



unl

Universidad
Nacional
de Loja

**FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS
Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TÍTULO:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO
ROBÓTICO INDUSTRIAL A ESCALA”**

**Tesis de grado previo
a optar por el título de
Ingeniero Electromecánico**

AUTOR:

Carlos Alberto Trelles Jaramillo

DIRECTOR:

Ing. Jefferson Fernando Camacho Muñoz, Mg. Sc.

LOJA – ECUADOR

2021

CERTIFICACIÓN

Ing. Jefferson Fernando Camacho Muñoz, Mg. Sc.
DIRECTOR DE TESIS.

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO INDUSTRIAL A ESCALA**”, previa a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, realizado por el señor egresado: **Carlos Alberto Trelles Jaramillo**, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 20 de agosto del 2020.



Firmado electrónicamente por:
**JEFFERSON
FERNANDO CAMACHO
MUNOZ**

Ing. Jefferson Fernando Camacho Muñoz, Mg. Sc.
DIRECTOR DE TESIS.

AUTORÍA

Yo, **CARLOS ALBERTO TRELLES JARAMILLO**, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la **Universidad Nacional de Loja** y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional- Biblioteca Virtual.

Loja, 27 de agosto de 2021.



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ALBERTO
TRELLES
JARAMILLO**

Carlos Alberto Trelles Jaramillo

C.I 1104438211

CARTA DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo, **CARLOS ALBERTO TRELLES JARAMILLO**, declaro ser autor de la tesis titulada: “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO INDUSTRIAL A ESCALA**”, como requisito para optar al grado de **INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con los cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización en la ciudad de Loja, a los diecisiete días del mes de agosto del dos mil veintiuno.

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ALBERTO
TRELLES
JARAMILLO**

Autor: Carlos Alberto Trelles Jaramillo

Cédula: 1104438211

Dirección: Loja (Cdla. Sauces Norte)

Correo electrónico personal: carlostrelles17@gmail.com

Correo electrónico institucional: catrellesj@unl.edu.ec

Teléfono: 072542639

Celular: 0984950492

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de tesis: Ing. Jefferson Fernando Camacho Muñoz, Mg. Sc.

Tribunal de grado: Ing. José Leonardo Benavides Maldonado, Mg. Sc.

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.

Ing. Julio César Cuenca Lima, Mg. Sc.

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis primeramente a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí hoy, por darme fuerza y salud para llevar a cabo mis metas y objetivos. A mis padres Betty y Bernardo, por apoyarme incondicionalmente en toda mi carrera universitaria y siempre confiar en mí.

A mis hermanos Luis y Lola por ser una guía en cada paso de mi vida, por ayudarme a ser lo que soy yo hoy en día.

A mi novia Kerly, que en poco tiempo ha llegado a ser una persona muy importante en mi vida y me ha alentado día a día a que culmine con el presente proyecto, te amo.

Finalmente, dedico este proyecto a mis amigos y familiares que han estado ahí cada día brindándome su apoyo y fuerza para seguir adelante.

- **Carlos Trelles.**

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer este proyecto a mi tutor, el Ing. Jefferson Fernando Camacho Muñoz, Mg. Sc. por ayudarme en cada paso y en cada dificultad que se ha presentado a lo largo de la siguiente tesis, por su trabajo, esfuerzo y dedicación para avanzar con el desarrollo del proyecto, demostrando sus amplios conocimientos y características que lo destacan como gran docente y excelente persona.

De igual manera expreso mi gratitud al cuerpo docente y administrativo de la carrera de Ingeniería Electromecánica, Facultad de la Energía, Las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja por impartirme una educación de calidad y brindarme sus conocimientos, que permitieron el desarrollo de mis estudios, hoy plasmados en el cumplimiento de esta meta.

Por ultimo agradezco a mis padres por todo el apoyo, tanto moral como económico brindado para la culminación de este proyecto. A mi tío Marco Trelles y tío José Trelles por brindarme su apoyo y aportar su grano de arena.

- **Carlos Trelles.**

ÍNDICE GENERAL

1. TÍTULO.....	1
2. RESUMEN.....	2
1.1 ABSTRACT.....	3
3. INTRODUCCIÓN.....	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
4.1 Robótica.....	6
4.1.1 Introducción.....	6
4.1.2 Automatización Industrial.....	7
4.1.2.1 Automatización Fija.....	7
4.1.2.2 Automatización Programable.....	8
4.1.2.3 Automatización Flexible.....	9
4.1.3 Definición de Robot Industrial.....	9
4.1.4 Clasificación del Robot Industrial.....	10
4.2 Cinemática y Dinámica de Robots.....	12
4.2.1 Cinemática De Los Robots Industriales.....	12
4.2.1.1 Cinemática Directa.....	12
4.2.1.2 Cinemática Inversa.....	13
4.2.2 Dinámica de los robots industriales.....	14
4.2.2.1 Dinámica inversa.....	14
4.2.2.2 Dinámica Directa.....	15
4.3 Morfología de los Robots.....	16
4.3.1 Estructura Mecánica de un Robot.....	16
4.3.2 Transmisores y Reductores.....	19
4.3.2.1 Transmisores.....	19
4.3.2.2 Reductores.....	20

4.3.3 Actuadores	21
4.4 Aplicaciones de los Robots.....	22
4.4.1 Aplicaciones Industriales de los Robots.....	22
4.4.2 Nuevos Sectores de Aplicación de los Robots	24
4.5 Criterios de Implementación de un Robot Industrial.....	25
4.5.1 Diseño y Control de una Célula Robotizada	25
4.5.1.1 Disposición del Robot en la Célula de Trabajo	26
4.5.1.2 Características del Sistema de Control de la Célula de Trabajo.....	30
4.5.2 Características a Considerar en la Selección de un Robot	31
4.6 Análisis de los Materiales	32
4.6.1 Acero	32
4.6.1.1 Aceros inoxidables.	33
4.6.2 Plástico	34
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
5.1 Materiales.....	36
5.2 Métodos	37
6. RESULTADOS	39
6.1 Propuesta de Diseño Conceptual.	39
6.1.1 Área de trabajo.	39
6.1.2 Grados de Libertad.	39
6.1.3 Velocidad.	39
6.1.4 Capacidad de Carga.....	40
6.1.5 Sistemas de transmisión.	40
6.1.6 Material de construcción.	40
6.1.7 Diseño Conceptual.	40
6.2 Simulación del Prototipo.	41

6.2.1 Torque Necesario para Realizar el Movimiento de cada Articulación	43
6.2.1.1 Torque de la Base.	44
6.2.1.2 Torque del Hombro.	45
6.2.1.3 Torque del Brazo.	46
6.2.1.4 Torque del Codo.	47
6.2.1.5 Torque del Antebrazo.	48
6.2.1.6 Torque de la Muñeca.	49
6.2.2 Selección de los Motores.....	50
6.3 Cálculo de las Transmisiones del Prototipo.....	50
6.3.1 Cálculo de la Articulación Base-Hombro	50
6.3.1.1 Cálculo Engranajes.	51
6.3.1.2 Cálculo del Esfuerzo Soportado por el Diente del Engranaje.	53
6.3.2 Cálculo de la Articulación Hombro-Brazo.....	55
6.3.2.1 Cálculo Engranajes.	56
6.3.2.2 Longitud de la Correa.	57
6.3.2.3 Selección de la Correa.	58
6.3.2.4 Número de Correas.....	59
6.3.2.5 Selección del Diámetro del Eje.	62
6.3.2.6 Selección de los Rodamientos.	67
6.4 Diseño 3D del Prototipo de Brazo Robótico Industrial	69
6.4.1 Base	69
6.4.2 Hombro.....	70
6.4.3 Brazo	71
6.4.4 Codo	72
6.4.5 Antebrazo	73
6.4.6 Muñeca.....	74

6.4.7 Prototipo	75
6.5 Construcción del Brazo Robótico	75
6.5.1 Impresión de las Piezas	75
6.5.2 Ensamblaje del Prototipo	80
6.5.2.1 Ensamblaje Base.....	80
6.5.2.2 Ensamblaje Hombro.	83
6.5.2.3 Ensamblaje Brazo.	85
6.5.2.4 Ensamblaje Codo.....	87
6.5.2.5 Ensamblaje Antebrazo.....	89
6.5.2.5 Ensamblaje Muñeca.....	91
6.5.2.5 Ensamblaje Final del Prototipo.....	94
6.5.3 Control del Prototipo.....	95
6.5.3.1 Control Básico del Prototipo.	96
6.5.3.2 Objeto a Levantar por el Actuador Final.	98
6.5.3.3 Prueba de la Articulación Base-Hombro.	98
6.5.3.4 Prueba de la Articulación Hombro-Brazo.	99
6.5.3.5 Prueba de la Articulación Brazo-Codo.....	100
6.5.3.6 Prueba de la Articulación Codo-Antebrazo.....	100
6.5.3.7 Prueba de la Articulación Antebrazo-Muñeca.....	101
6.5.3.8 Prueba de la Articulación Muñeca-Pinza.	102
6.5.4 Costos y Materiales	102
7. DISCUSIÓN.....	105
8. CONCLUSIONES.....	108
9. RECOMENDACIONES	109
10. BIBLIOGRAFÍA	110
11. ANEXOS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Cinemática directa e inversa de un brazo robótico.</i>	14
Figura 2 <i>Momentos y fuerzas que actúan sobre un eslabón normal i de un manipulador serial.</i>	14
Figura 3 <i>Pares de torsión de articulación del manipulador de un manipulador de dos eslabones.</i>	15
Figura 4 <i>Resultados de simulación para un manipulador de dos eslabones, únicamente bajo gravedad.</i>	16
Figura 5 <i>Distintos tipos de articulaciones para robots.</i>	17
Figura 6 <i>Configuraciones más frecuentes en robots industriales.</i>	18
Figura 7 <i>Grados de libertad del robot ARC Mate 120/8-12.</i>	19
Figura 8 <i>Aplicaciones industriales de los robots.</i>	23
Figura 9 <i>Ejemplo del lay-out de una célula robotizada de fabricación de calzado.</i>	26
Figura 10 <i>Disposición del robot en el centro de la célula.</i>	27
Figura 11 <i>Disposición del robot en línea.</i>	28
Figura 12 <i>Disposición de robot móvil sobre raíl.</i>	29
Figura 13 <i>Robot suspendido Güdel Trackmotion-Overhead.</i>	30
Figura 14 <i>Características a la hora de seleccionar un robot.</i>	32
Figura 15 <i>Ejemplo de simulación de un brazo robótico desarrollada en el programa Adams View</i>	38
Figura 16 <i>Pre diseño 2d del prototipo.</i>	40

