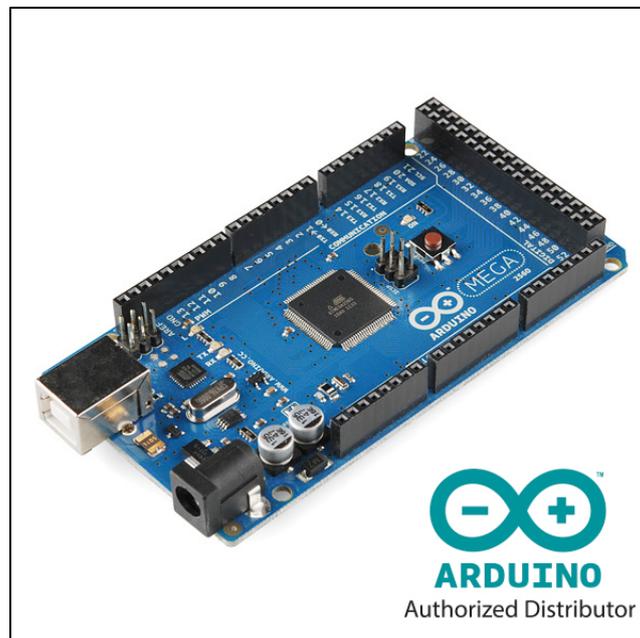


Figura 13. Arduino MEGA 2560
Fuente. (Arduino.com, 2014)

1.9. SENSORES

1.9.1. SENSOR DE CONTACTO

Los sensores de contacto o también llamados final de carrera son dispositivos eléctricos, neumáticos o mecánicos, y se encuentran situados al final del recorrido de un elemento móvil. Se encargan de mandar señales eléctricas, dependiendo la posición en que se encuentren, abriendo o cerrando el circuito. Internamente contienen interruptores NA, NC o conmutadores, dependiendo el fin para el que sean utilizados. (Alafita Manzanares, 2015)



Figura 14. Final de carrera tipo rodillo
Fuente: OMRON

1.10.SISTEMA DE CONTROL

Sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente y emplean un determinado objetivo. Control significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar al sistema la variable manipulada para corregir o limitar la desviación del valor medido, respecto al valor deseado. (Pendino & Crespo, 2016)

Por lo tanto, sistema de control es la combinación de componentes que actúan sobre variables que permiten manejar el comportamiento de un sistema.

1.10.1. SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en que la salida tiene efecto directo sobre la acción de control (*Figura 15*). Este usa la diferencia entre la realimentación de la salida con la entrada para reducir el error del sistema.

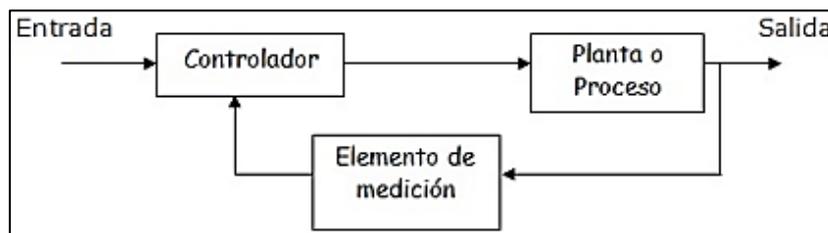


Figura 15. Diagrama de bloques de un sistema de control cerrado.
Fuente: (Pendino & Crespo, 2016)

Un ejemplo de este control es la calefacción donde la realimentación permite mantener la temperatura deseada en un lugar en específico.

1.10.2. SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO

Los sistemas de control en lazo abierto son aquellos donde la salida no tiene efecto sobre la acción de control (*Figura 16*). La salida no se mide ni se realimenta para compararla con la entrada.

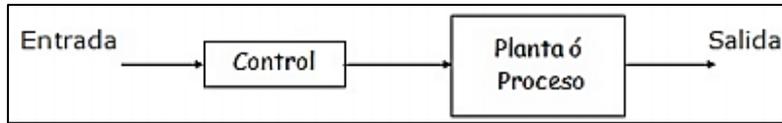


Figura 16. Diagrama de bloques de un sistema de control abierto.

Fuente: (Pendino & Crespo, 2016)

Se utilizan en sistemas donde las entradas son conocidas previamente y en los que no hay perturbaciones o es despreciable su afectación a la salida del proceso. Este proyecto por ejemplo utiliza un lazo abierto por la ventaja que ofrecen los motores de pasos al ingresar cierto número de pasos y devolver un número de grados. La única información que se le ofrece al sistema es un final de carrera para dar inicio al conteo de pasos pero que no es considerado como retroalimentación.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. PARÁMETROS Y REQUISITOS

2.1.1. PARAMETRIZACIÓN DEL HOMBRO

La principal funcionalidad del hombro es proporcionar una movilidad angular necesaria al brazo, portar el motor y transmisión para brindarle movimiento. El material usado es el aluminio ASTM 1200 por su buena relación resistencia – peso. El diseño es completamente desmontable para poder hacer mantenimiento constante a los elementos internos del hombro; además de ser adaptable para unirse con la base del BRUTN.

Tabla 2.
Parámetros del hombro

Característica	Parámetro	Descripción
Dimensiones	20 [cm]	Largo mínimo
Peso	3 [kg]	Peso máximo
GDL	0	El hombro debe permanecer estático para que el brazo se mueva, pero a su vez adaptable a la base.

2.1.2. PARAMETRIZACIÓN DEL BRAZO

El brazo tiene dos objetivos, mover angularmente de 0 a 90 grados para proporcionar al BRUTN un espacio de trabajo amplio y el segundo es ser adaptable con el antebrazo, portar el motor de codo y su transmisión. En este caso es igual de importante que la relación resistencia – peso sea alta para disminuir la fuerza de palanca generada en el motor de hombro.

Tabla 3.
Parámetros del brazo

Característica	Parámetro	Descripción
Longitud brazo	40 [cm]	De eje hombro a eje antebrazo.
Ancho brazo	12 [cm]	Igual al ancho del antebrazo.
Espesor brazo	16 [cm]	Espacio necesario para el actuador del antebrazo.

Peso	1 [kg]	Peso máximo para no sobrecargar al sistema.
GDL	1	Movimiento angular de hombro.
Movilidad angular	0 a 90 grados	Angulo mínimo de acción.

2.1.3. PARAMETRIZACIÓN DEL ACTUADOR

Como expone Subir Kumir Saha en su libro Introducción a la Robótica (2010) en una aplicación robótica, un actuador debe tener las siguientes características:

- baja inercia,
- alta relación potencia-peso,
- posibilidad de sobrecarga y entrega de pares de torsión de impulsos,
- capacidad para desarrollar altas aceleraciones,
- amplios rangos de velocidad,
- alta precisión de posicionamiento,
- buena precisión de rastreo de trayectorias y posicionamiento.

2.2. DISEÑO

2.2.1. ANÁLISIS ESTÁTICO

2.2.1.1. Cargas

El hombro está sujeto a varias cargas en forma de fuerzas y momentos ocasionados por el peso de eslabones y motores principalmente. Las dimensiones de los eslabones también influyen en el aumento del par, entonces, para poder disminuir la magnitud de las cargas se debe tratar de aligerar los eslabones sin afectar su longitud y preferentemente tampoco su rigidez para evitar excesivas deformaciones. (Apostolovich & Felipe, 2011)

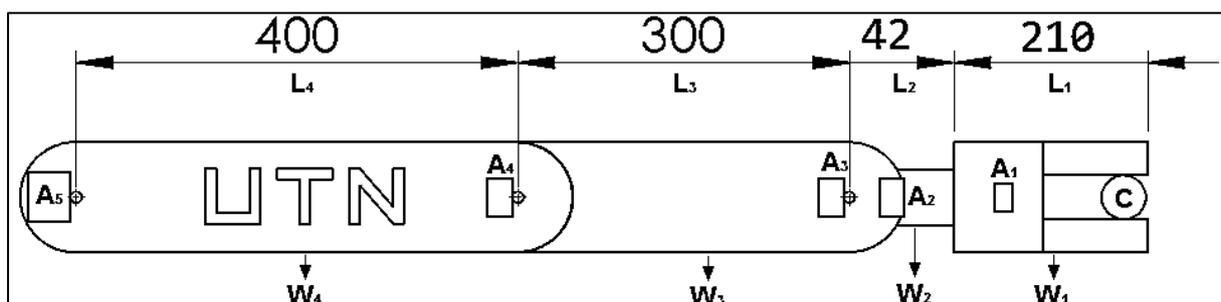


Figura 17. Diagrama de los miembros superiores.

Nota. Unidades en mm

Tabla 4.
Descripción de los elementos de la *Figura 17*.

Símbolo	Masa [kg]	Descripción
A ₁	0.153	Actuador del gripper
A ₂	0.5	Actuador de la muñeca (giro)
A ₃	0.5	Actuador de la muñeca (eje y)
A ₄	0.5	Actuador del codo
A ₅	2.1	Actuador del hombro
W ₁	0.45	Masa del gripper
W ₂	0.1	Masa de la muñeca
W ₃	1.4	Masa del antebrazo
W ₄	1.5	Masa del brazo
C	1	Carga a levantar

La *Figura 17* representa un bosquejo en una vista lateral del brazo robótico con sus miembros en posición extendida y en la *Tabla 6* se presentan las definiciones de los símbolos usados.

2.2.1.2. Reacciones

Utilizando la ecuación de equilibrio se obtiene las reacciones parciales, así como la reacción resultante en los puntos D y C de la *Figura 18*.

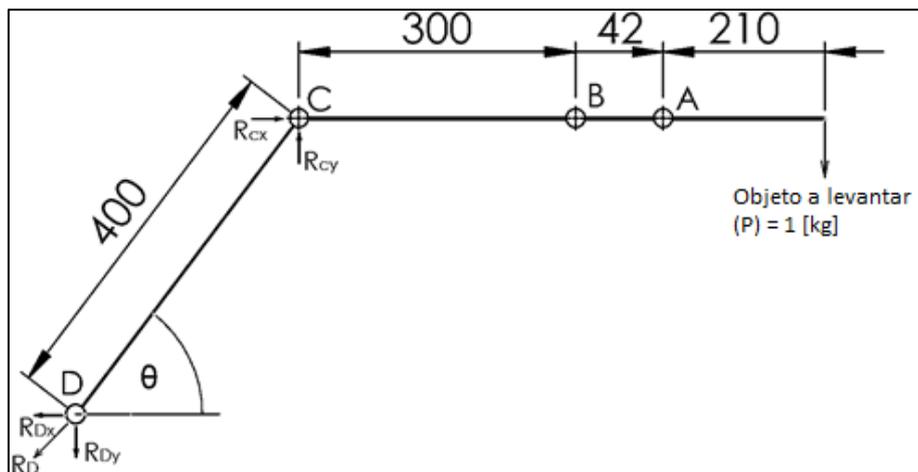


Figura 18. Diagrama de cuerpo libre
Nota. Unidades en mm

$$CD_x = CD \cdot \cos(\theta)$$

$$C = 9.807 \text{ N}$$

$$R_{Dy} = 12.829 \text{ N}$$

Para la obtención de las reacciones en x tanto en el punto D y C se realiza el cálculo de la tangente en el punto D .

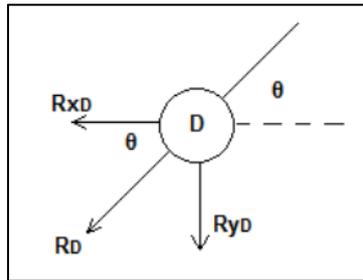


Figura 19. Descomposición de reacciones con un ángulo

$$R_{Dx} = \frac{R_{Dy}}{\tan(\theta)}$$

$$R_{Dx} = 12.829 \text{ N}$$

La reacción resultante R_D se calcula mediante el Teorema de Pitágoras:

$$R_D = \sqrt{R_{Dx}^2 + R_{Dy}^2}$$

$$R_D = 18.142 \text{ N}$$

Se observa que el eslabón CD (brazo) se encuentra en tensión pura y que la reacción R_D tiende a cortar al eje en el punto D .