Figura 17 <i>Diseño conceptual del prototipo de brazo robótico.....</i>	41
Figura 18 <i>Diseño del prototipo exportado al programa de simulación.</i>	42
Figura 19 <i>Secuencia de los movimientos del prototipo realizados en la simulación. ...</i>	43
Figura 20 <i>Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor de la base del prototipo.</i>	44
Figura 21 <i>Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor del hombro del prototipo.</i>	45
Figura 22 <i>Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor del brazo del prototipo.</i>	46
Figura 23 <i>Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor del codo del prototipo.</i>	47
Figura 24 <i>Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor del antebrazo del prototipo.</i>	48
Figura 25 <i>Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor de la muñeca del prototipo.</i>	49
Figura 26 <i>Articulación base-hombro</i>	51
Figura 27 <i>Articulación hombro-brazo.....</i>	55
Figura 28 <i>Diagrama de correa síncrona.....</i>	58
Figura 29 <i>Tabla para la selección del paso de las correas.....</i>	59
Figura 30 <i>Diagrama de fuerzas aplicadas a la correa de la articulación hombro-brazo.</i>	60
Figura 31 <i>Diagrama de cuerpo libre del eje de la articulación hombro-brazo.</i>	62
Figura 32 <i>Diagrama de fuerzas en el eje x de la articulación hombro-brazo</i>	63

Figura 33	<i>Fuerza cortante en el eje x de la articulación hombro-brazo.....</i>	63
Figura 34	<i>Momento flector en el eje x de la articulación hombro-brazo.....</i>	64
Figura 35	<i>Diagrama de fuerzas en el eje y de la articulación hombro-brazo.</i>	64
Figura 36	<i>Diagrama de fuerzas totales en el eje y de la articulación hombro-brazo... </i>	65
Figura 37	<i>Fuerza cortante en el eje y de la articulación hombro-brazo.....</i>	65
Figura 38	<i>Momento flector en el eje y de la articulación hombro-brazo.....</i>	66
Figura 39	<i>Diseño de la base del brazo robótico.....</i>	70
Figura 40	<i>Simulación estática de la base en el programa de Solid Works®.</i>	70
Figura 41	<i>Diseño de la base del brazo robótico.....</i>	71
Figura 42	<i>Diseño del brazo del prototipo.....</i>	71
Figura 43	<i>Simulación estática del brazo en el programa de Solid Works®.</i>	72
Figura 44	<i>Diseño del codo del brazo robótico.</i>	72
Figura 45	<i>Simulación estática del codo en el programa de Solid Works®.....</i>	73
Figura 46	<i>Diseño del antebrazo del brazo robótico.</i>	73
Figura 47	<i>Diseño de la muñeca del brazo robótico.</i>	74
Figura 48	<i>Simulación estática de la muñeca en el programa de Solid Works®.</i>	75
Figura 49	<i>Diseño del brazo robótico.....</i>	75
Figura 50	<i>Mecanizado de piezas del prototipo en impresora 3D.</i>	79
Figura 51	<i>Piezas necesarias para ensamblar la base del prototipo.</i>	80
Figura 52	<i>Ensamble del motor y piñón.....</i>	81
Figura 53	<i>Ensamble del motor en la base.</i>	81

Figura 54 <i>Pieza ART-TAPA RODAMIENTO atornillada a la base.</i>	82
Figura 55 <i>Ensamble final de la base.</i>	82
Figura 56 <i>Piezas necesarias para ensamblar el hombro del prototipo.</i>	83
Figura 57 <i>ART2- UNIÓN ARTICULACIÓN 1 con tapas.</i>	84
Figura 58 <i>Motor Pololu en ART2- UNIÓN ARTICULACIÓN 1.</i>	84
Figura 59 <i>Ensamble hombro.</i>	85
Figura 60 <i>Piezas necesarias para ensamblar el brazo del prototipo.</i>	86
Figura 61 <i>Unión piezas ART3- PARTE GIRATORIA A y ART3- PARTE GIRATORIA B.</i>	86
Figura 62 <i>Unión piezas ART3- UNIÓN ARTICULACIÓN 2, ART3- PARTE GIRATORIA A y ART3- PARTE GIRATORIA B.</i>	87
Figura 63 <i>Ensamble brazo.</i>	87
Figura 64 <i>Piezas necesarias para ensamblar el codo del prototipo.</i>	88
Figura 65 <i>Motor Pololu acoplado a la pieza ART4- PARTE GIRATORIA A.</i>	88
Figura 66 <i>Ensamble codo.</i>	89
Figura 67 <i>Piezas necesarias para ensamblar el antebrazo del prototipo.</i>	90
Figura 68 <i>Motor Pololu y tensor acoplados a la pieza ART5- UNIÓN ARTICULACIÓN 4.</i>	90
Figura 69 <i>Proceso de ensamblaje de la muñeca.</i>	91
Figura 70 <i>Ensamble muñeca.</i>	91
Figura 71 <i>Piezas necesarias para ensamblar el antebrazo del prototipo.</i>	92

Figura 72 <i>Unión del motor Pololu a la pieza ART6- PARTE GIRATORIA A.....</i>	93
Figura 73 <i>Ensamblaje de la pinza.</i>	93
Figura 74 <i>Unión del servomotor a la pinza.</i>	93
Figura 75. <i>Ensamblaje final de la muñeca.</i>	94
Figura 76 <i>Ensamblaje final del prototipo.....</i>	94
Figura 77 <i>Controlador de referencias de posición en el programa Solid Works®.</i>	95
Figura 78 <i>Ángulo de movimiento y distancia de trabajo del prototipo.</i>	96
Figura 79 <i>Diagrama de control mini controlador VNH2SP30 30A DUAL.</i>	96
Figura 80 <i>Circuito de control del mini controlador VNH2SP30 30A DUAL.....</i>	97
Figura 81 <i>Monitor en serie del programa Arduino.</i>	98
Figura 82 <i>Peso de objeto a levantar por el prototipo</i>	98
Figura 83 <i>Movimiento de la articulación base-hombro.</i>	99
Figura 84 <i>Movimiento de la articulación hombro-brazo.</i>	99
Figura 85 <i>Movimiento de la articulación brazo-codo.</i>	100
Figura 86 <i>Movimiento de la articulación codo-antebrazo.</i>	101
Figura 87 <i>Movimiento de la articulación antebrazo-muñeca.</i>	101
Figura 88 <i>Movimiento de la articulación muñeca-pinza.....</i>	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de los robots según la AFRI.</i>	11
Tabla 2 <i>Clasificación de los robots industriales por generaciones.</i>	11
Tabla 3 <i>Clasificación de los robots según Knase.</i>	12
Tabla 4 <i>Tipos de actuadores empleados en robótica</i>	21
Tabla 5 <i>Algunas propiedades de los aceros.</i>	34
Tabla 6 <i>Algunas propiedades de los termoplastos.</i>	35
Tabla 7 <i>Algunas propiedades de los termofijos.</i>	35
Tabla 8 <i>Tabulación de datos de la gráfica 25.</i>	44
Tabla 9 <i>Tabulación de datos de la gráfica 26.</i>	45
Tabla 10 <i>Tabulación de datos de la gráfica 27.</i>	46
Tabla 11 <i>Tabulación de datos de la gráfica 28.</i>	47
Tabla 12 <i>Tabulación de datos de la gráfica 29</i>	48
Tabla 13 <i>Tabulación de datos de la gráfica 30.</i>	49
Tabla 14 <i>Selección del torque del motor de cada articulación.</i>	50
Tabla 15 <i>Factor de forma de Lewis Y</i>	54
Tabla 16 <i>Propiedades mecánicas del PLA con fibra de carbono.</i>	55
Tabla 17 <i>Piezas exportadas a programa para impresión 3D.</i>	76
Tabla 18 <i>Piezas a utilizar en el ensamble de la base.</i>	80
Tabla 19 <i>Piezas a utilizar en el ensamble del hombro.</i>	83
Tabla 20 <i>Piezas a utilizar en el ensamble del brazo.</i>	85

Tabla 21 <i>Piezas a utilizar en el ensamble del codo.</i>	87
Tabla 22 <i>Piezas a utilizar en el ensamble del antebrazo.</i>	89
Tabla 23 <i>Piezas a utilizar en el ensamble de la muñeca.</i>	91
Tabla 24 <i>Pruebas de control de la base-hombro.</i>	99
Tabla 25 <i>Pruebas de control del hombro-brazo.</i>	100
Tabla 26 <i>Pruebas de control del brazo-codo.</i>	100
Tabla 27 <i>Pruebas de control del codo-antebrazo.</i>	101
Tabla 28 <i>Pruebas de control del antebrazo-muñeca.</i>	102
Tabla 29 <i>Pruebas de control de la muñeca-pinza.</i>	102
Tabla 30 <i>Presupuesto total del prototipo.</i>	103

1. TÍTULO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO
INDUSTRIAL A ESCALA”**

2. RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó y construyó un prototipo de brazo robótico industrial de 6 grados de libertad cuya estructura es de fibra de carbono impresa en 3D, siendo validado con una carga máxima de 0,5 kg. El diseño conceptual del brazo fue inspirado en un modelo de robot antropomórfico definiéndose seis articulaciones principales (base, hombro, brazo, codo, antebrazo y muñeca), logrando una amplia área de trabajo para desempeñar operaciones de *pick and place*, soldadura, paletización, pintura, fresado, entre otros. En el diseño detallado se realizó simulaciones cinemáticas y dinámicas en el aplicativo *Adams View* facilitando la obtención de las características operacionales, esfuerzos y los requerimientos de potencia. Para los componentes de transmisión de potencia: ejes, rodamientos, transmisión por correas de sincronismos y engranajes se utilizó las diferentes teorías de diseño de elementos de máquinas. El sistema de control se basa en un mini driver para motor Monster VNH2SP30 30A Dual comandado por Arduino y programado en Arduino IDE. Finalmente se validó la construcción y el diseño del prototipo sometándolo a pruebas de movimiento, precisión y resistencia. En las pruebas de movimiento se midió la velocidad en r.p.m con la que puede trabajar cada una de las articulaciones, en las de precisión se obtuvo los ángulos (°) de trabajo del prototipo y en las de resistencia se obtuvo la carga máxima en kg que puede soportar cada parte del brazo robótico. Se obtuvo un prototipo a escala, industrial y funcional, el cual cumple con todas las expectativas planteadas en el proyecto.

Palabras clave: Prototipo de brazo robótico, diseño, robótica

1.1 ABSTRACT

In the present work, a prototype of industrial robotic arm of 6 degrees of freedom was designed and built whose structure is of carbon fiber printed in 3D, being validated with a maximum load of 0,5 kg. The conceptual design of the arm was inspired by an anthropomorphic robot model defining six main joints (base, shoulder, arm, elbow, forearm and wrist), achieving a wide working area to perform pick and place operations, welding, palletizing, painting, milling, among others. In the detailed design, kinematic and dynamic simulations were performed in the Adams View application, facilitating the obtaining of operational characteristics, forces and power requirements. For the power transmission components: shafts, bearings, transmission by synchronism belts and gears the different design theories of machine elements were used. The control system is based on a mini driver for Monster VNH2SP30 30A Dual engine commanded by Arduino and programmed in Arduino IDE. Finally, the construction and design of the prototype was validated and subjected to tests of movement, precision and resistance. In the tests of movement the speed was measured in r.p.m with which it can work each of the joints, in those of precision the angles (°) were obtained the maximum load in kg that each part of the robotic arm can withstand. A prototype was obtained at scale, industrial and functional, which meets all the expectations raised in the project.

Keywords: robotic arm prototype, design, robotics

3. INTRODUCCIÓN

Es notorio el problema del carecimiento de la robótica industrial en Ecuador en comparación a otros países, los cuales nos llevan décadas de ventaja. Muy pocas empresas ecuatorianas poseen este tipo de innovación, que les permite producir una mayor cantidad de producto a menor costo. Es muy difícil competir con empresas internacionales de forma manual o con poca tecnificación en sus procesos, por ello es indispensable que la mayor parte de procesos sean de forma automática.

El trabajo manual en procesos industriales demanda mayor tiempo y mano de obra por lo cual se incrementan los costos. Se presentan trabajos repetitivos o peligrosos, los cuales, al operador, con el transcurso del tiempo pueden generarle problemas de salud graves.

La tecnología de impresión 3D permite realizar diseños complejos disminuyendo el tiempo de mecanizado y abaratando los costos de construcción. Se puede imprimir en diferentes tipos de materiales, entre ellos la fibra de carbono, destacada por su alta resistencia mecánica y fácil adhesión.

Por lo mencionado anteriormente, nace la idea de investigación del presente trabajo, buscando diseñar y construir un prototipo de un brazo robótico industrial a escala de 6 grados de libertad de un costo bajo, usando la impresión 3D, fácil de construir y de controlar para simular el trabajo que este realiza en grandes empresas, simulando procesos industriales de forma educativa.

Para cumplir esta idea se propone los siguientes objetivos:

Objetivo general:

- Diseñar y construir el prototipo de un brazo robótico industrial a escala.

Objetivos específicos:

- Identificar y establecer la relación entre las diferentes variables que hay que tomar en consideración para diseñar y construir un brazo robótico.
- Desarrollar el cálculo matemático para el diseño y desarrollo del prototipo de brazo robótico.
- Realizar el diseño de la estructura del prototipo del brazo robótico industrial a escala.
- Construir el prototipo del brazo robótico de acuerdo al diseño previo.
- Validar el diseño propuesto del prototipo del brazo robótico.

En cuanto a la estructura del documento de trabajo de grado; en la primera parte se aborda una revisión bibliográfica en la cual se investiga sobre temas como la robótica, morfología de los brazos robóticos, cinemática y dinámica de un brazo robótico, resistencia y análisis de materiales.

En la segunda parte se describe el desarrollo del trabajo de investigación, el mismo que trata la descripción de materiales y la metodología para el desarrollo del cálculo matemático, diseño y construcción del prototipo y validación del mismo.

En la tercera parte se describe los resultados, discusión, conclusiones, recomendaciones que permiten asimilar y evaluar el desarrollo del proyecto de acuerdo a los objetivos planteados.

Finalmente, se encuentra también la sección de *Anexos* que incluye el conjunto de planos del diseño del prototipo, así como catálogos e información, importante para el desarrollo del mismo.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Robótica

4.1.1 Introducción

La robótica es la ciencia que estudia el diseño y la implementación de robots, conjugando múltiples disciplinas, como la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y la ingeniería de control, entre otras. Para definirlo en términos generales, un robot es una máquina automática o autónoma que posee cierto grado de inteligencia, capaz de percibir su entorno y de imitar determinados comportamientos del ser humano. Los robots se utilizan para desempeñar labores riesgosas o que requieren de una fuerza, velocidad o precisión que está fuera de nuestro alcance. También existen robots cuya finalidad es social o lúdica.

Los robots se usan en diversos ámbitos y para cumplir tareas variadas: desde los brazos robóticos utilizados en la industria automotriz hasta el novedoso sistema quirúrgico Da Vinci, que permite practicar cirugías de alta complejidad poco invasivas y con una precisión sin precedentes; desde los robots espaciales diseñados para explorar la superficie de planetas desconocidos hasta la aspiradora doméstica Roomba, que realiza la limpieza de manera autónoma, o el Nano colibrí, un pájaro utilizado para espionaje militar. Pero quizá los más llamativos sean los androides, que imitan la morfología, el comportamiento y el movimiento de los seres humanos. Uno de los más conocidos en la actualidad es ASIMO¹, pensado para llevar a cabo labores asistenciales y sociales. Aunque se encuentra en una etapa experimental, ASIMO es capaz de caminar o subir escaleras por sí solo.

Desde siempre, las personas han querido desarrollar seres animados con diferentes fines. Este deseo de dar vida, conjugado con el progreso mecánico, científico, tecnológico y electrónico a lo largo de la historia, dio lugar a la creación de los autómatas, máquinas que imitan la figura y los movimientos de un ser animado, antecedente directo de los robots. (Costas, 2012, pp. 5-7)

¹ Acrónimo de "Advanced Step in Innovative Mobility" es un robot humanoide (androide) presentado por la compañía japonesa Honda en el año 2000.

4.1.2 Automatización Industrial

En el libro *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* [Automatización, sistemas de producción y fabricación integrada por computadora] del autor Groover (2014) se indica que:

Los sistemas de fabricación automatizados operan en la fábrica con el producto físico. Realizan operaciones como procesamiento, ensamblaje, inspección o manejo de materiales, en algunos casos logran más de una de estas operaciones en el mismo sistema. Se les llama automatizados porque realizan sus operaciones con un nivel reducido de participación humana en comparación con el proceso manual correspondiente. En algunos sistemas altamente automatizados, prácticamente no hay participación humana. Los ejemplos de sistemas de fabricación automatizados incluyen:

- Máquinas herramientas automatizadas que procesan piezas
- Líneas de transferencia que realizan una serie de operaciones de mecanizado.
- Sistemas automatizados de montaje.
- Sistemas de fabricación que utilizan robots industriales para realizar operaciones de procesamiento o de manera segura.
- Sistemas automáticos de manipulación y almacenamiento de materiales para integrar las operaciones de fabricación.
- Sistemas de inspección automática para control de calidad.

Los sistemas de fabricación automatizados se pueden clasificar en tres tipos básicos.

4.1.2.1 Automatización Fija. La automatización fija es un sistema en el que la secuencia de operaciones de procesamiento (o ensamblaje) está fijada por la configuración del equipo. Cada una de las operaciones en la secuencia es usualmente simple, involucrando tal vez un simple movimiento lineal o rotacional o una combinación sin complicaciones de los dos; por ejemplo, alimentación de un husillo giratorio. Es la integración y coordinación de muchas operaciones de este tipo en un solo equipo lo que hace que el sistema sea complejo. Las características típicas de la automatización fija son:

- Alta inversión inicial para equipos de ingeniería personalizados
- Altas tasas de producción
- Relativamente inflexible en acomodar variedad de productos

La justificación económica para la automatización fija se encuentra en productos que se producen en grandes cantidades y a altas tasas de producción. El alto costo inicial del equipo puede extenderse a un gran número de unidades, lo que hace que el costo unitario sea atractivo en comparación con los métodos de producción alternativos. Los ejemplos de automatización fija incluyen líneas de transferencia de mecanizado y máquinas de ensamblaje automatizadas.

4.1.2.2 Automatización Programable. En la automatización programable, el equipo de producción está diseñado con la capacidad de cambiar la secuencia de operaciones para acomodar diferentes configuraciones de productos. La secuencia de operación es controlada por un programa, que es un conjunto de instrucciones codificadas para que el sistema pueda leerlas e interpretarlas. Se pueden preparar nuevos programas e ingresarlos al equipo para producir nuevos productos. Algunas de las características que caracterizan la automatización programable incluyen:

- Alta inversión en equipos de uso general.
- Menores tasas de producción que la automatización fija.
- Flexibilidad para hacer frente a variaciones y cambios en la configuración del producto.
- Más adecuado para la producción por lotes.

Los sistemas de producción automatizados programables se utilizan en la producción de bajo y mediano volumen. Las partes o productos se hacen típicamente en lotes. Para producir cada nuevo lote de un producto diferente, el sistema debe reprogramarse con las instrucciones de la máquina correspondientes al nuevo producto. Asimismo, cambiar la configuración física de la máquina. Se debe cargar las herramientas, conectar los accesorios a la mesa de la máquina e ingresar los ajustes necesarios de la máquina. Este procedimiento de cambio lleva tiempo. En consecuencia, el ciclo típico para un producto dado incluye un período

durante el cual tiene lugar la configuración y la reprogramación, seguido por un período en el que se produce el lote.

Los ejemplos de automatización programable incluyen máquinas herramientas controladas numéricamente (NC), robots industriales y controladores lógicos programables.

4.1.2.3 Automatización Flexible. La automatización flexible es una extensión de la automatización programable. Un sistema automatizado flexible es capaz de producir una variedad de piezas (o productos) prácticamente sin pérdida de tiempo para cambios de un estilo de pieza a otro. No se pierde tiempo de producción al reprogramar el sistema y alterar la configuración física (herramientas, accesorios, configuraciones de la máquina). En consecuencia, el sistema puede producir varias combinaciones y programas de piezas o productos en lugar de requerir que se hagan en lotes. Lo que hace posible la automatización flexible es que las diferencias entre las partes procesadas por el sistema no son significativas. Es un caso de variedad suave, por lo que la cantidad de cambio requerido entre estilos es mínima. Las características de la automatización flexible se pueden resumir de la siguiente manera:

- Alta inversión para un sistema de ingeniería personalizado.
- Producción continua de mezclas variables de productos.
- Tasas de producción medias.
- Flexibilidad para hacer frente a las variaciones de diseño del producto.

Ejemplos de automatización flexible son los sistemas de fabricación flexibles para realizar operaciones de mecanizado que se remontan a finales de la década de 1960. (pp.10-11)

4.1.3 Definición de Robot Industrial

En el libro Fundamentos de la Robótica de los autores Barrientos, Peñin, Balaguer. y Aracil (2005) no se da un concepto único de lo que es un robot industrial. La primera dificultad se da debido a la diferencia conceptual entre el mercado japonés y el euro-americano de lo que es un robot y lo que es un manipulador. Para el mercado japonés un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles

destinado a la manipulación. En cambio, para el mercado euro-occidental la definición es más limitada y compleja, sobre todo si se centra en el control.

La segunda dificultad, centralizando el concepto occidental, nace de la duda a la hora de instaurar una definición formal de un robot industrial. Otro conflicto es que la evolución de la robótica con el tiempo obliga a actualizar la definición de lo que es un robot industrial.

La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la *Asociación de Industrias Robóticas (RIA)*, 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.

La *Organización Internacional de Estándares (ISO)* define al robot industrial como:

- 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.

Frecuentemente, a los conceptos anteriores también se acepta al robot industrial como un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo. Un sistema robotizado, sin embargo, tiene una definición más vasta. Abarca todos aquellos dispositivos que ejecutan tareas de forma automática sustituyendo así el trabajo de una persona y que pueden incorporar o no a uno o varios robots.