Es necesario analizar el comportamiento de las reacciones para ángulos diferentes a $45 [^\circ]$ pues hay que recordar que el brazo debe ser capaz de ubicarse entre ángulos de $0 [^\circ]$ a $90 [^\circ]$. Para ello las matrices de la Ecuación 4 las resumen:

Ecuación 4. Reacciones en el punto D para distintos ángulos

$$\theta = \begin{bmatrix} 10 \\ 30 \\ 45 \\ 60 \\ 80 \end{bmatrix}^\circ \quad R_D = \begin{bmatrix} 73.335 \\ 24.565 \\ 18.142 \\ 19.596 \\ 52.288 \end{bmatrix} \text{ N}$$

Los puntos en consideración deben ser ángulos menores a los $10 [^\circ]$ y mayores a los $80 [^\circ]$, pues se presenta un aumento en la reacción significativo, por ende, el pasador en el punto D y el eslabón de brazo están soportando una carga cortante elevada y esos son los puntos críticos de mayor consideración.

2.2.1.3. Momentos

Cuando se aplica una fuerza en algún punto de un cuerpo rígido, el cuerpo tiende a realizar un movimiento de rotación en torno a algún eje. La propiedad de la fuerza para hacer girar al cuerpo se mide con una magnitud física que se llama torque. (Villamizar Gallardo, 2016)

Por definición se conoce que el torque es igual al producto entre la fuerza aplicada en un punto y la distancia al eje de rotación por el seno del ángulo de acción.

Ecuación 5. Fórmula general del torque

$$T := F \cdot r \cdot \sin(\alpha)$$

En el caso particular del hombro se obvia el cálculo del, pues las cargas son perpendiculares a la línea de acción formando ángulos de 90 grados. Con ello se deja como ecuación general del torque a la fuerza por la distancia.

El análisis será realizado cuando el brazo se encuentra completamente extendido (*Figura 17*), pues es en ese instante donde se genera el mayor momento torsor en el hombro por ello es considerado como la zona más crítica dentro del diseño de todo el brazo robótico.

“El torque requerido por el motor está dado por la sumatoria de los productos entre la distancia y la fuerza de los elementos a soportar. Para cada eslabón teóricamente se considera que el peso está en centro de gravedad e idealmente este debería encontrarse en la mitad de la longitud, por ello se dividirá para dos.” (Tituaña, Verónica, & Jacho Jami, 2010)

Ecuación 6. Torque en la articulación de hombro

$$X_1 = (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \cdot C + \left(\frac{L_1}{2} + L_2 + L_3 + L_4\right) \cdot W_1 + (L_2 + L_3 + L_4) \cdot A_1$$

$$X_2 = \left(\frac{L_2}{2} + L_3 + L_4\right) \cdot W_2 + (L_3 + L_4) \cdot A_2 + \left(\frac{L_3}{2} + L_4\right) \cdot W_3 + L_4 \cdot A_3 + \frac{L_4}{2} \cdot W_4$$

$$T_{A4} := X_1 + X_2$$

$$T_{A4} \cdot g = 33.233 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El valor de T_{A4} representa el momento máximo generado en el eje del hombro en un análisis estático.

2.2.2. DISEÑO DE LA TRANSMISIÓN

El motor de pasos junto con una caja reductora con una relación de 100:1 ofrecen un torque de 40 N*m con lo cual se cubre el torque calculado en la anterior sección, sin embargo, la velocidad es baja por lo cual se diseña una transmisión de cadena – catarinas para aumentar la velocidad sin perder fuerza.

2.2.2.1. Catarinas

El análisis de fuerzas de la catarina se realiza en el apartado de diseño de eje. Con el fin de reducir el torque en no más de 30 N/m se utiliza dos catarinas de 17 y 13 dientes para así reducir en una relación 13/17 el torque y aumentar la velocidad en 40 rpm.

Tabla 5.
Características de las catarinas

Catarina	Nro. dientes	Paso de la cadena (mm)	Diámetro primitivo (mm)	Diámetro exterior (mm)
Conductora	17	12.7	66.11	70
Conducida	13	12.7	53.06	54

El diámetro primitivo que se presenta en la *Tabla 5* se obtiene de la Ecuación 7 y es utilizado para el diseño asistido por computadora.

Ecuación 7. Diámetro primitivo de una catarina.

$$Dp = \frac{p}{\sin\left(\frac{180}{Z}\right)}$$

Donde:

- p: paso de la cadena,
- Z: número de dientes.

2.2.3. DISEÑO DEL EJE

Como carga de los eslabones se utiliza las componentes de la reacción R_D máximas del anterior cálculo. Pero en este caso dicha reacción está repartida entre los dos eslabones.

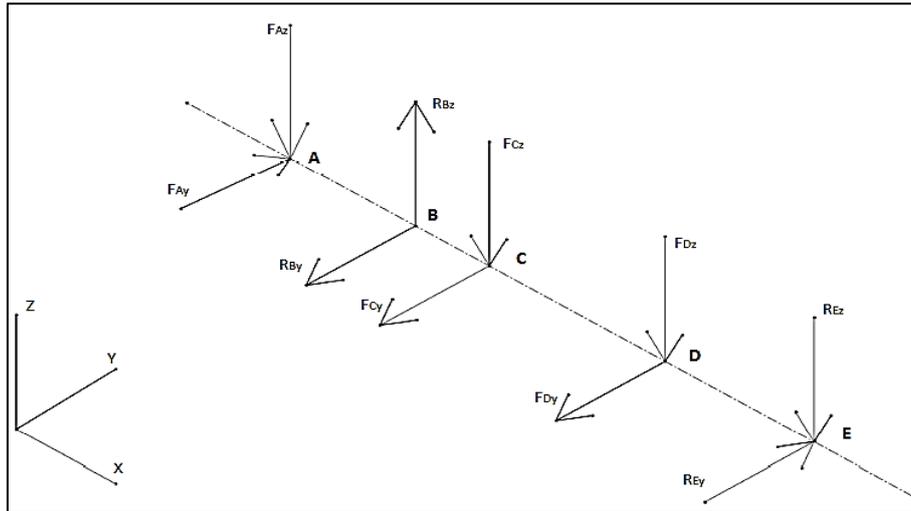
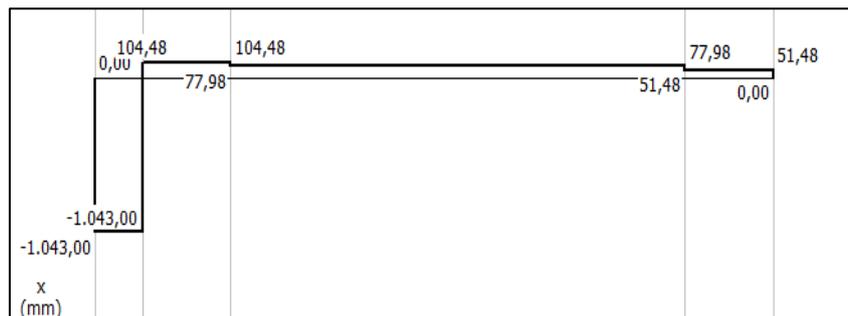
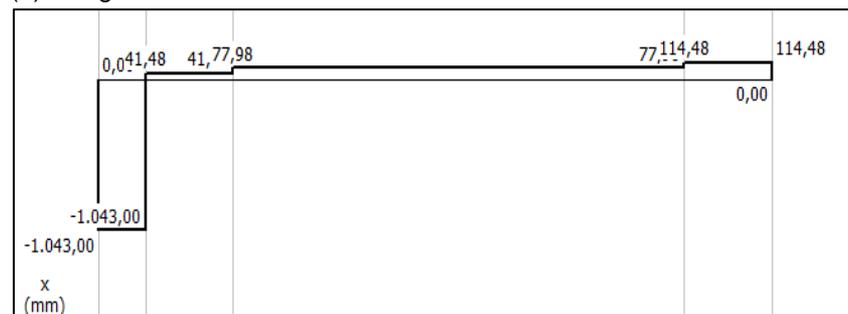


Figura 22. Fuerzas aplicadas en el eje. Vista en perspectiva

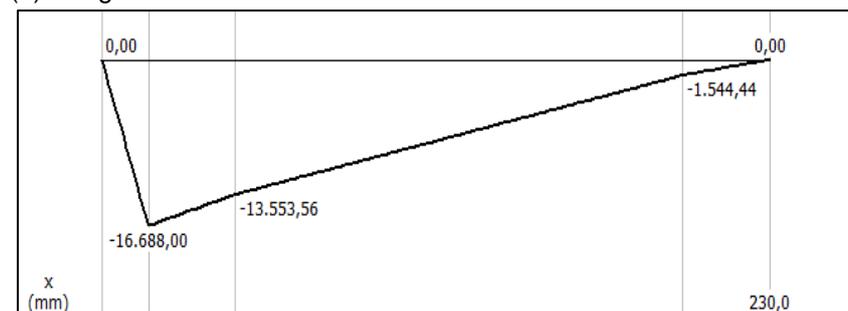
A continuación, se muestra los respectivos diagramas de fuerzas cortantes y momentos flexionantes (*Figura 23*) que se aplican en el eje y se procede a la obtención de las reacciones y momentos máximos.



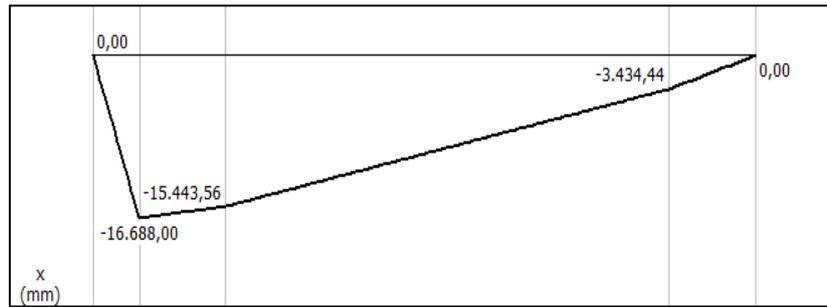
(a) Diagrama de fuerzas cortantes XZ



(b) Diagrama de fuerzas cortantes XY



(c) Diagrama de momentos flexionantes XZ



(d) Diagrama de momentos flexionantes XY

Figura 23. Diagramas de fuerzas cortantes y momentos flexionantes

El momento máximo se da en el punto *B* donde se encuentra el rodamiento.

$$M_B = \sqrt{|M_{Bxz}|^2 + |M_{Bxy}|^2} = 23.6 \text{ Nm}$$

Donde:

- M_B : Momento en el punto *B*.
- M_{bxz} : Momento en el plano XZ.
- M_{bxy} : Momento en el plano XY.

2.2.3.1. Diámetros del eje

Se usa la ecuación que Robert Mott propone en su libro para el diseño de ejes.

Ecuación 8. Diámetro de un eje.

$$d = \left(\frac{32 \cdot FS}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t \cdot M}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Fuente: (Mott, 2006)

Donde:

- FS : factor de seguridad.
- K_t : factor de concentración de esfuerzo.
- M : momento en el punto a calcular.
- S_n' : resistencia modificada a la fatiga.
- T : par torsional.
- S_y : resistencia a la fluencia.

El material para el eje será de acero AISI 4340 que cumple con las características de la *Tabla 6*, obtenidas del catálogo de la empresa DIPAC.