4.1.4 Clasificación del Robot Industrial

No existe una clasificación que englobe cada aspecto de los robots, es por esto que existen diversas maneras de clasificar a estos.

La Asociación Francesa de Robótica Industrial (AFRI) clasifica los robots según su tipo, tal cual y se muestra en la tabla 1.

Tabla 1*Clasificación de los robots según la AFRI.*

TIPO	CLASIFICACIÓN
Tipo A	Manipulador con control manual o telemando.
Tipo B	Manipulador automático con ciclos pre ajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
Tipo C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimientos sobre su entorno.
Tipo D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

Nota. Asociación Francesa de Robótica Industrial. Fuente: Barrientos et al. (2005)

La IFR (International Federation of Robotics) distingue entre cuatro tipos de robots: secuencial, de trayectoria controlable, adaptativo y tele manipulado y los clasifica por generaciones (tabla 2).

Tabla 2*Clasificación de los robots industriales por generaciones.*

GENERACIÓN	DEFINICIÓN
1 ^a Generación	<p>Repite la tarea programada secuencialmente.</p> <p>No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.</p> <p>Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia.</p>
2 ^a Generación	<p>Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.</p> <p>Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural.</p>
3 ^a Generación	<p>Posee capacidad para la planificación automática de tareas.</p>

Nota. International Federation of Robotics (IFR) recuperado de www.ifr.org

Según el físico matemático T.M. Knasel, ilustra cinco generaciones de los robots según las características de fecha, nombre, control, movilidad y empleo de cada uno, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Clasificación de los robots según Knase.

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

Nota. Knasel T. (1986). Mobile Robots-state of the art review. Elsevier Journal

4.2 Cinemática y Dinámica de Robots

4.2.1 Cinemática De Los Robots Industriales

4.2.1.1 Cinemática Directa. La cinemática directa viene a ser de utilidad cuando se realiza la planificación de trayectorias y en el control cartesiano. Permite la obtención de la posición y orientación del efector final del manipulador en función de las variables de sus articulaciones. Existen varios métodos para su determinación entre los cuales uno

² Se relaciona con todas las operaciones que tengan que ver con coger un producto o pieza y ubicarlo en otro lugar, ya sea hacia o a través del almacén.

de los más destacados es el Algoritmo de Denavit-Hartenberg, el cual se ha desarrollado en una versión estándar y modificada.

Este método en su versión estándar consiste en la obtención de una tabla de parámetros que describen a cada eslabón; estos parámetros corresponden a posición (a, d) y orientación (θ , α) características a partir de los cuales se obtienen matrices de traslación y rotación, respectivamente. (Pérez, Cuevas, & Zaldivar, 2015)

$${}^{i+1}A_i = T_{z,d} R_{z,\theta} T_{x,a} R_{x,\alpha}$$

$${}^{i+1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i \cos\alpha_i & \text{sen}\theta_i \text{sen}\alpha_i & \alpha_i \cos\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \text{sen}\alpha_i & \alpha_i \text{sen}\theta_i \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = {}^0A_0 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \dots {}^{i+1}A_i$$

Donde:

${}^{i+1}A_i$ Postmatricial de cada eslabón

$T_{z,d}$ Traslación a lo largo de z_{i-1} , una distancia θ_i

$R_{z,\theta}$ Rotación alrededor del eje z_{i-1} , un ángulo θ_i

$T_{x,a}$ Traslación a lo largo de x_{i-1} , una distancia α_i

$R_{x,\alpha}$ Rotación alrededor del eje x_i , un ángulo α_i

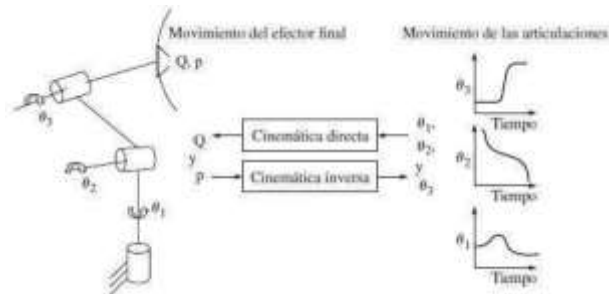
T Matriz de transformación homogénea

Dependiendo del mecanismo a ser analizado se obtendrá las variables de cada junta, mientras los otros parámetros serán constantes conocidas.

4.2.1.2 Cinemática Inversa. Este análisis permite la obtención de las coordenadas de las articulaciones del manipulador para las cuales satisface una posición del efector final, dadas sus coordenadas cartesianas y orientación con respecto al sistema de referencia fijo. Es recomendable haber realizado previamente la cinemática de manera que la matriz del brazo robótico sea conocida.

Se determina en base a varios métodos tales como: el algebraico, geométrico, Jacobiano o el método de la Matriz Inversa. Para este análisis se encuentra que existirán varias soluciones para un mismo problema debido a que es posible alcanzar una misma posición en el espacio a partir de diferentes configuraciones, especialmente en el caso de manipuladores de 5 y 6 grados de libertad; incluso es posible que no exista una solución admisible debido a las limitaciones mecánicas propias del sistema robótico. (Saha, 2010)

Figura 1



Cinemática directa e inversa de un brazo robótico.

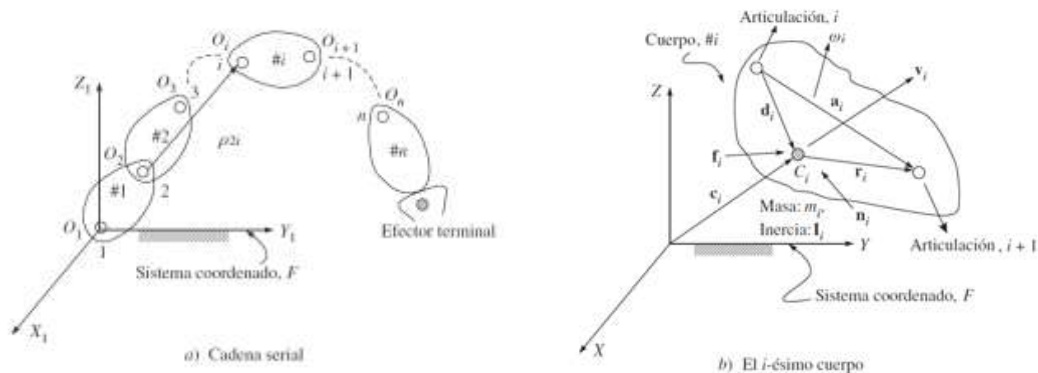
Nota. (Saha, 2010)

4.2.2 Dinámica de los robots industriales

4.2.2.1 Dinámica inversa. Para el control de un manipulador robótico, particularmente de aquellos basados en la dinámica de robots, los pares de torsión y fuerzas de los actuadores se calculan mediante la dinámica inversa. Para tal fin, puede usarse la formulación Euler-Lagrange o el algoritmo recursivo de Newton-Euler (RNE). Para sistemas robóticos complejos como manipuladores industriales de $DOF = 6$, se prefiere, por lo general, el algoritmo recursivo de Newton-Euler el cual consiste en un cálculo progresivo de las velocidades y aceleraciones de cada eslabón, seguido por el cálculo regresivo de los momentos y fuerzas en cada articulación. En la figura 2 se observa los momentos y fuerzas que actúan sobre un eslabón normal i de un manipulador serial.

Figura 2

Momentos y fuerzas que actúan sobre un eslabón normal i de un manipulador serial.



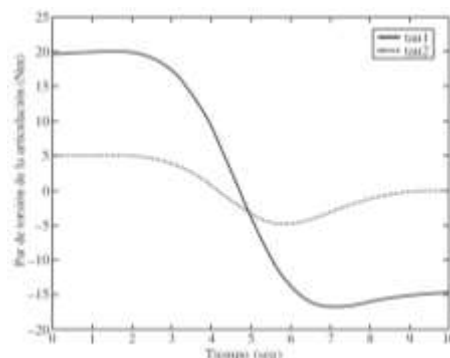
Nota. (Saha, 2010)

En primer lugar, se evalúan la velocidad y aceleración angulares, así como la velocidad y aceleración lineal de cada eslabón en términos del eslabón que le antecedió. Estas velocidades pueden calcularse entonces de manera recursiva, empezando con el primer eslabón móvil y terminando con el eslabón del efector final. Una vez que se hayan encontrado las velocidades y aceleraciones de los eslabones, pueden computarse los pares de torsión y fuerzas de articulaciones, eslabón por eslabón, empezando con el del efector final y terminando con el de la base.

4.2.2.2 Dinámica Directa. La simulación de un robot es útil para entender su comportamiento, aun cuando no exista en realidad. Esto involucra lo que se conoce como dinámica progresiva o directa. La dinámica directa se define como la que, dados los parámetros cinemáticos e inerciales y los pares de torsión y fuerzas de las articulaciones en función del tiempo, se puede entonces encontrar la trayectoria del manipulador robótico. En otras palabras, conociendo el vector torsión se conocerá el vector θ , el cual indica el ángulo en el que se encuentra el eslabón de un brazo robótico. En la figura 3 se puede ver la simulación del movimiento de un brazo robótico donde se conoce el par torsor con respecto al tiempo de un robot de dos grados de libertad y en la figura 4 se observa los resultados de la simulación utilizando únicamente la fuerza de la gravedad.

Figura 3

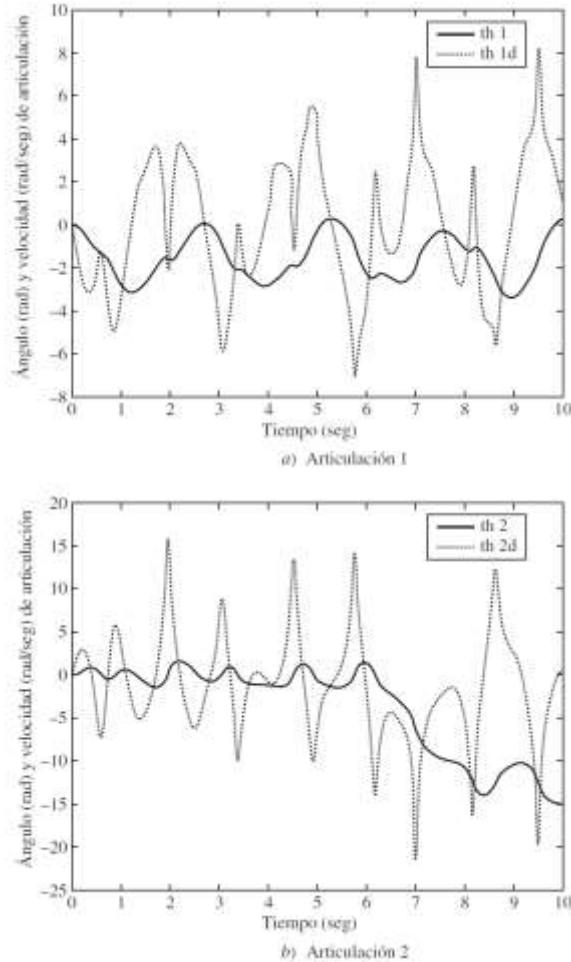
Pares de torsión de articulación del manipulador de un manipulador de dos eslabones.



Nota. (Saha, 2010)

Figura 4

Resultados de simulación para un manipulador de dos eslabones, únicamente bajo gravedad.



Nota. (Saha, 2010)

4.3 Morfología de los Robots

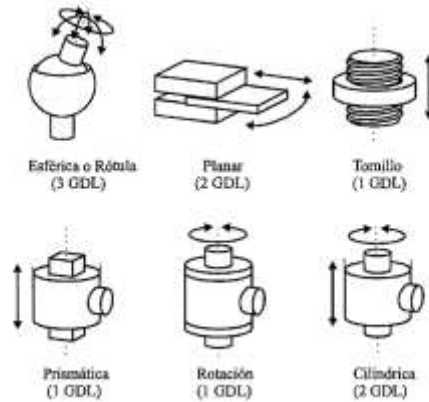
4.3.1 Estructura Mecánica de un Robot

Barrientos et al. (2005) afirma que mecánicamente un robot se puede mover gracias a que está compuesto mediante eslabones unidos por diferentes articulaciones. La forma física de un brazo robótico industrial tiene gran parecido a un brazo humano, es por esto que se usan palabras como cuerpo, brazo, codo o muñeca para hacer referencia a las partes de un brazo robótico.

Los movimientos independientes de las articulaciones de un brazo robótico se denominan Grados de Libertad (GDL). En la figura 5 se puede ver los diferentes números de GDL de cada una de las posibles articulaciones de un brazo robótico.

Figura 5

Distintos tipos de articulaciones para robots.



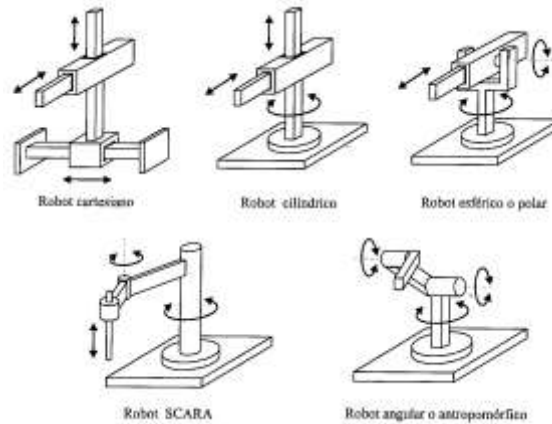
Nota. Barrientos A., Peñin L., Balaguer C. y Aracil R. (2007). Fundamentos de robótica.

El número de GDL de un robot viene dado por tantos GDL que sus articulaciones que lo componen tengan. Puesto que las articulaciones empleadas en la industria son solamente las de rotación y las prismáticas y estas están compuestas por solo un grado de libertad, se dice que el número de grados de libertad de un robot suele coincidir con el número de articulaciones que lo componen.

Al usar diferentes combinaciones de articulaciones se obtiene diferentes configuraciones, con diferentes características a tener en cuenta en el diseño y control de un brazo robótico industrial. En la figura 6 se representan las combinaciones más frecuentes, donde el autor se centra únicamente en las tres primeras articulaciones del robot, puesto que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto del espacio.

Figura 6

Configuraciones más frecuentes en robots industriales.



Nota. Barrientos A., Peñin L., Balaguer C. y Aracil R. (2007). Fundamentos de robótica.

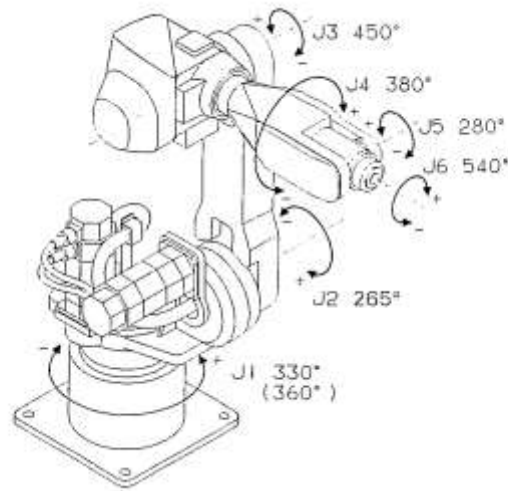
Son necesarios al menos seis grados de libertad para posicionar y orientar un objeto en el espacio, tres para definir su posición y tres para definir su orientación. En la práctica, hay muchos robots industriales que cuentan con menos grados de libertad puesto que estos son suficientes para llevar a cabo las tareas para las que fueron diseñados. Hay casos en los que, al contrario, se necesitan más de seis grados de libertad para que el robot tenga acceso a todos los puntos de su entorno. Así, si se trabaja en un entorno con obstáculos, el dotar al robot de grados de libertad adicionales le permitirá acceder a posiciones y orientaciones de su extremo a las que, como consecuencia de los obstáculos, no hubiera accedido con seis grados de libertad.

En la Figura 7 se muestran los seis GDL con que está dotado el robot ARC Mate 120/S-12 de Fanuc³, así como sus articulaciones y eslabones.

³ Compañía que ofrece productos y servicios de automatización industrial como robots y sistemas de control numérico.

Figura 7

Grados de libertad del robot ARC Mate 120/8-12.



Nota. Barrientos A., Peñin L., Balaguer C. y Aracil R. (2007). Fundamentos de robótica

4.3.2 Transmisores y Reductores

Las transmisiones son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Se incluirán junto con las transmisiones a los reductores, encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

4.3.2.1 Transmisores. En el libro Fundamentos de la Robótica de Barrientos et al. (2005) se indica que:

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia. Del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas al actuador. Por estos motivos, se procura que los actuadores, por lo general pesados, estén lo más cerca posible de la base del robot. Esta circunstancia obliga a utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento hasta las articulaciones, especialmente a las situadas en el extremo del robot. Asimismo, las transmisiones pueden ser utilizadas para convertir movimiento circular en lineal o viceversa, lo que en ocasiones puede ser necesario.

Es de esperar que un buen sistema de transmisión cumpla una serie de características básicas: debe tener un tamaño y peso reducido, se ha de evitar que

presente juegos u holguras considerables y se deben buscar transmisiones con gran rendimiento.

Es muy importante que el sistema de transmisión a utilizar no afecte al movimiento que transmite, ya sea por el rozamiento inherente a su funcionamiento o por las holguras que su desgaste pueda introducir. También hay que tener en cuenta que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado, y a ser posible entre grandes distancias.

Las transmisiones más habituales son aquellas que cuentan con movimiento circular tanto a la entrada como a la salida. Incluidas en estas se hallan los engranajes, las correas dentadas y las cadenas. (pp. 20-21)

4.3.2.2 Reductores. En cuanto a los reductores, al contrario que con las transmisiones, sí existen determinados sistemas usados de manera preferente en los robots industriales. Esto se debe a que a los reductores utilizados en robótica se les exige unas condiciones de funcionamiento muy restrictivas. La exigencia de estas características viene motivada por las altas prestaciones que se le piden al robot en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento. En el libro Fundamentos de la Robótica de Barrientos et al. (2005) se menciona que:

Se buscan reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso. Se tiende también a minimizar su momento de inercia, de negativa influencia en el funcionamiento del motor, especialmente crítico en el caso de motores de baja inercia. Los reductores, por motivos de diseño, tienen una velocidad máxima de entrada admisible, que como regla general aumenta a medida que disminuye el tamaño del motor.

Puesto que los robots trabajan en ciclos cortos que implican continuos arranques y paradas, es de gran importancia que el reductor sea capaz de soportar pares elevados puntuales. También se busca que el juego angular o *backlash*⁴ sea lo menor posible. Este se define como el ángulo que gira el eje de salida cuando se cambia su sentido de giro sin que llegue a girar el eje de entrada. Por último, es importante que los reductores para robótica posean una alta rigidez torsional,

⁴ Juego entre dientes de engranajes.

definida como el par que hay que aplicar sobre el eje de salida para que, manteniendo bloqueado el de entrada, aquel gire un ángulo unitario. (pp. 21-22)

4.3.3 Actuadores

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control. Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía neumática, hidráulica o eléctrica. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente. Las características a considerar son entre otras:

- Potencia.
- Controlabilidad.
- Peso y volumen.
- Precisión.
- Velocidad.
- Mantenimiento.
- Coste.

Como resumen de los tipos de actuadores empleados en robótica, en la Tabla 4 se presenta un cuadro comparativo de estos.

Tabla 4

Tipos de actuadores empleados en robótica

	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
ENERGÍA	- Aire a presión (5-10 bar)	- Aceite mineral (50-100 bar)	- Corriente eléctrica
OPCIONES	- Cilindros - Motor de paletas - Motor de pistón	- Cilindros - Motor de paletas - Motor de pistones axiales	- Corriente continua (DC) - Corriente alterna (AC) - Motor paso a paso
VENTAJAS	- Baratos	- Rápidos	- Precisos

	- Rápidos	- Alta relación	- Fiables
	- Sencillos	potencia-peso	- Fácil control
	- Robustos	- Auto lubricantes	- Sencilla
		- - Alta capacidad	instalación
		de carga	- Silenciosos
		- Estabilidad	
		frente a cargas	
		estáticas	
	- Dificultad	- Difícil	
	de control	mantenimiento	
	continuo	- Instalación	
DESVENTAJAS	- Instalación	especial (filtros,	- Potencia
	especial	eliminación de	limitada
	(compresor,	aire)	
	filtros)	- Frecuentes fugas	
	- Ruidoso	- Caros	

Nota. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2005)

4.4 Aplicaciones de los Robots

4.4.1 Aplicaciones Industriales de los Robots

Barrientos et al. (2005) dice que en los últimos tiempos los robots se han ido utilizando de manera extendida en la industria, llegándose a convertir en un factor muy importante en los distintos procesos de manufactura. Los robots han pasado de ser máquinas que muy pocos conocían y entendían a un elemento más en muchos talleres y líneas de producción.

Al ser un sistema multifuncional puede ser utilizado para un sinnúmero de funciones. Sin embargo, la experiencia obtenida a lo largo del tiempo ha demostrado que son más eficientes en distintos procesos, como procesos de soldadura o el proceso pick & place, el cuál es el más utilizado en la industria, en los que se ha demostrado que es una solución muy eficaz y productiva.