Tabla 6.
Propiedades del acero AISI 4340

Diámetro [mm]	Resistencia Mecánica [N/mm ²]	Punto de Fluencia [N/mm ²]	Elongación %min.	Dureza ROKWELL B
16 o menos	1200 – 1400	1000	9	240 – 380
16 – 40	1100 – 1300	900	10	240 – 380
41 – 100	1000 – 1200	800	11	240 – 380

Fuente: (DIPAC, 2016)

Ecuación 9. Resistencia a la fatiga estimada real

$$S_n' = S_n \cdot C_s \cdot C_R$$

Fuente: (Mott, 2006)

Donde:

- S_n : resistencia a la tensión.
- C_s : factor de tamaño.
- C_R : confiabilidad.

Para la resistencia modificada a la fatiga S_n' se toma de resistencia a la tensión 900 [MPa] y de la figura 5-8 de Mott se obtiene $S_n = 410$ [MPa]. Como factor de tamaño $C_s = 0.88$ ya que el eje no pasa de 1 pulgada. Y para la confiabilidad de 0.99 se utiliza un $C_R = 0.81$ de la tabla 5-1 de Mott.

Tabla 7.
Diámetros

Punto	Diámetro (mm)
A	10
B	17
C	21
D	21
E	17

Por lo tanto, se remplazan los valores en la Ecuación 8 y se obtiene los diámetros para cada tramo del eje (Tabla 7).

Consultando los catálogos nacionales se encuentra que la empresa DIPAC ofrece aceros de transmisión para ejes elaborados en acero AISI 4340 de un diámetro mínimo de 25 [mm] a partir del cual se realiza un mecanizado ideal para adaptarlo a los requerimientos.

2.2.4. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

El brazo se une al hombro por medio de rodamientos para que permita su el movimiento angular.

Cada tipo de rodamiento presenta propiedades características que dependen de su diseño y que lo hacen más o menos adecuado para una aplicación determinada. Por ejemplo, los rodamientos rígidos de bolas pueden soportar cargas radiales moderadas, así como cargas axiales. Tienen una baja fricción y pueden ser fabricados con una gran precisión y con un diseño de funcionamiento silencioso. Por tanto, estos rodamientos son los preferidos para los motores eléctricos de tamaño pequeño y mediano. (SKF, 2006)

Se considera que el rodamiento trabaja en compresión por el peso del sistema y la velocidad de trabajo es baja, por lo tanto, se selecciona rodamientos rígidos de bolas por su alta resistencia a las cargas axiales en ambos lados y radiales a bajas velocidades.

Ecuación 10. Cálculo de la vida nominal de un rodamiento

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

Fuente: (SKF, 2006)

Donde:

- L_{10} : vida esperada en millones de revoluciones.
- C : capacidad de carga dinámica en kN.
- P : carga dinámica aplicada al rodamiento (reacciones en el eje).

Despejando C de la *Ecuación 10* se obtiene la capacidad de la carga dinámica en los puntos B y E :

$$C_B = 3.901 \text{ kN}$$

$$C_E = 0.31 \text{ kN}$$

2.2.4.1. Selección de los rodamientos del catálogo SKF

Con la capacidad de carga dinámica (C_B y C_E) y el diámetro del eje, se realiza la selección de los rodamientos que se encuentren más cercanos a los parámetros.

Tabla 8.
Rodamientos rígidos de una hilera de bolas

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
	mm		kN		kN	rpm		kg	-
17	26	5	1,68	0,93	0,039	56000	34000	0,0082	61803
	30	7	4,62	2,55	0,108	50000	32000	0,018	61903
	35	8	6,37	3,25	0,137	45000	28000	0,032	*16003
	35	10	6,37	3,25	0,137	45000	28000	0,039	*6003

Fuente: (SKF, 2006)

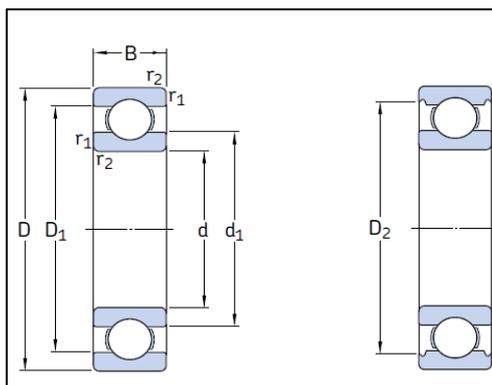


Figura 24. Rodamientos rígidos de una hilera de bolas
Fuente: (SKF, 2006)

En la *Tabla 8* se observa que el rodamiento que más se aproxima a las características calculadas es el de designación 61903.

2.2.5. ESPESOR DE PLANCHA

Las planchas utilizadas en el hombro están sometidas a esfuerzos de aplastamiento que generan los pasadores y con ello se determina su espesor requerido.

2.2.5.1. Diseño por esfuerzos de contacto o aplastamiento

Los esfuerzos de aplastamiento se producen en la superficie de contacto de dos cuerpos distintos, como el caso del eje y la placa de apoyo.



Figura 25. Modo de falla por aplastamiento
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Ecuación 11. Área de aplastamiento

$$A = P \cdot e$$

Donde:

- P : perímetro de la zona de aplastamiento.
- e : espesor del material.

Para determinar el perímetro de la zona de aplastamiento se utiliza *Ecuación 12*.

Ecuación 12. Perímetro en la zona de aplastamiento

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

Como el esfuerzo de aplastamiento es igual a la carga aplicada por el área de contacto entonces:

Ecuación 13. Esfuerzo de aplastamiento en perforaciones

$$\sigma = \frac{Q}{n \cdot A}$$

Donde:

- Q : Carga aplicada.
- n : Número de pasadores
- A : Area de contacto.

Se reemplaza la *Ecuación 12* y la *Ecuación 11* en la *Ecuación 13* y se obtiene una relación en función del material, el factor de seguridad y despejamos el espesor.

$$e = \frac{Q \cdot fs}{n \cdot Sy \cdot P}$$

$$e = 2.327 \text{ mm}$$

El espesor obtenido se aproxima a **3 [mm]** que se encuentran a disposición en el mercado local como chapas metálicas.

2.2.5.2. Selección de materiales

En la *Figura 7* y *Figura 8* del apartado "Materiales" se muestra dos gráficas haciendo relación a la densidad con el límite elástico y a la densidad con el peso de los materiales considerados para la construcción del hombro para BRUTN. A

continuación, se realiza una tabla comparativa entre ellos y se valora las características se selecciona el material más conveniente.

En la *Tabla 9* se observa que las relaciones van en forma descendente mientras más bajo sea el número más conveniente es el material para los fines de este proyecto. Por lo tanto, el elegido es el aluminio que, aunque la maquinabilidad de la madera sea mejor, su relación entre densidad, límite elástico y precio es aceptable.

Tabla 9.
Comparativa de materiales

Material	Dureza [HV]	Densidad [kg/m ³]	Relación densidad - límite elástico	Relación densidad - precio	Maquinabilidad
Madera	4-8	660-800	4	4	1
Poliamida de nailon	25.8-28.4	1120-1140	3	2	2
Fibra de vidrio	10.8-21.5	1750-1970	2	3	3-4
Aleaciones de Aluminio	12-151	2500-2900	1	1	3
Acero de baja aleación	140-693	7800-7900	6	5	5-6
Acero inoxidable	130-570	7600-8100	5	6	5-6

En el Ecuador el aluminio tipo ASTM1200 es el más utilizado en la industria metalmeccánica y su distribución se lo hace en forma de chapa metálica en variadas dimensiones como presenta la empresa DIPAC en su hoja de datos (*Anexo 2*). De esta manera se elige a este aluminio como material principal de la estructura de hombro y brazo.

Como material del eje para hombro se elige al de mayor dureza y densidad para que sea capaz de soportar el esfuerzo cortante provocado por el brazo. El acero AISI 4340 que DIPAC ofrece para ejes y ejes de transmisión es el elegido (*Anexo 3*).

El material para porta rodamientos es segundo con mejores características en resistencia y maquinabilidad, la poliamida de nailon (PA6).

2.3. ADQUISICIÓN, CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE

En la *Tabla 10*, se agrupan en una sola lista los materiales necesarios para en el hombro y brazo previamente seleccionados. Un listado completo donde se incluyen tornillos, pernos y todos los componentes se encuentra en el Anexo 1 en el plano UTN16-BR1-200.

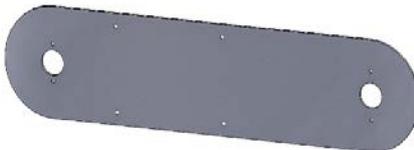
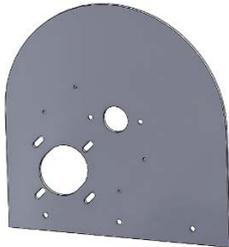
Tabla 10.
Materiales del hombro y brazo del BRUTN

Cantidad	Material	Dimensiones	Descripción
1	Aluminio ASTM A1200	3 [mm] de espesor	Chapa metálica
1	Aluminio ASTM A1200	1 [mm] de espesor	Chapa metálica
1	Acero AISI 4340	Ø: 25 [mm] longitud: 244 [mm]	Acero para transmisión
2	Rodamientos	Ø interno: 17 [mm]	SKF 61903
2	Catarinas	17 y 13 dientes	Paso 12.7 [mm]
1	Cadena	26 eslabones	Paso 12.7 [mm]
1	Acero de baja aleación	Ø: 62 [mm]; 40[mm]	Para bridas
1	Nylon	Ø: 61 [mm]; 40[mm]	Porta rodamientos

2.3.1. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA

Antes del mecanizado de las piezas se realiza el diseño asistido por computadora y a la validación del diseño por medio de elementos finitos. En la siguiente tabla se muestran las piezas obtenidas del CAD:

Tabla 11.
CAD de los elementos de brazo y hombro

Componente	Descripción	Modelo CAD
Lateral izquierdo de brazo	Obtenido de la plancha de aluminio de 3 [mm]. De eje a eje 40 [mm]. Todas las perforaciones son pasantes y avellanados en las perforaciones para perno. La parte inferior tiene menor dimensión para evitar contactos con el motor. Plano: UTN16-BR1-203.	
Lateral derecho de brazo	Obtenido de la plancha de aluminio de 3 [mm]. De eje a eje 40 [mm]. Todas las perforaciones son pasantes y avellanados en las perforaciones para perno. Plano: UTN16-BR1-202.	
Lateral izquierdo de hombro	Obtenido de la plancha de aluminio de 3 [mm]. Todas las perforaciones son pasantes y avellanados en las perforaciones para perno. Tiene una ranura para apoyar el motor y tensar la cadena. En este además se apoya el porta-rodamiento. Plano: UTN16-BR1-210.	

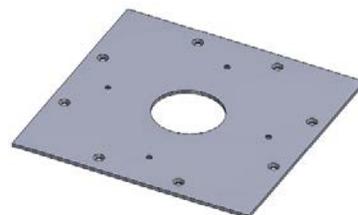
Lateral
derecho de
hombro

Obtenido de la plancha de aluminio de 3 [mm].
Todas las perforaciones son pasantes y
avellanados en las perforaciones para perno.
En este se apoya el segundo porta-
rodamiento.
Plano: UTN16-BR1-201.



Base de
hombro

Obtenido de la plancha de aluminio de 3 [mm].
Todas las perforaciones son pasantes y
avellanados en las perforaciones para perno.
Este se une a la base del BRUTN.
Por el centro atraviesa todo el cableado.
Plano: UTN16-BR1-201.