Establecer un robot industrial en los distintos procesos de aplicación demanda un minucioso estudio determinando las ventajas e inconvenientes que conlleva la introducción del robot. En ciertas ocasiones, para introducir un robot será necesario hacer

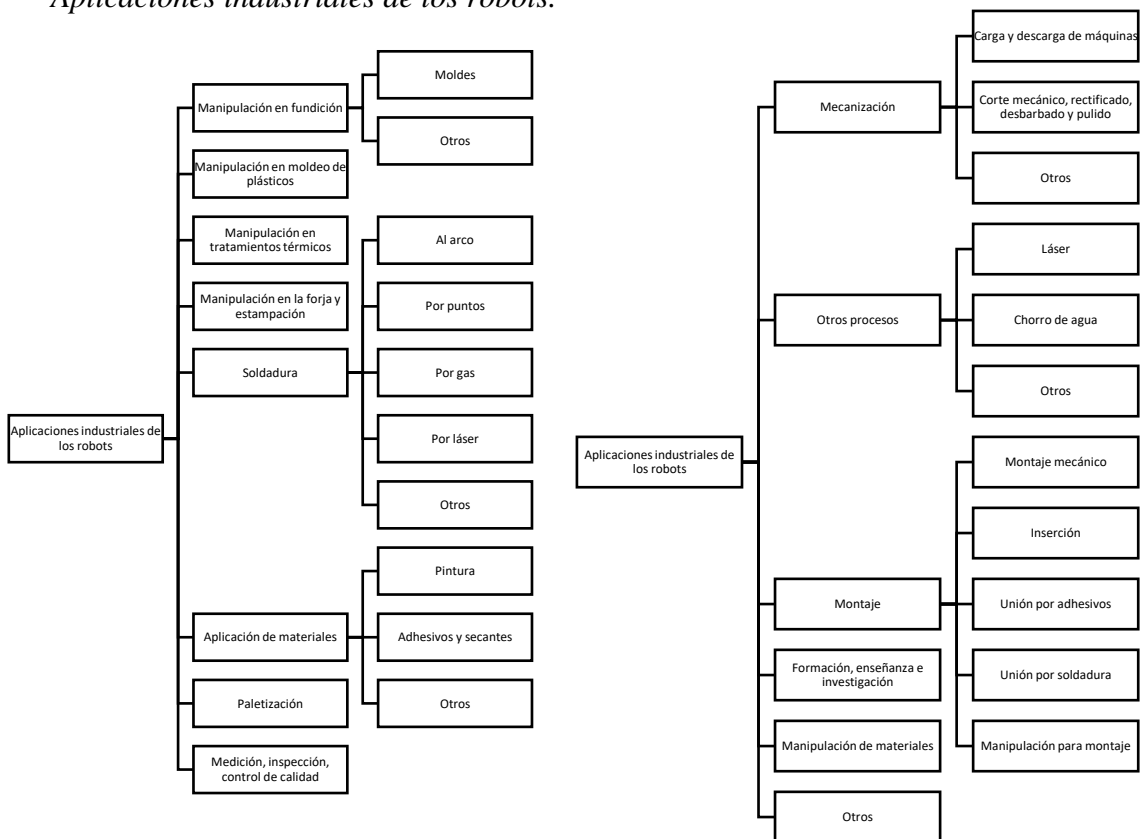
ciertos cambios en el diseño de la célula robotizada, como modificaciones en el diseño de piezas, sustitución de sistemas, etc. Para seleccionar el tipo de robot a utilizar será necesario contemplar diversos aspectos como el área de acción, velocidad de carga, capacidad de control, coste, etc.

Muchas aplicaciones al día de hoy cuentan con la suficiente experiencia en su robotización como para poder fijar unas líneas generales en cuanto a las posibilidades reales del robot en ellas, así como en cuanto a las dificultades, cambios y ventajas a las que la introducción del robot puede dar lugar. La fundición inyectada fue el primer proceso robotizado (1960) introducido por la compañía General Motors en Trenton, este proceso cuenta ya con la experiencia necesaria como para que se hayan valorado con detalle las ventajas inconvenientes del robot.

Son muchas las aplicaciones en la actualidad en las que los usos de robots industriales han ganado importancia, en la figura 8 se presenta un esquema resumen en el cual se puede ver las distintas aplicaciones industriales de los robots.

Figura 8

Aplicaciones industriales de los robots.



Nota: Elaboración propia (2021).

4.4.2 Nuevos Sectores de Aplicación de los Robots

En el libro de Barrientos et al. (2005) explica que aparte de las aplicaciones industriales ya estudiadas, hay otras en las que, si bien la utilización del robot aun no es habitual, si es necesaria su utilización por las condiciones intrínsecas del medio de trabajo (ambientes contaminados, salas asépticas, construcción, etc.) o la elevada exigencia en cuanto a calidad de los resultados (medicina). Son los llamados comúnmente robots de servicio.

Las aplicaciones de la robótica examinadas anteriormente responden a los sectores que, como el del automóvil o de la manufactura, han sido desde hace 30 años usuarios habituales de los robots industriales. Este uso extensivo de los robots en los citados sectores se ha visto propiciado por la buena adaptación del robot industrial a las tareas repetitivas en entornos estructurados. De este modo, la competitividad del robot frente a otras soluciones de automatización se justifica por su rápida adaptación a series cortas, sus buenas características de precisión y rapidez, y por su posible reutilización con costes inferiores a los de otros sistemas.

Sin embargo, existen otros sectores donde no es preciso conseguir elevada productividad, en los que las tareas a realizar no son repetitivas, y no existe un conocimiento detallado del entorno.

Entre estos sectores podría citarse la industria nuclear, la construcción, la medicina o el uso doméstico. En ninguno de ellos existe la posibilidad de sistematizar y clasificar las posibles aplicaciones, pues estas responden a soluciones aisladas a problemas concretos.

Este tipo de robots ha venido a llamarse robots de servicio y pueden ser definidos como:

- Un dispositivo electromecánico, móvil o estacionario, con uno o más brazos mecánicos, capaces de acciones independientes.

Estos robots están siendo aplicados en sectores como:

- Agricultura y silvicultura.
- Ayuda a discapacitados.
- Construcción.
- Domésticos.
- Entornos peligrosos.

- Espacio.
- Medicina y salud.
- Minería.
- Submarino.
- Vigilancia y seguridad.

En general, la aplicación de la robótica a estos sectores se caracteriza por la falta de estructuración, tanto del entorno como de la tarea a realizar, y la menor importancia de criterios de rentabilidad económica frente a la de realizar tareas en entornos peligrosos o en los que no es posible el acceso de las personas.

Estas características obligan a que los robots de servicio cuenten con un mayor grado de inteligencia, que se traduce en el empleo de sensores y del *software* adecuado para la toma rápida de decisiones. Puesto que en muchas ocasiones el estado actual de la inteligencia artificial (disciplina que aborda esta problemática) no está lo suficientemente desarrollado como para resolver las situaciones planteadas a los robots de servicio, es frecuente que éstos cuenten con un mando remoto, siendo en muchas ocasiones robots tele operados. (Barrientos et al., 2005, pp. 311-312)

4.5 Criterios de Implementación de un Robot Industrial

4.5.1 Diseño y Control de una Célula Robotizada

En el libro de Barrientos et al. (2005) se observa que el proyecto y ejecución de un sistema robotizado involucra un gran número de factores, como el rediseño del producto hasta la definición detallada del *lay-out* o plano de implementación del sistema como se puede observar en la figura 9.

Habrá que seleccionar el robot más adecuado para cumplir con lo estimado en el proyecto, así como delimitar los elementos periféricos pasivos (mesas, alimentadores, utillajes, etc.) o activos (manipuladores secuenciales, máquinas CN, etc.) que actúan en la célula robotizada y colocarlos en el espacio de trabajo.

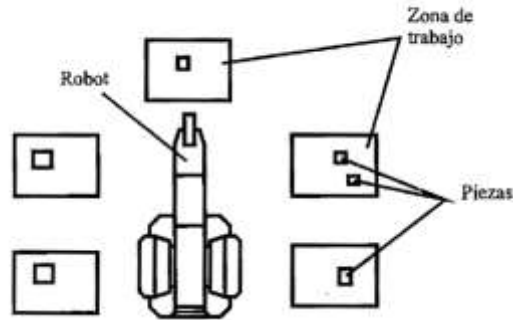
También habrá que definir y seleccionar la arquitectura de control, tanto del hardware como del software, que debe ser incluido en cualquier sistema flexible.

Para obtener un buen *lay-out* se debe contar con experiencia de un buen equipo técnico de diseño, así como la utilización de herramientas informáticas, como sistemas

En la figura 10 se puede observar un ejemplo de un robot operando en el centro de la célula robotizada.

Figura 10

Disposición del robot en el centro de la célula.



Nota. Fuente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2005)

- Robot en línea

En sistemas en los que las piezas llegan en un sistema de transporte la disposición de robots en línea es la más precisa.

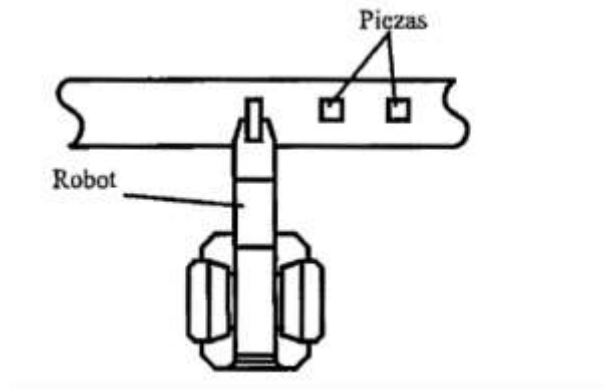
Como ejemplo se tiene las líneas de soldadura de carrocerías de vehículos, varios robots realizan una serie de puntos de soldadura mientras los vehículos pasan secuencialmente ante ellos. En este tipo de disposición cabe diferenciar que el transporte sea de tipo intermitente o continuo. En el transporte tipo intermitente, las piezas paran delante del robot durante un tiempo determinado donde este realiza las operaciones establecidas. Una vez acabadas estas, bien se espera a que todos los robots finalicen sus tareas, para que entonces el sistema de transporte avance un puesto, o bien, si el sistema lo permite, da salida a la pieza que proceda, quedando disponible para recibir una nueva.

En el transporte tipo continuo, las piezas no se detienen y los robots deben operar sobre la pieza mientras esta se mueve.

En la figura 11 se puede observar un ejemplo de un robot operando en línea con la célula robotizada.

Figura 11

Disposición del robot en línea.



Nota: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2005)

- Robot móvil

A veces es útil disponer de este sistema y que el robot se disponga sobre una vía que permita su desplazamiento lineal de manera controlada, ya que hay ocasiones en las cuales se necesitará que la posición relativa entre pieza y robot durante el tiempo que dura el proceso se mantenga fija. Para que esto se cumpla es necesario crear una sincronización perfecta entre movimiento pieza-robot, lo cual se puede conseguir con un acoplamiento mecánico desembragable o mediante un adecuado control en cadena cerrada de ambos transportes. En esta disposición, una vez acabado el proceso el robot deberá volver a su posición de inicio para operar con una pieza nueva.

En la figura 12 se puede observar un ejemplo de un robot móvil de la marca KUKA⁶.

⁶ KUKA Roboter GmbH es uno de los principales fabricantes mundiales de robots industriales y sistemas de soluciones automatizadas de fabricación.