Eje de
hombro

Obtenido del acero AISI 4340.
Forma escalonada para un ajuste exacto de
cada pieza.
Este transmite el movimiento del motor al
brazo.
Plano: UTN16-BR1-208.



Catarinas
conductora y
conducida

Conductora de 17 dientes.
Conducida de 13 dientes.
Con cuello para sujeción al eje por medio de
prisioneros.
Comercial.



Cadena de
bicicleta

Paso de 12.7 [mm].
26 eslabones.



Porta-
rodamiento

Obtenido del tocho de nailon.
Las perforaciones son escaladas para que se
adapte al rodamiento y no limite su giro.
Plano: UTN16-BR1-209.

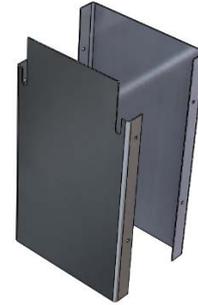


Tapa de
hombro

Obtenido de la plancha de aluminio de 3 [mm].
Todas las perforaciones son pasantes y
avellanados en las perforaciones para perno.
Curvatura a realizar en un rodillo.
Por el centro atraviesa todo el cableado.
Pestañas laterales para atornillar.
Plano: UTN16-BR1-211.



Tapas de brazo
 Obtenido de la plancha de aluminio de 1 [mm].
 Todas las perforaciones son pasantes y avellanados en las perforaciones para perno.
 Pestañas laterales para atornillar.
 Plano tapa superior: UTN16-BR1-212.
 Plano tapa inferior: UTN16-BR1-213.



Guarda de protección
 Obtenido de la plancha de aluminio de 1 [mm].
 Todas las perforaciones son pasantes.
 Pestañas laterales para atornillar.
 Su función es aislar a la transmisión para evitar accidentes.
 Plano: UTN16-BR1-215.



2.3.2. ANÁLISIS DEL DISEÑO MEDIANTE TÉCNICAS NUMÉRICAS

Existe un gran número de técnicas numéricas que se emplea en aplicaciones de ingeniería para las cuales la computadora digital es sumamente útil. En diseño mecánico, donde el software de diseño asistido por computadora (CAD) se utiliza de manera considerable, el método de análisis que se integra perfectamente con el CAD es el análisis de elementos finitos. (Budynas & Nisbett, 2008)

2.3.2.1. Condiciones de frontera

Tabla 12.
 Materiales para el análisis

Parte	Material
Lateral izquierdo de brazo	Aluminio EN-AW 1200
Lateral derecho de brazo	Aluminio EN-AW 1200
Lateral izquierdo de hombro	Aluminio EN-AW 1200
Lateral derecho de hombro	Aluminio EN-AW 1200
Base de hombro	Aluminio EN-AW 1200
Eje de hombro	Acero AISI 4340
Porta-rodamiento	Resina de poliéster

Se establece las condiciones de frontera para el análisis en el punto crítico de hombro que se trata de la extensión completa en forma horizontal. Al tratarse de un análisis que requiere la iteración de técnicas numéricas se excluyeron los elementos que no representan ningún aporte a la estructura (*Figura 26*) como son las tapas de hombro y brazo. El primer paso es indicar al programa de que material se trata para

que analice sus propiedades. En la *Tabla 12* se enlista los materiales utilizados en la simulación con el nombre por el cual se encuentra en el software de análisis de elementos finitos.

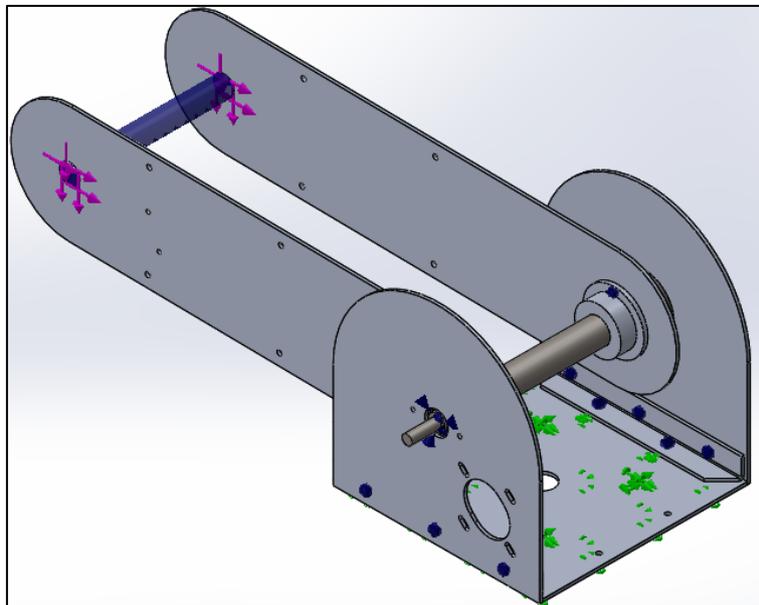


Figura 26. Condiciones de borde

A continuación, se establecen sujeciones para restringir las partes fijas de las móviles. Las sujeciones de empotramiento (se muestran de color verde en la *Figura 27*) se aplican a la base donde se unen con el trabajo de grado titulado “Diseño y construcción de la base para el Brazo Robótico UTN” por Luis Amanta que después de la integración será una parte móvil, pero para este estudio se lo analiza como elemento fijo. Una parte importante en las condiciones de frontera es indicar al software los tipos de conectores entre elementos pues el análisis se realiza al mecanismo ensamblado. Utilizando un contacto global y locales sin penetraciones entre componentes.

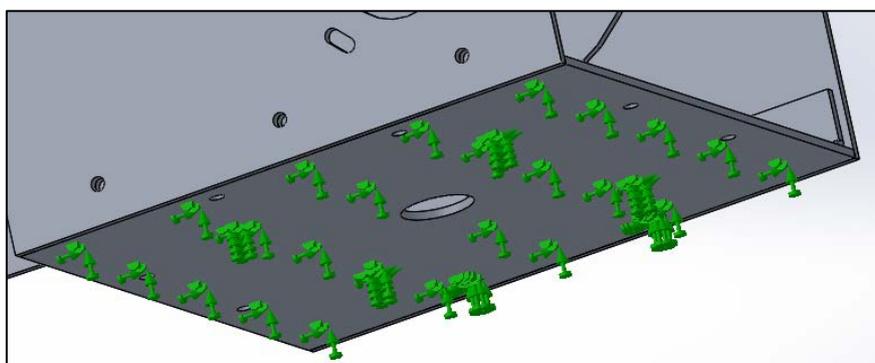


Figura 27. Empotramiento en la base

Las fuerzas aplicadas al extremo del eslabón de brazo son las reacciones obtenidas del trabajo de grado “Diseño y construcción de las articulaciones y eslabón del codo y muñeca para el brazo robótico UTN” autoría de Carlos Endara. La *Figura 28* muestra cómo las fuerzas se representan en color violeta de magnitudes $-12.83 [N]$ en el eje x y $-22.64 [N]$ en el eje y . Estas fuerzas se dividen para los dos eslabones repartiéndolo la carga equitativamente.

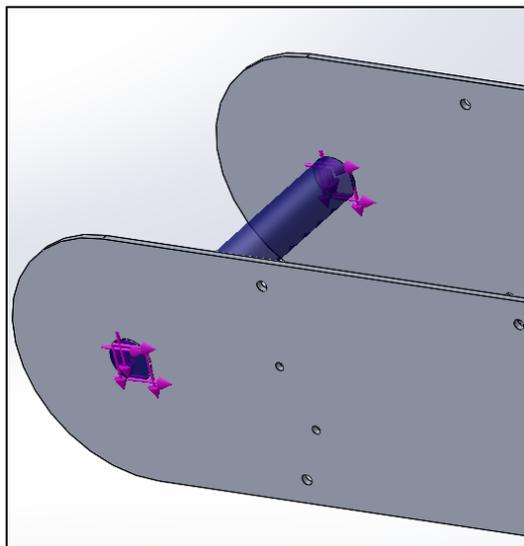


Figura 28. Fuerzas externas aplicadas el brazo

2.4. AUTOMATIZACIÓN DEL PROTOTIPO

La automatización del prototipo empieza con un estudio cinemático en donde se analiza al brazo robótico completo para poder describir los movimientos del hombro; para continuar con el estudio de la electrónica y programación.

2.4.1. MODELO CINEMÁTICO DIRECTO

“Este estudio proporciona elementos para analizar y diseñar el desplazamiento de trayectorias del robot manipulador, así como la orientación de la herramienta de trabajo” (Cortés, 2011). Como expresa Cortés en su libro de Robótica en estos casos se usa la metodología propuesta por Denavit – Hartenberg que es la más conocida y utilizada, ya que el modelo cinemático directo queda en representación de transformaciones homogéneas.

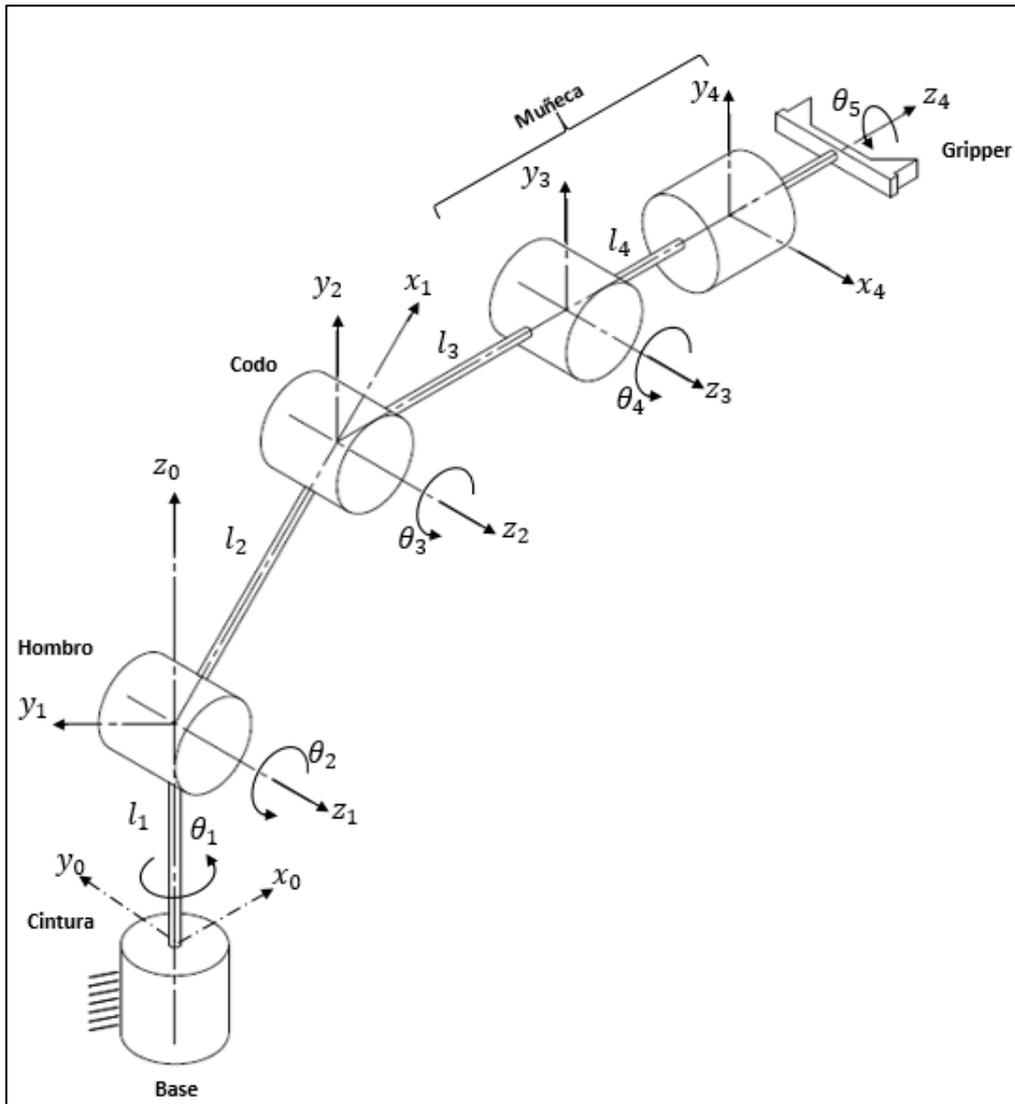


Figura 29. Diagrama de bloques cinemático del B.R. "UTN"

En la *Figura 29* se observa la posición de los sistemas de coordenadas para cada articulación y se procede a hallar los parámetros Denavit – Hartenberg.