Figura 12

Disposición de robot móvil sobre raíl.



Nota. Fuente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2005)

- **Robot suspendido**

La disposición del robot suspendido es la intrínseca de un robot tipo pórtico, como se muestra en la figura 13, en la que este se dispone sobre el área en el que va a operar.

Las principales ventajas de este sistema son que aprovecha mejor el área de trabajo ya que de esta forma llega a todos los puntos ubicados sobre su propio eje vertical. Aplicaciones típicas de esta disposición son en la utilización de adhesivos o sellantes, proyección de material (pintura, acabado superficial, etc.), corte (chorro de agua, láser, etc.) y soldadura al arco. Algunos fabricantes incluso han desarrollado modificaciones sobre sus robots básicos, tanto en su estructura mecánica como en su control, para facilitar el uso del robot en esta disposición.

Figura 13

Robot suspendido Güdel Trackmotion-Overhead.



Nota. Fuente: <https://19ne.short.gy/Nzoqf9>

4.5.1.2 Características del Sistema de Control de la Célula de Trabajo. Barrientos et al. (2005) afirma que:

Una vez establecidos los elementos operativos de la célula y su disposición en la planta, el segundo factor crítico en la definición de la célula robotizada es la especificación del sistema de control.

Una célula robotizada debe responder a las premisas de flexibilidad y automatización que justifican su empleo. Para ello es imprescindible el establecimiento de un buen sistema de control que deberá realizar, entre otras, las siguientes funciones.

- **Control individual** de cada una de las máquinas, transportes y demás dispositivos, incluidos robots, que compongan la célula.
- **Sincronización** del funcionamiento de los diferentes dispositivos entre sí.
- **Detección, tratamiento y recuperación** si es posible de las situaciones anómalas de funcionamiento que puedan presentarse.
- **Optimización del funcionamiento** conjunto de los dispositivos de la célula, distribuyendo si es posible las funciones de manera dinámica, para así evitar paradas por espera o acciones innecesarias.
- **Interfaz con el usuario**, mostrando la información adecuada para que en todo momento se conozca con el detalle necesario el estado del sistema, así como permitiendo que el operador acceda, con las restricciones pertinentes, al funcionamiento del mismo.

- **Interfaz con otras células**, para permitir la sincronización entre ellas, optimizando el funcionamiento de un sistema de fabricación flexible compuesto por varias células.
- **Interfaz con un sistema de control superior** que realiza básicamente funciones de supervisión y actualización de programas cuando se diese un cambio en la producción.

Estas funciones, que pueden ser necesarias en mayor o menor medida en el control de una célula robotizada, se implementarán en un *hardware* que será preciso definir y dimensionar. En aquellas ocasiones en las que la simplicidad de la célula lo permite, el propio controlador del robot podrá simultanear las funciones propias de control de sus ejes con el mando del resto de los dispositivos. Para ello, utilizará sus entradas/salidas digitales/analógicas, o si fuera necesario la posibilidad de incorporar ejes externos servo controlados.

Si, por el contrario, la célula incluye un mayor número de dispositivos, algunos de los cuales incluso disponen de su propio controlador, será preciso disponer de una estructura jerarquizada en la que un elemento central (ordenador, PLC, etc.) mantenga una comunicación con el resto de los controladores.

En cualquier caso, el correcto dimensionamiento del control de la célula es tarea que no debe desestimarse, pues repercutirá tanto en el coste de implantación y desarrollo de la misma como en el de explotación (p.261).

4.5.2 Características a Considerar en la Selección de un Robot

Cuando se desea robotizar un determinado proceso, el equipo de técnicos responsable de esta tarea debe seleccionar el robot más adecuado. Para ello recurrirá a su experiencia y buen criterio, escogiendo, dentro del amplio mercado de robots existente, aquel que mejor responda a las características necesarias y buscando siempre el adecuado compromiso entre precio y prestaciones.

La selección del robot más idóneo debe hacerse valorando una gran variedad de características, siendo éste un proceso de difícil sistematización. Sin embargo, en general puede ser suficiente con considerar un conjunto limitado.

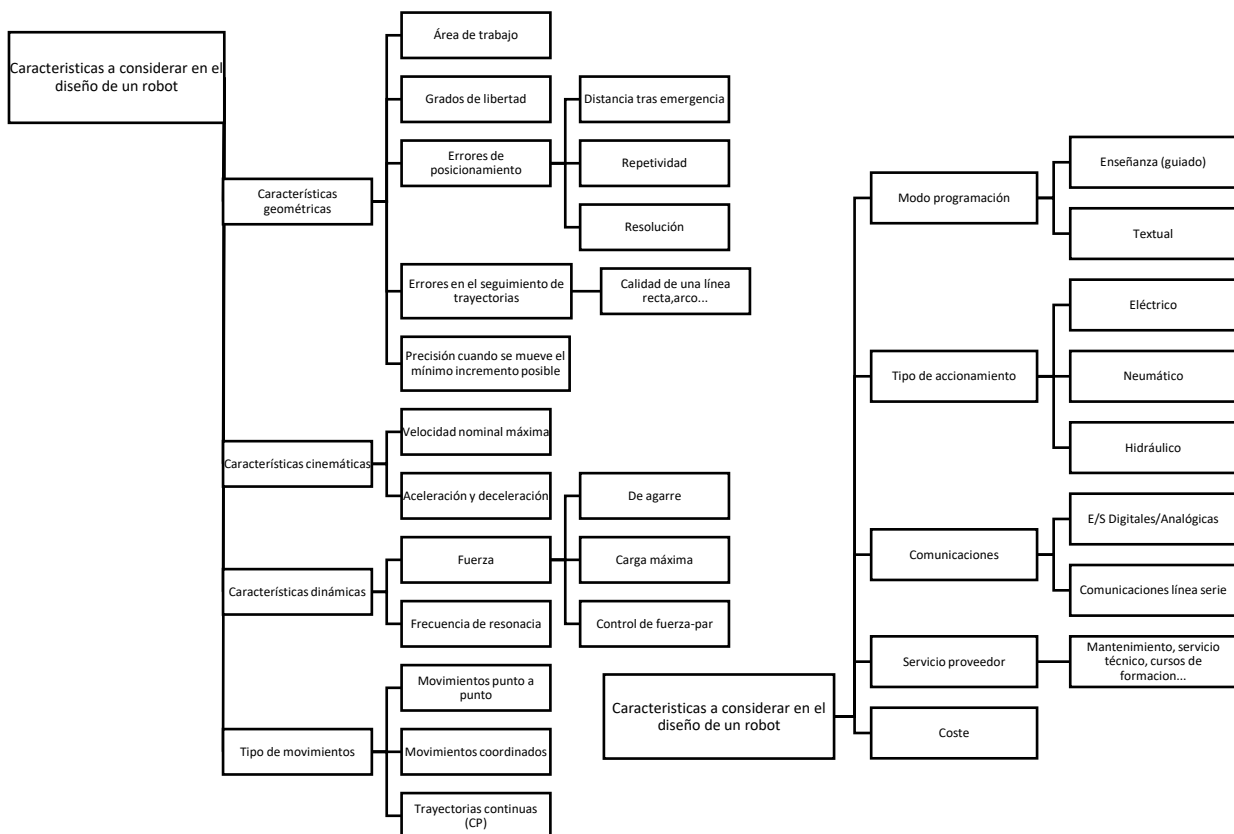
En los catálogos de robots, los fabricantes proporcionan los valores de las prestaciones de sus productos. Estos valores están con frecuencia medidos en condiciones óptimas, diferentes de las reales; no obstante, sirven como medida

comparativa para la selección del robot. Por otra parte, aunque hasta el momento no existe una homologación oficial para los robots industriales que garanticen la veracidad de los datos de catálogo, sí existen laboratorios con acreditado renombre en los que se realizan una serie de test orientados a cuantificar las características de los robots con elevada exactitud. Este es el caso del instituto alemán IPA (Stuttgart). (Barrientos et al., 2005, pp.262-263)

En la figura 14 se pueden ver las características más destacadas que deben ser consideradas a la hora de seleccionar un robot para una determinada aplicación.

Figura 14

Características a la hora de seleccionar un robot.



Nota. Modificada por el autor de (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2005)

4.6 Análisis de los Materiales

4.6.1 Acero

El acero es una aleación de hierro y carbono en un porcentaje de este último elemento variable entre el 0,008 % y el 2 % en masa de su composición. La rama de la metalurgia que se especializa en producir acero se denomina siderurgia o acería.

El acero conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades físico-químicas. Sin embargo, si la aleación posee una concentración de carbono mayor del 1,8 %, se producen fundiciones, que son mucho más frágiles que el acero y no es posible forjarlas, sino que tienen que ser moldeadas.

4.6.1.1 Aceros inoxidables. Los aceros inoxidables se utilizan por su excelente resistencia a la corrosión. Todos los verdaderos aceros inoxidables contienen un mínimo de 12 % de cromo, lo que permite la formación de una delgada capa protectora de Óxido de Cromo cuando el acero se expone al oxígeno. Algunos contienen níquel en proporciones menores. Budynas y Nisbett (2008) explican que:

Las aleaciones con base de hierro que contienen al menos 12 por ciento de cromo se llaman aceros inoxidables. La característica más importante de estos aceros es su resistencia a muchas condiciones corrosivas, pero no a todas. Los cuatro tipos disponibles son los aceros al cromo ferríticos, los aceros al cromo-níquel austeníticos, así como los aceros inoxidables martensíticos y endurecibles por precipitación.

Los aceros al cromo ferríticos presentan un contenido de cromo que varía de 12 a 27 por ciento. Su resistencia a la corrosión es una función del contenido de cromo, de manera que las aleaciones que contienen menos de 12 por ciento aún presentan cierta resistencia a la corrosión, aunque se oxidan. El endurecimiento por templado de estos aceros es una función del contenido de cromo y de carbono. Los aceros con un contenido muy alto de carbono tienen un endurecimiento por templado hasta aproximadamente 18 por ciento de cromo, mientras que en los intervalos de bajo carbono desaparece casi con 13 por ciento de cromo. Si se agrega un poco de níquel, estos aceros retienen un cierto grado de endurecimiento con un contenido de hasta 20 por ciento de cromo. Si el contenido de cromo excede 18 por ciento, es muy difícil soldarlos, y en los niveles muy altos de cromo la dureza se hace tan grande que se debe poner atención especial a las condiciones de servicio. Como el cromo es costoso, el diseñador debe elegir el contenido menor que sea consistente con las condiciones corrosivas.

Los aceros inoxidables al cromo-níquel retienen la estructura austenítica a temperatura ambiente, por lo que no son susceptibles al tratamiento térmico. La

resistencia de estos aceros se mejora mucho mediante el trabajo en frío. No son magnéticos a menos que se trabajen en frío. Sus propiedades de endurecimiento mediante trabajo también causan que sean difíciles de maquinarse. Todos los aceros al cromo-níquel se sueldan y muestran mayores propiedades de resistencia a la corrosión que los aceros al cromo simples. Cuando se agrega más cromo para lograr una mayor resistencia a la corrosión, también debe agregarse más níquel si se desea mantener las propiedades austeníticas. (p. 48-49)

En la tabla 5 se puede observar algunas propiedades mecánicas de los aceros.