Tabla 13.
Parámetros Denavit - Hartenberg

Eslabón (i)	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
1	θ_1	l_1	0	90°
2	θ_2	0	l_2	0°
3	θ_3	0	l_3	0°
4	θ_4	l_4	0	-90°
5	θ_5	l_5	0	90°

A continuación, se reemplaza los valores de la Tabla 13 en la Ecuación 3 para obtener la matriz de transformación homogénea para cada eslabón.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C(\theta_1) & 0 & S(\theta_1) & 0 \\ S(\theta_1) & 0 & -C(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} C(\theta_2) & -S(\theta_2) & 0 & l_2 C(\theta_2) \\ S(\theta_2) & C(\theta_2) & 0 & l_2 S(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} C(\theta_3) & -S(\theta_3) & 0 & l_3 C(\theta_3) \\ S(\theta_3) & C(\theta_3) & 0 & l_3 S(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} C(\theta_4) & 0 & -S(\theta_4) & 0 \\ S(\theta_4) & 0 & C(\theta_4) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} C(\theta_5) & 0 & S(\theta_5) & 0 \\ S(\theta_5) & 0 & -C(\theta_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Y la multiplicación de estas expresiones da como resultado la matriz de transformación homogénea del brazo.

2.4.2. MODELO CINEMÁTICO INVERSO

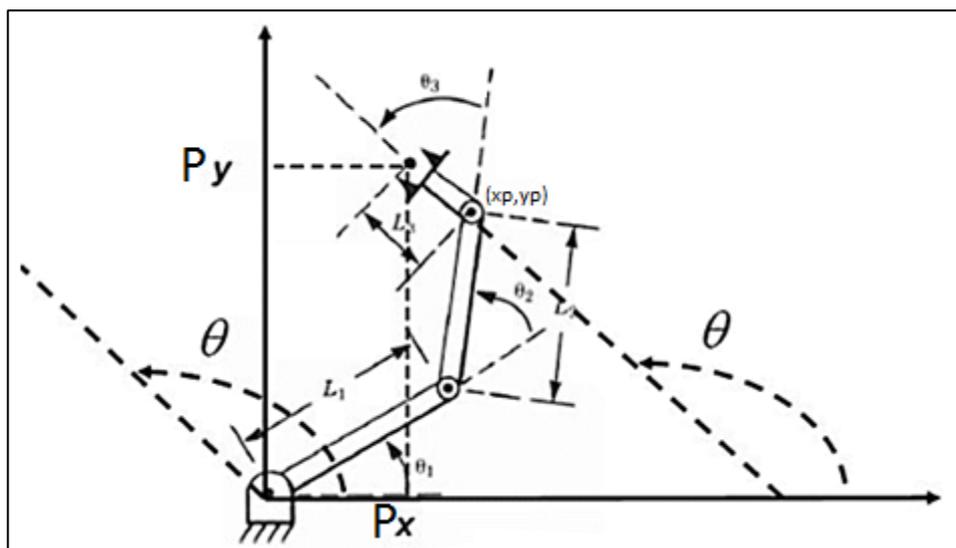


Figura 30. DCL para la cinemática inversa

El modelo cinemático inverso se traduce en una tarea bastante compleja y en muchos casos sin o con múltiples soluciones. Es por esta razón que en este proyecto y muchos autores optan por analizar geoméricamente al brazo usando la ley de cosenos y con el fin de simplificar el problema se desacopla la base, giro de la muñeca y gripper.

Con la simplificación de grados de libertad se realiza el análisis del sistema en un sólo plano XY con 3 articulaciones y 3 eslabones. El objetivo a encontrar es θ_1 , θ_2 y θ_3 modificando el punto P_x , P_y . Por deducción se encuentra θ :

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

Con esta primera condición se analiza la imagen y por operaciones geométricas:

$$\theta_i = \text{atan2}(P_y, P_x)$$

$$\theta = \theta_i + \frac{\pi}{2} \sqrt{\left(\frac{(P_x^2 + P_y^2)}{(L_1 + L_2 + L_3)^2}\right)} - \frac{\pi}{2}$$

$$xp = P_x - L_3 * \cos(\theta)$$

$$yp = P_y - L_3 * \text{sen}(\theta)$$

$$c = \frac{xp^2 + yp^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 * L_1 * L_2}$$

$$\alpha = \text{acos}(-c)$$

Con esta información se puede obtener θ_1 , θ_2 y θ_3 :

$$\theta_1 = \text{atan2}(yp, xp) + \frac{\text{asen}(L_2 * \text{sen}(\alpha))}{\sqrt{xp^2 + yp^2}}$$

$$\theta_2 = \alpha + \pi$$

$$\theta_3 = \theta - \theta_1 - \theta_2$$

2.4.3. SELECCIÓN DEL MOTOR

En la sección de 1.7.1. se habla de los motores eléctricos analizando a los tres más usados en brazos robóticos y en la sección 2.1.3 se parametrizó a los motores

que se usan en la robótica. En base a esto en la *Tabla 14* se establece una comparación para su selección.

Tabla 14.
Comparativa de motores

Motor	Baja inercia	Potencia - peso	Alto torque	Rangos de velocidades	Precisión y posicionamiento	Total
De pasos	1	2	1	1	2	7
DC	3	3	3	3	3	15
Servomotor	2	1	2	2	1	8

Nota. La valoración es descendente 1: Excelente, 2: Bueno, 3: Regular.

A partir de los resultados de la *Tabla 14* se concluye que el motor a pasos es el más adecuado para la función de dar movimiento al brazo. Además, con este actuador el control no necesita retroalimentación pues cada paso dado representa cierto número de grados como se muestra en el apartado 2.4.5.

2.4.4. SELECCIÓN DEL MOTOR A PASOS

En la *Tabla 15* se observa que el NEMA 34 ofrece más torque que los demás sin embargo es pesado y consume más corriente que se ve reflejado como inconveniente al combinar el brazo y hombro con los otros proyectos para formar el Brazo Robótico “UTN” pues se usa una sola fuente para alimentar a 6 motores con el resto de circuito electrónico y de control. El NEMA 17 es pequeño y liviano pero el torque que ofrece es demasiado bajo.

Tabla 15.
Características de tres motores de pasos bipolares

Motor	Designación	Fases	Ángulo de paso [°]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia por fase [Ω]	Torque [Nm]	Peso [Kg]
NEMA 17	17HS4401	2	1.8	2.55	1.7	1.5	0.4	0.24
NEMA 23	23HS7628	2	1.8	3.2	2.8	1.13	1.8	1
NEMA 34	34HS1456	2	1.8	3	5.6	0.55	8.5	3.8

A pesar de que ninguno de los tres motores ofrece los $30 [N*m]$ necesarios para mover el brazo, se selecciona el motor de pasos bipolar de imán permanente NEMA 23 23HS7628 y acoplado a una caja reductora y a la transmisión catarina – cadena se obtiene el par deseado.



Figura 31. NEMA 23HS7628

2.4.4.1. Caja reductora planetaria 57HS76304-XG15-100

La caja reductora de engranes planetarios es usada en aplicaciones donde se requiere altas relaciones en poco espacio. La caja 57HS76304-XG15-100 ofrece una relación de 100:1 y al unirlo al motor se obtiene un torque de $40 [Nm]$.



Figura 32. Caja planetaria 100:1

Tabla 16.
Características de la caja planetaria
57HS76304-XG15-100

Característica	Dato	Unidad
Relación	100:1	-
Longitud	70	[mm]
Torque	40	[Nm]
Eficiencia	90	[%]
Peso	1.1	[kg]

Fuente: Hoja de datos

2.4.5. CONTROL DE UN MOTOR A PASOS

El control de un motor de pasos es secuencial, cada bobina se energiza de manera específica para dar movimiento al rotor. Sin embargo, existen controladores que simplifican el proceso con solo dos entradas digitales para proporcionar la información de sentido de giro y el avance que se le va a dar al motor.

2.4.5.1. Driver HY DIV268N-5A

Es un driver capaz de controlar al motor de pasos por medio de dos entradas (Dirección y avance); permite manejar altos voltajes y limitar la intensidad que puede dañar al motor. Además de manejar al motor por micro pasos a una relación de 1/16 mejorando notablemente la precisión original en grados del motor.



Figura 33. Driver HY DIV268N-5A

Se selecciona este controlador debido a las siguientes características:

- Alta relación costo – eficiencia.
- Reducción automática de la corriente en inactividad.
- Tensión de alimentación de hasta 50 VDC.
- Corriente de salida de hasta 5 [A].
- Apto para motores de dos o cuatro fases.
- Aislamiento optoelectrónico de alta velocidad para las entradas.
- Control de micropasos entre 1, 1/2, 1/4, 1/8 y 1/16 para movimientos más pequeños, mas suaves y más precisos.
- Protección contra sobrecarga, sobretensión, subtensión, sobreintensidad, y sobrecalentamiento para evitar daños a la computadora y dispositivos.

2.4.6. SISTEMA DE CONTROL

En la elaboración del sistema de control para el hombro se recuerda su utilidad que es girar de 0° a 90° . El motor de pasos no almacena su posición al desconectar la fuente de alimentación o de control y para ello se usa un sensor de posición final de carrera para indicar al sistema que es la posición cero (home) del motor. Todas las variables a controlar son digitales tanto entradas como salidas. El sistema electrónico del hombro se representa en el siguiente gráfico:

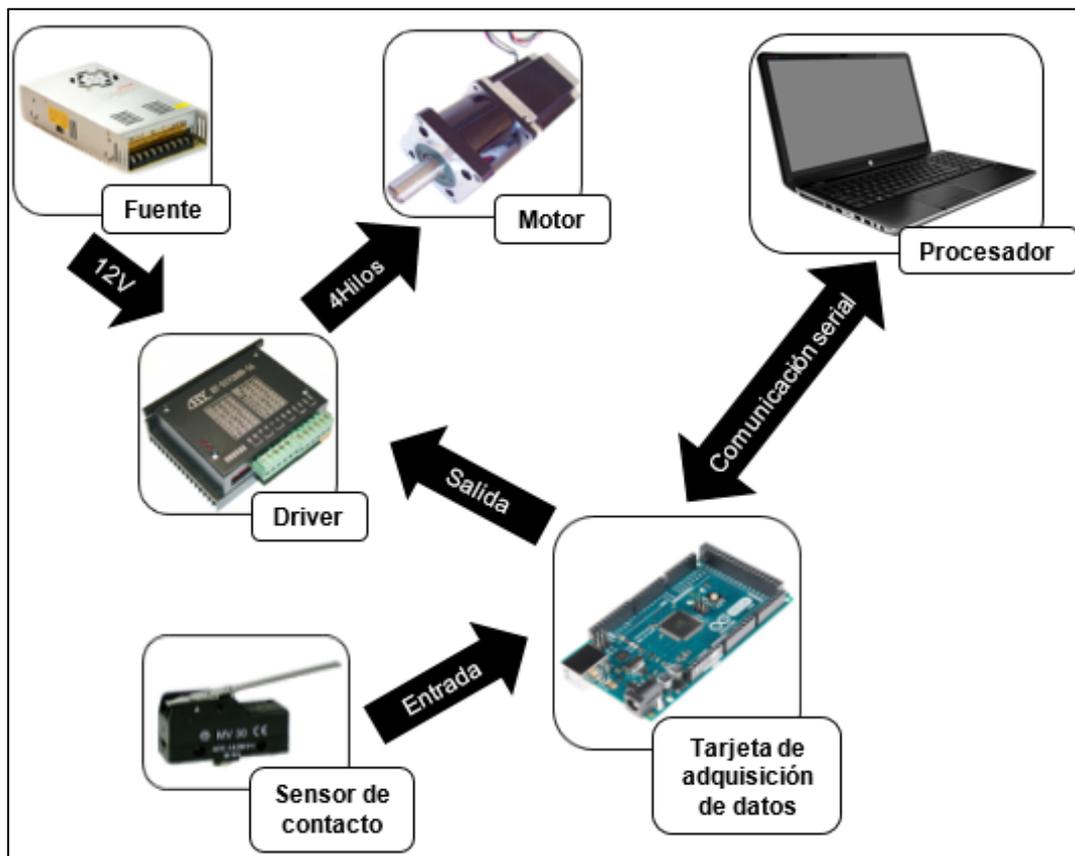


Figura 34. Esquema electrónico

2.4.6.1. Tarjeta de adquisición de datos

Para la adquisición de datos se usa las placas de la empresa Arduino que trabajan en base a un microcontrolador y ofrece grandes ventajas al ser de hardware libre. En este proyecto se utiliza un Arduino Nano o UNO, pues solo son necesarias 2 salidas digitales para el driver y 1 entrada digital para el final de carrera. Sin embargo, el brazo robótico "UTN" tiene una sola tarjeta capaz de comandar a todo el sistema y por ello es elegido el Arduino MEGA 2560 que ofrece 54 pines digitales para entrada o salida de datos y una velocidad de reloj de $16 [Mhz]$. Para utilizar el arduino como

tarjeta de adquisición de datos se ejecuta el programa “*LIFA_Base*” que es encargado de establecer comunicación serial con el ordenador y el software de programación.

2.4.7. PROGRAMACIÓN

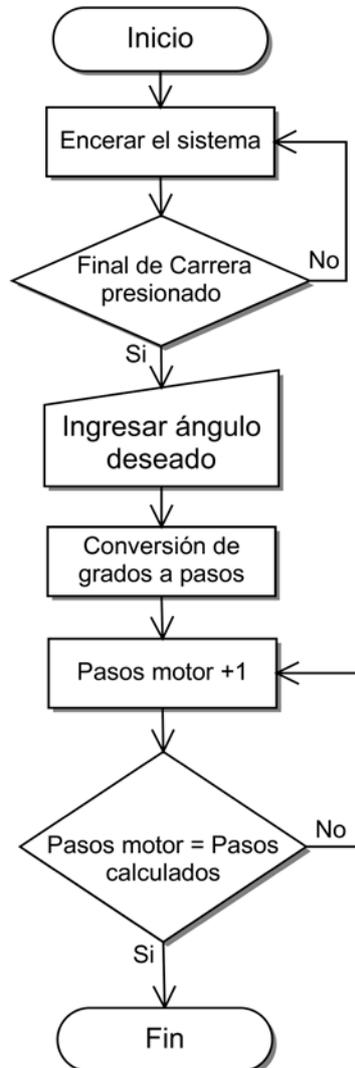


Figura 35. Flujograma control de hombro

El hombro es controlado por medio de un software de programación gráfica. En este se hace uso de subprogramas para que se facilite la unión con los demás proyectos del BRUTN.

La *Figura 35* muestra el flujograma de procesos donde muestra en forma sistemática la lógica empleada en el objetivo de controlar al hombro. A partir de este esquema se traduce a lenguaje de programación.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1. DISEÑO DEL HOMBRO PARA BRAZO ROBÓTICO “UTN”

Después de haber realizado los cálculos de los componentes se realizó el CAD antes de la construcción y obteniendo todos los parámetros especificados en la *Tabla 2* y *Tabla 3*.

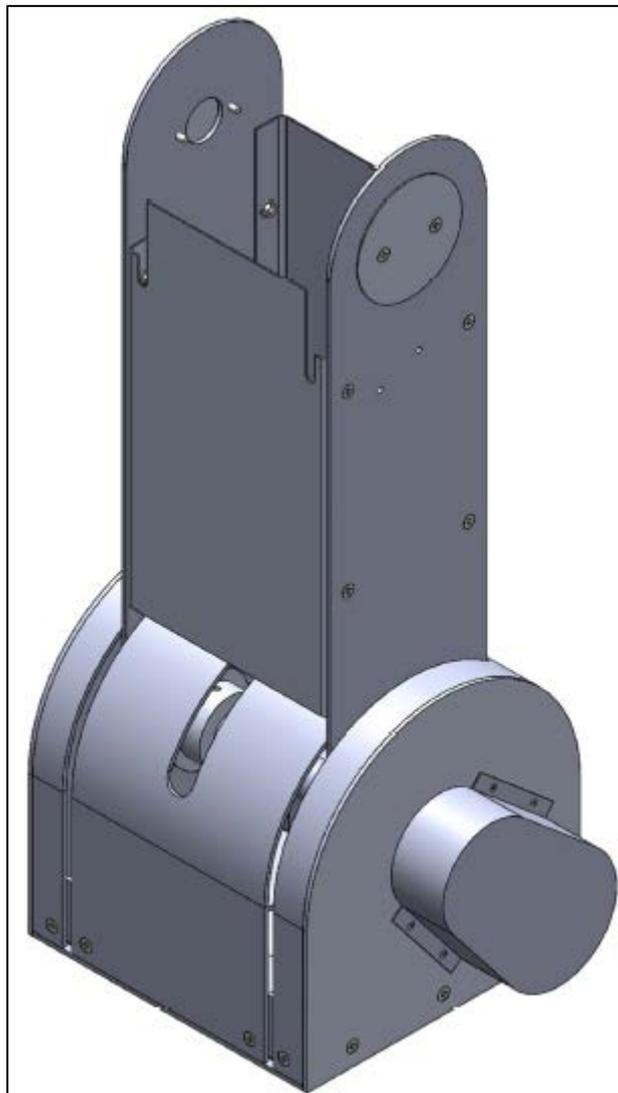


Figura 37. Modelo 3D del hombro para el B.R. "UTN".

En la *Figura 37* se presenta una vista isométrica del modelo 3D del prototipo completamente diseñado.

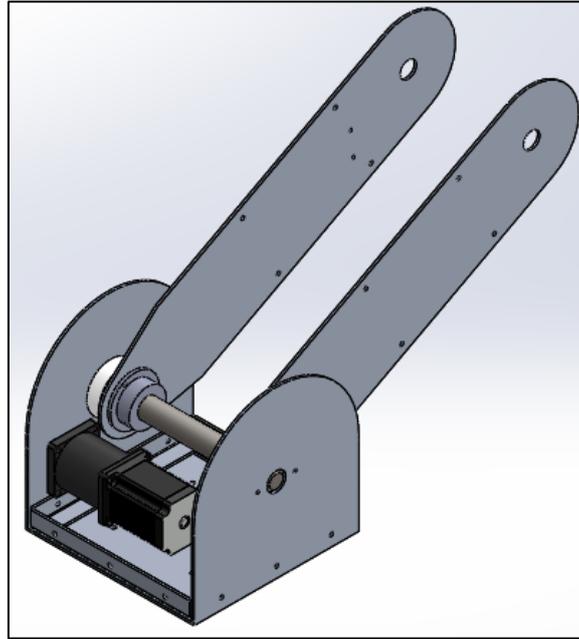


Figura 38. Vista del armazón del prototipo

La *Figura 38* presenta una vista del modelo sin las tapas externas dejando ver el armazón que soporta al sistema incluyendo al motor de pasos y la caja reductora planetaria que contrarrestan y aportan el par necesario para mover los grados indicados al sistema.

3.1.1. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Mediante el análisis numérico computacional se determinaron los esfuerzos combinados de Von Mises, el desplazamiento y el factor de seguridad mínimo. Para asegurar la convergencia del modelo se realiza el análisis en función del esfuerzo de von mises y el número de elementos (*Tabla 17*).

Tabla 17.
Análisis de convergencia del modelo

Nº. elementos	Esfuerzo (MPa)	Error (%)
19078	8.226	-
19562	8.237	0.13
20261	8.14	1.18
21706	6.212	23.7
21903	5.163	16.9
22285	6.907	33.8

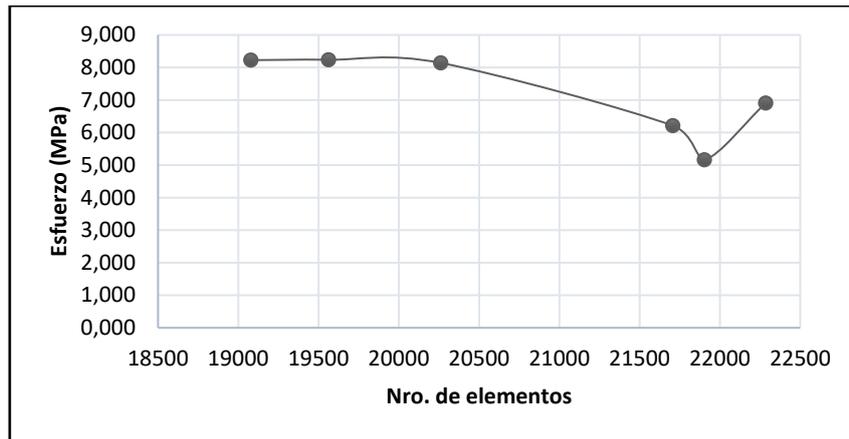


Figura 39. Análisis de convergencia

La zona de convergencia se encuentra entre los 19000 y 20000 elementos; se utilizan los resultados obtenidos a partir del análisis de los 19562 elementos.

3.1.1.1. Factor de seguridad

En este análisis el software considera las resistencias de los materiales empleados con los esfuerzos admisibles y obtiene un factor de seguridad de 3.5.

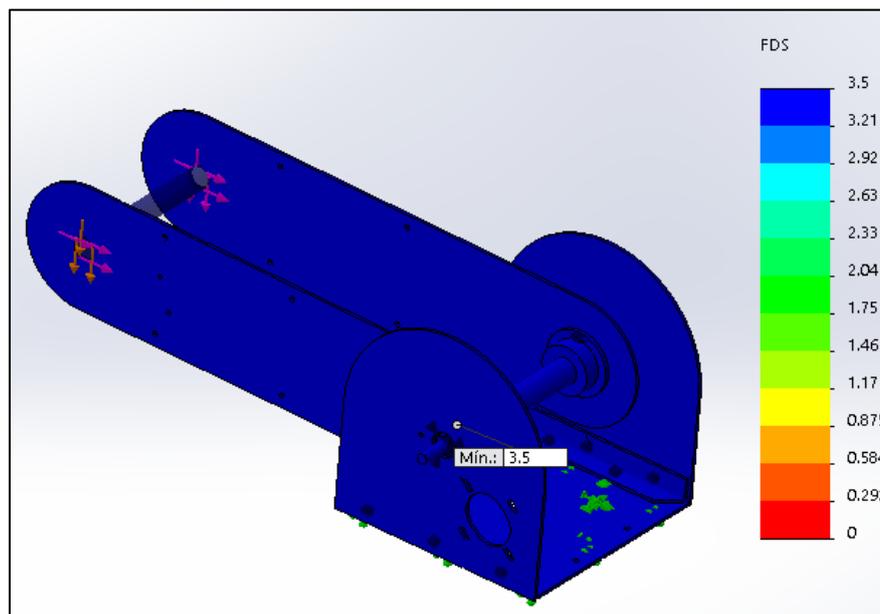


Figura 40. Factor de seguridad

3.1.1.2. Desplazamiento

En la *Figura 41* se muestra que el punto de mayor desplazamiento es de 0.057 [mm] asegurando la confiabilidad del sistema después de varias repeticiones y horas de trabajo y la selección del material es la correcta.

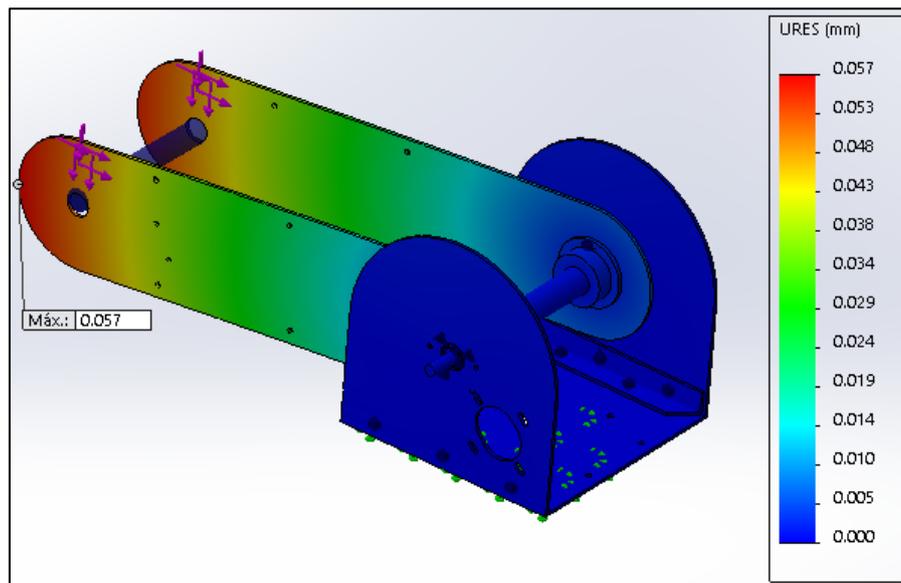


Figura 41. Desplazamiento del modelo

3.1.1.3. Esfuerzo máximo de Von Mises

Se observa en la *Figura 42* que la zona de máximo esfuerzo se encuentra en la sección de apoyo para los rodamientos en el eje. Sin embargo, el esfuerzo máximo no supera al esfuerzo admisible del eje.

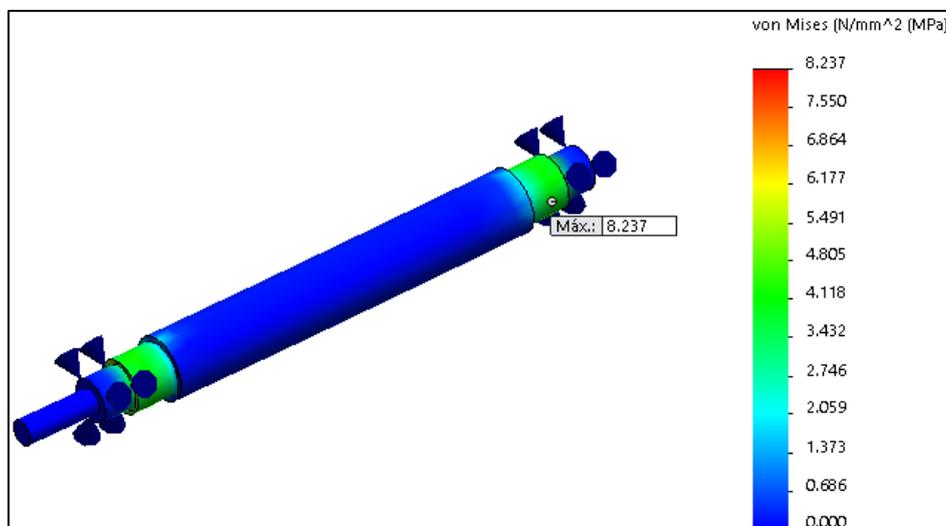


Figura 42. Esfuerzo máximo

3.2. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE

Después de someter a las piezas al diseño asistido por computadora y haber asegurado la resistencia del diseño por medio de elementos numéricos se procede a la adquisición de la materia prima para la construcción de todos los elementos y posterior ensamblaje del hombro y brazo. La adquisición de los materiales se realizó

en el mercado local a excepción del motor, driver y la caja de engranes que fueron de importación al no encontrar los elementos de esas características en el país.

La construcción y ensamblaje de todas las partes constitutivas se las realizó en un taller metal mecánico a partir de los planos de construcción que se presentan en el *Anexo 1*. A continuación, se presentan imágenes del proceso de construcción, ensamblaje y el prototipo final.



Figura 43. Corte de los laterales para hombro y brazo



Figura 44. Torneado del eje en acero AISI 4340



Figura 45. Torneado porta-rodamiento en nylon



Figura 46. Brida de sujeción, porta-rodamiento y eje terminados



Figura 47. Ensamblaje del brazo y hombro con el BRUTN



Figura 48. Brazo Robótico UTN

3.3. COMPROBACIÓN DE LA CINEMÁTICA POR SOFTWARE

Utilizando las funciones de un software de robótica desarrollado por Peter Corke se representa la matriz homogénea del Brazo Robótico. Haciendo uso de los datos obtenidos de los parámetros Denavit – Hartenberg (*Tabla 13*), se declara cada eslabón siguiendo el orden $\theta_k, d_j, a_j, \alpha_j$. Y define al brazo robótico UTN como una serie de vínculos interconectados.

```
BRUTN =
Brazo Robotico UTN (5 axis, RRRRR, stdDH, fastRNE)
-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |   theta |     d |     a |   alpha |   offset |
-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |     q1 |   0.1 |     0 |   1.571 |         0 |
| 2 |     q2 |     0 |   0.4 |         0 |         0 |
| 3 |     q3 |     0 |   0.3 |         0 |         0 |
| 4 |     q4 |     0 |     0 |  -1.571 |  -1.571 |
| 5 |     q5 |   0.2 |     0 |   1.571 |         0 |
-----+-----+-----+-----+-----+-----+
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 49. Parámetros DH comprobados por software.

En la *Figura 49* se observa el Brazo Robótico UTN queda definido como un robot de 5 eslabones (j) y 6 grados de libertad ($j + gripper$).

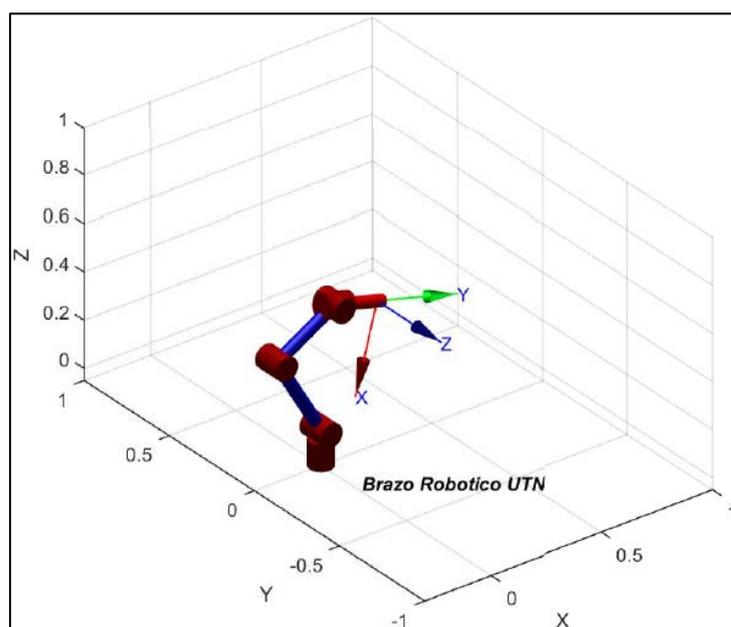


Figura 50. Representación 3D del BRUTN

Al crear el Brazo Robótico por software permite comprobar varias características como la posición (coordenadas) del efector final en el espacio después de una o varias trayectorias (cinemática directa e inversa).

Se obtiene una matriz de transformación homogénea donde se encuentra las coordenadas del gripper después que el brazo robótico haya generado un movimiento.

Por ejemplo, cuando el manipulador se encuentra en la posición “home” las coordenadas del gripper en el espacio XYZ son: $P_x = 0.253$, $P_y = 0$ y $P_z = 0.5446$ y si realiza un movimiento $P[\pi/2 \ 0.5 \ -\pi/2 \ -\pi/4 \ \pi/2]$ (cada elemento representa el ángulo de cada articulación respectiva), entonces:

CD(:, :, 36) =			
-0.4794	-0.0000	0.8776	-0.0000
0.4207	0.8776	0.2298	0.7898
-0.7702	0.4794	-0.4207	0.5315
0	0	0	1.0000

Figura 51. Matriz Homogénea para una traslación

Como se muestra en la matriz homogénea de la *Figura 52* la nueva posición del efector final después de una traslación es: $P_x = 0$, $P_y = 0.7898$ y $P_z = 0.5315$.

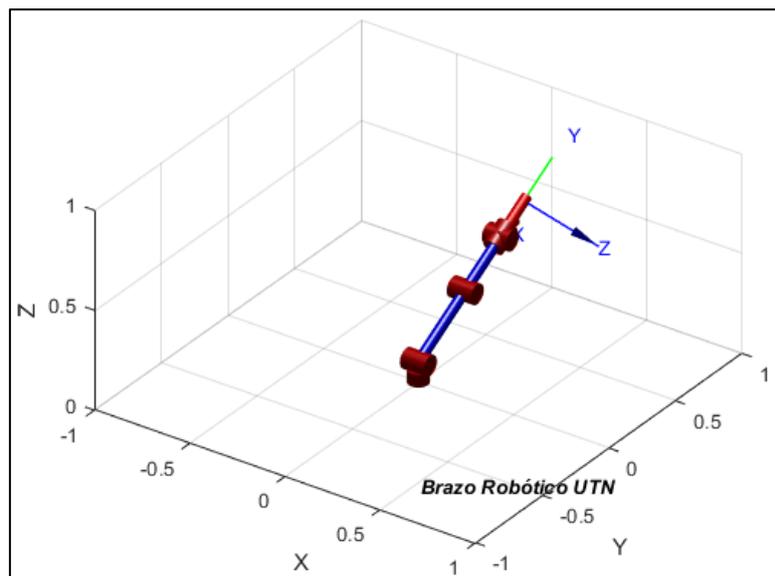


Figura 52. Brazo Robótico después de su primer movimiento

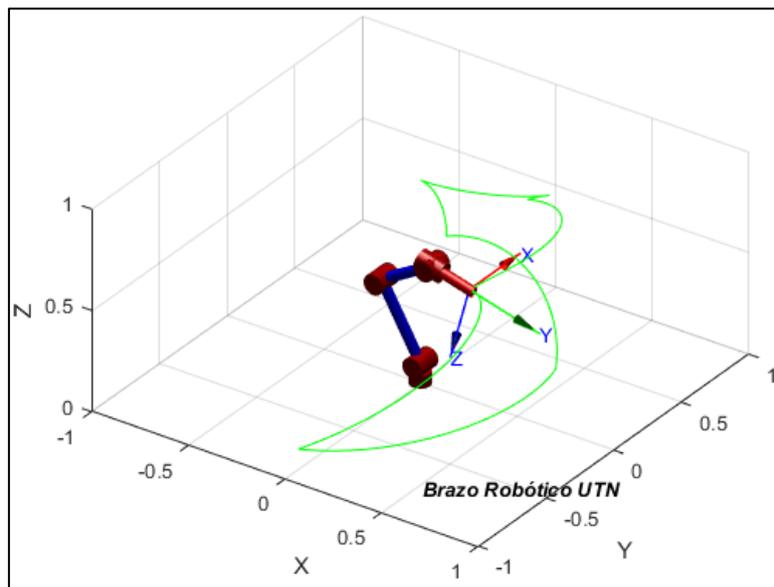


Figura 53. Trayectoria recorrida durante un ciclo de trabajo

La *Figura 53* representa la obtención de la cinemática directa, mostrando la ruta seguida por el gripper durante varios movimientos consecutivos. Esta trayectoria inicia y termina en el punto “home”.

Se comprueba de esta manera que los parámetros Denavith - Hartenberg son los correctos y que las ecuaciones de cinemática directa e indirecta también corresponden al BRUTN. La obtención de estos datos es fundamental para localizar al Brazo Robótico en el espacio y codificarlo en lenguaje de programación.

3.4. PRUEBAS DE REPETITIVIDAD

Con el prototipo completamente ensamblado es necesario conocer la repetitibilidad del hombro. Para esto se tomó datos del brazo en una posición y se ejecutó una secuencia de 20 repeticiones con el objetivo de saber si el brazo va a llegar al mismo punto de partida y fin. Se obtuvo los siguientes datos:

Tabla 18.
Pruebas de repetitividad

Número de repetición	Grado inicial [°]	Grado final [°]
1	0	45
2	0	45
5	0	45
10	1	46
20	2	47

Ecuación 15. Error porcentual

$$e\% = \frac{|V_T - V_e|}{V_T} * 100$$

donde:

- e%: error porcentual,
- V_T : valor final,
- V_e : valor inicial.

Utilizando la *Ecuación 15* se obtiene el error porcentual que el hombro de brazo robótico posee al ejercer operaciones repetitivas. El error máximo es del **2%** después de varias repeticiones.



Figura 54. Pruebas de repetitibilidad

3.5. PRUEBAS DE PRECISIÓN

Con el fin de conocer si los grados deseados son los mismos que se obtienen se realizaron pruebas de precisión con marcas graduadas (*Figura 55*).



Figura 55. Marcas graduadas para pruebas de precisión

Para tener certeza en las mediciones se realizaron varias pruebas con el codo extendido, el gripper sosteniendo la carga y sin ella. A continuación, los resultados:

Tabla 19.
Resultados de las pruebas de precisión

Bajada sin carga [°]		Subida sin carga [°]		Bajada con carga [°]		Subida con carga [°]	
Dato ingresado	Dato obtenido	Dato ingresado	Dato obtenido	Dato ingresado	Dato obtenido	Dato ingresado	Dato obtenido
90	90	90	90	90	90	90	90
85	86	85	85	85	85	85	85
80	80	80	79	80	79	80	79
75	74	75	73,5	75	73,5	75	73,5
70	69	70	68	70	68	70	68
65	63	65	62	65	62	65	62
60	58	60	57	60	56,5	60	56,5
50	47	50	46	50	45,5	50	45,5
40	36	40	36	40	35	40	35
30	26	30	25,5	30	25	30	25
20	15	20	15	20	14	20	14
10	5	10	5,5	10	4	10	4
0	0	0	0	0	0	0	0

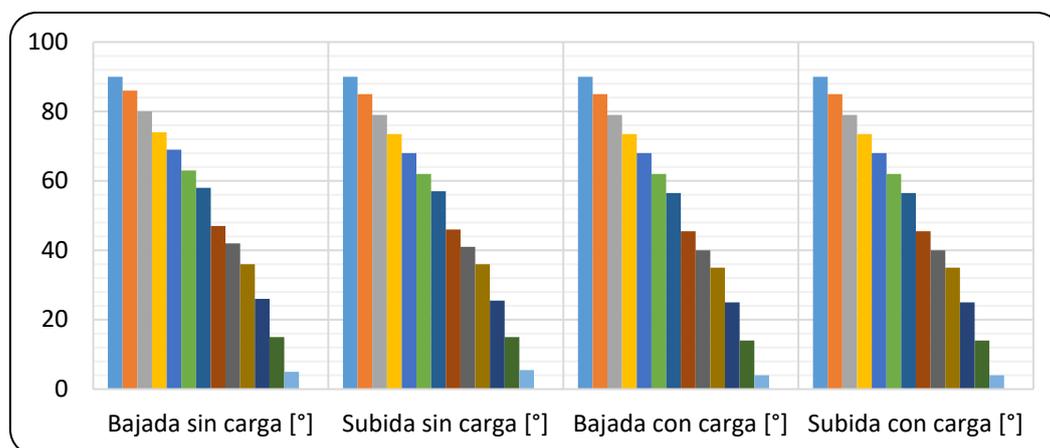


Figura 56. Datos obtenidos de las pruebas de precisión

Usando los datos obtenidos de la *Tabla 19* se elaboró la *Figura 56* para hacer una comparación entre todas las pruebas y demostrar que el sistema responde de manera similar con o sin carga. La precisión llega a tener un error porcentual de hasta el 5% por lo cual se recomienda mejorar la transmisión para evitar pérdidas y obtener un sistema más robusto.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. CONCLUSIONES.

- Se diseñó y se construyó con éxito el eslabón y la articulación de hombro para el prototipo de brazo robótico para el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte siguiendo los parámetros.
- El mecanismo de hombro cumple con el parámetro de movimiento de $0[^\circ]$ a $90[^\circ]$, el parámetro de peso a levantar que es de 1 [kg] y de ser acoplable con el resto de elementos del brazo robótico "UTN".
- Se realizó el diseño de los componentes mecánicos y de la estructura del hombro para el Brazo Robótico "UTN" y se verificó su veracidad haciendo uso de herramientas computacionales basadas en elementos finitos donde se obtuvo un factor de seguridad de 3.5 y un desplazamiento 0.057. Con esto se verificó la correcta selección del material el aluminio ASTM 1200 para tapas y laterales y el acero AISI 4340 para el eje.
- Se obtuvo la cinemática directa e inversa del sistema y se implementó en el hombro para conocer las trayectorias como posiciones que debe cumplir en su rango máximo de operación de $0 [^\circ]$ a $90 [^\circ]$ y de 40 [cm] desde su base.
- Se construyó y ensambló todos los elementos mecánicos para el eslabón y hombro del Brazo Robótico "UTN" con una tolerancia de ± 0.2 usando los planos creados a partir del diseño CAD bajo el diseño propuesto por el INEN.
- Se realizó el diseño del sistema de control de la articulación de hombro para que pueda fusionarse perfectamente con las demás partes constitutivas del Brazo Robótico "UTN"

4.2. RECOMENDACIONES.

- Para mejorar la precisión y repetitividad del hombro para BRUTN se recomienda realizar un seteo con el final de carrera siempre que se vaya a ejecutar alguna instrucción o después de realizar 5 secuencias seguidas con el fin de asegurar que no se pierdan posiciones graduales.
- Como investigación futura se recomienda implementar al BRUTN con visión artificial para que se ubique espacialmente y dotar al sistema de mayor autonomía.
- Realizar un rediseño del hombro utilizando varios tipos de transmisiones para que la mayoría de los motores puedan ubicarse en la base inferior y así reducir peso y sobre esfuerzos del motor del hombro.
- Iniciar un estudio de materiales para mejorar la presentación final del brazo, se sugiere fibras de vidrio o impresiones 3D que hoy en día están revolucionando la industria de la manufactura.
- A pesar de que los motores de pasos se ubican en cualquier ángulo deseado sin necesidad de retroalimentación se recomienda usar encoders o sensores de posición que verifique la posición angular y no hubo pérdida de pasos.
- Para cargas mayores a 1 [Kg] se recomienda usar servomotores industriales o hacer un estudio de motores e incluir sensores de corriente y así evitar la falla por subidas de amperaje.
- Se recomienda hacer uso del manual de usuario antes de operar a la máquina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. (2017). Datos del IRB 120 - IRB 120 - Industrial Robots (Robotics) (Robots industriales) | ABB. Retrieved from <http://new.abb.com/products/robotics/es/robots-industriales/irb-120/datos>
- Alafita Manzanares, J. A. (2015). Operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos y control de los mecanismos de las compuertas de la presa Miguel de la Madrid Hurtado.
- Alonzo, F. (2014). Diseño, construcción y control de un brazo robótico.
- Apostolovich, L., & Felipe, L. (2011). Modelación y simulación dinámica de un brazo robótico de 4 grados de libertad para tareas sobre un plano horizontal.
- Arduino.com. (2014, 2014-10-24). Arduino Mega 2560 R3 ~ Arduino.cl. Retrieved from <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>
- Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). Fundamentos de robótica: McGraw-Hill, Interamericana de España.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México DF: McGRAW-HILL.
- Bueno, A. (2015). Control y Robótica.
- CFIE, V. (2015). 5.4 Robots industriales. Retrieved from http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm
- Cortés, F. R. (2011). Robótica: Control de Robots Manipuladores: Marcombo.
- Córdova, J., & Stalin, P. (2009). Diseño y construcción de un brazo robótico a base de un PIC, para transportar objetos entre dos puntos fijos, e implementación de un sistema HMI para su monitoreo.
- DIPAC. (2016). AISI 1018(Transmisión).
- Hernández Bello, I. I., & Ochoa Luna, C. (2004). Control difuso y construcción de un mecanismo capaz de golpear con distintos efectos una bola de billar. (Ingeniería en Electrónica y Computadoras), Universidad de las Américas Puebla, Puebla. Retrieved from http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_ii/
- Jabonero Cámara, J. (2010). Modelado y análisis de un brazo mecánico.
- Jaramillo Rojas, D. A. (2010). Modelo, simulación y control de un Brazo Robótico mediante Matlab y Simulink para soldadura de arco. (Ingeniero Mecánico), Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Maloney, T. J. (2006). Electrónica industrial moderna: Pearson Educación.

- Mott, R. L. (2006). Diseño de elementos de máquinas: Pearson Educación.
- Paul, R. P. (1981). Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot manipulators: Richard Paul.
- Pendino, C., & Crespo, M. (2016). 21505-16 TECNOLOGÍA DE CONTROL Dinámica de los Sistemas Físicos.
- Peña Pardo, A. G., Pérez Sarmiento, J. G., & Suárez Saavedra, M. F. (2005). Prototipo de un robot tipo puma de seis grados de libertad. (Ingeniería Electrónica), UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Bucaramanga - Colombia.
- Pérez González, A. (2008). Fórmula de Grubler. Retrieved from http://www.mecapedia.uji.es/formula_de_Grubler.htm
- SACOR. (2017). MOTOR PASOS NEMA 23 90Ncm.
- Saha, S. K. (2010). Introducción a la Robótica (McGraw-Hill Ed. Primera en español ed.). México: McGraw-Hill.
- SKF. (2006). Catálogo general. In SKF (Ed.), (6000 ES ed., pp. 1133). Suecia: SKF.
- Soto Bravo, C. A. (2016). Brazo robótico de 5GDL con sistema de control modificable por el usuario para fines de investigación en ingeniería robótica.
- Tituaña, P., Verónica, I., & Jacho Jami, G. F. (2010). Diseño y construcción de un robot para entrega de hojas volantes publicitarias en centros comerciales.
- Villamizar Gallardo, A. (2016). Concepto de Torque y Ejemplos.

ANEXOS