Tabla 5

Algunas propiedades de los aceros.

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)					Resistencia a la deformación, exponente m	Resistencia a la fractura K_{Ic}
			Fluencia S_y MPa (kpsi)	Última S_u MPa (kpsi)	A la fractura, σ_b MPa (kpsi)	Coefficiente n MPa (kpsi)			
1018	Aceros	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	520 (75.1)	620 (90.0)	0.25	1.05	
1144	Aceros	Recocido	358 (52.0)	645 (93.2)	898 (130)	992 (144)	0.14	0.49	
1212	Aceros	HF	193 (28.0)	424 (61.3)	729 (106)	758 (110)	0.24	0.85	
1045	Aceros	TyF 600F	1 320 (220)	1 580 (230)	2 380 (345)	1 880 (273)	0.041	0.81	
4142	Aceros	TyF 600F	1 720 (250)	1 930 (280)	2 340 (340)	1 760 (255)	0.048	0.43	
303	Aceros inoxidable	Recocido	341 (50.0)	601 (87.3)	1 520 (221)	1 410 (205)	0.51	1.16	
304	Aceros inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1 600 (233)	1 270 (185)	0.45	1.67	
2011	Aluminio de aluminio	T6	189 (24.5)	328 (47.5)	325 (47.3)	620 (90)	0.28	0.10	
2024	Aluminio de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3)	689 (100)	0.15	0.18	
7075	Aluminio de aluminio	T6	542 (78.0)	593 (85.8)	706 (102)	882 (128)	0.13	0.18	

*Las cifras se basan en un tamaño de muestra de 0.5 pulgadas y se muestran con valores alternos cuando especificaciones de compra. La información por defecto puede variar hasta un 10%.

Nota: (Budynas & Nisbett, 2008)

4.6.2 Plástico

El término plástico proviene de la palabra griega “*Plastikos*” que significa susceptible a ser modelado o moldeado. Budynas y Nisbett (2008) hablan de los termoplastos y de los termofijos definiéndolos como:

El término termoplástico se usa para indicar cualquier plástico que fluye o que se puede moldear cuando se le aplica calor; algunas veces también se aplica a los que se moldean bajo presión y que se pueden volver a moldear de nuevo cuando se calientan.

Un termofijo es un plástico cuyo proceso de polimerización termina en una prensa de moldeo en caliente, donde el plástico se licua bajo presión. Los plásticos termofijos no pueden volverse a moldear (p.54)

En la tabla 6 se observan propiedades de los termoplastos, mientras que en la tabla 7 se señalan algunas propiedades de los termofijos.

Tabla 6

Algunas propiedades de los termoplastos.

Nombre	S_y Kpsi	E Mpsi	Dureza Rockwell	Elongación %	Estabilidad dimensional	Resistencia térmica	Resistencia química	Procesamiento
Grupo ABS	2-8	0.10-0.37	65-110R	3-50	Buena	*	Aceptable	IMG1
Grupo metil. Acrílico	8-10	0.41-0.52	90-94R	40-60	Escelente	Buena	Abz.	M
Grupo Fluoroplástico	5-10	0.20-0.47	92-110M	3-75	Muy Abz.	*	Aceptable	EM5
Grupo Fluoroplástico	0.50-7	—	50-80D	100-300	Abz.	Escelente	Escelente	MPF
Nitrilo	8-14	0.18-0.45	112-120R	10-200	Pobre	Pobre	Buena	CEM
Cloruro de butileno	7-18	0.25-0.92	115R, 106L	5-60	Escelente	Buena	Aceptable	EMA
Poliacrilato	8-16	0.34-0.86	62-91M	10-125	Escelente	Escelente	Aceptable	EM5
Polietileno	8-18	0.28-1.8	65-90M	1-300	Escelente	Pobre	Escelente	CMF
Polipropileno	6-30	—	88-120M	Muy bajo	Escelente	Escelente	Escelente*	CMF
Estireno de polibencilo	14-19	0.11	122R	1.0	Buena	Escelente	Escelente	M
Grupo poliuretano	1.5-12	0.14-0.65	10-90M	0.5-60	—	Pobre	Pobre	EM
Polióxido	10	0.26	120R	50-100	Escelente	Escelente	Escelente*	EMA
Cloruro de polivinilo	1.5-7.5	0.25-0.60	65-85D	40-450	—	Pobre	Pobre	EMA

*Valores superiores al valor de partida.

†En excepción.

C: Tratamiento; L: Inmoldado; B: Buzón; E: Extrusión; M: Moldeado; S: Baja; T: Espuma; F: Método de presión y controlado; T: Molde.

Nota. (Budynas & Nisbett , 2008)

Tabla 7

Algunas propiedades de los termofijos.

Nombre	S_y Kpsi	E Mpsi	Dureza Rockwell	Elongación %	Estabilidad dimensional	Resistencia térmica	Resistencia química	Procesamiento
Alquiduro	3-9	0.05-0.30	99M*	—	Escelente	Buena	Aceptable	M
Alboco	4-10	—	105-120M	—	Escelente	Escelente	Escelente	CM
Grupo epoxi	5-8	0.13-0.24	110-120M	0.00-90	Buena	Escelente*	Escelente*	IF
Epóxido	5-20	0.05-0.30*	80-120M	1-10	Escelente	Escelente	Escelente	CMF
Fenólico	5-9	0.10-0.25	70-95E	—	Escelente	Escelente	Buena	EM
Sílice	5-6	—	80-90M	—	Escelente	Escelente	CMF	—

*En excepción.

C: Tratamiento; L: Inmoldado; B: Buzón; E: Extrusión; M: Moldeado; S: Baja; T: Espuma; F: Método de presión y controlado; T: Molde.

Nota. (Budynas & Nisbett , 2008)

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales

Para la realización del presente proyecto de tesis se utilizaron los siguientes recursos y materiales:

- Recursos humanos:
 - Tutor de proyecto de tesis.
 - Asesor de proyecto
 - Autor de proyecto de tesis.
- Recursos bibliográficos:
 - Libros de diseño de máquinas.
 - Libros de robótica.
 - Libros de resistencia de materiales
- Recursos de oficina:
 - Computadora.
 - Paquete de Microsoft Office 2016®.
 - Software de Modelado 3D.
 - Software de simulación de cuerpos rígidos.
 - Software de computadora para la verificación y validación de cálculos de ingeniería.
 - Calculadora.
 - Papel, lápiz y borrador.
- Materiales para la construcción del prototipo:
 - Motores DC
 - Fibra de carbono impresa
 - Pernos
 - Rodamientos
 - Correas dentadas
 - Ejes
 - Poleas dentadas
 - Destornillador
 - Llaves Allen
 - Arduino Mega

- Mini controlador VNH2SP30 30A Dual

5.2 Métodos

Para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente proyecto, los métodos utilizados en esta investigación se usó técnicas como como: la observación, medición, deducción, análisis y síntesis. Se siguió una secuencia de procedimientos descritos a continuación:

- Se realizó una búsqueda de información sobre temas como:
 - Robótica
 - Cinemática y dinámica de robots
 - Morfología de los robots
 - Aplicaciones de los robots
 - Criterios de implementación de un robot industrial
 - Análisis de materiales de construcción.

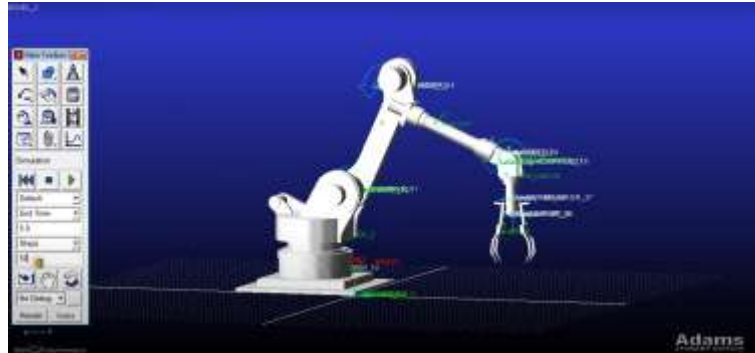
Consultando la información necesaria en las diferentes bibliotecas virtuales que se encuentran disponibles en la Universidad Nacional de Loja para así poder identificar y establecer las diferentes variables que hay que tomar en consideración para diseñar y construir un brazo robótico.

- Se realizó un diseño conceptual del prototipo basado fundamentalmente en brazos robóticos existentes en la industria y proyectos *open source* donde se tuvo en cuenta criterios de diseño tales como sistemas de transmisión, velocidades de movimiento, morfología, dimensión y materiales del prototipo, entre otros, para poder realizar una simulación dinámica y estática del brazo robótico.
- Se utilizó el programa Adams View, programa de simulación dinámica y estática de cuerpos rígidos, donde se exportó el diseño conceptual del prototipo y se encontró los torques necesarios para el movimiento de cada articulación. En la imagen 15 se observa un ejemplo de simulación en el programa descrito.

Figura 15

Ejemplo de simulación de un brazo robótico desarrollada en el programa Adams

View



Nota: Canal Vignesh Kumar. (03 de enero de 2014). MSC Adams Simulation in Robotics

[Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://youtu.be/4YyxrnPfmm4>

- Se desarrolló del cálculo matemático utilizando las diferentes teorías de diseño de elementos de máquinas mediante las cuales se dimensionó engranajes, poleas dentadas, correas de sincronismo, ejes y rodamientos.
- Se realizó el diseño final del prototipo del brazo robótico industrial a escala con la ayuda de Solid Works®, teniendo en cuenta las diferentes variables que hay que tomar en consideración para diseñar un brazo robótico industrial y se lo sometió a cargas estáticas para así comprobar su resistencia.
- Se imprimió cada pieza del prototipo en PLA con fibra de carbono utilizando una impresora 3D *Creality ender 5 Pro* con el fin de abaratar costos de construcción.
- Se construyó el prototipo ensamblando cada una de las articulaciones con sus respectivos motores, ejes, rodamientos y correas. Con esto se logró obtener el brazo robótico industrial a escala para poder validarlo.
- Se validó el prototipo creando un control en Arduino IDE y manipulando los motores con un mini driver Monster VNH2SP30 30A Dual comandado por Arduino para comprobar la velocidad, los ángulos y la carga máxima con la que podrá trabajar el brazo robótico. Las pruebas realizadas se detallan a continuación:
 - Prueba de movimiento del prototipo
 - Prueba de precisión del prototipo
 - Prueba de resistencia del prototipo

6. RESULTADOS

6.1 Propuesta de Diseño Conceptual.

Para el diseño del prototipo de brazo robótico se consultó diversos factores a tener en cuenta a la hora de seleccionar un brazo robótico, basándose en robots industriales existentes. Como se pudo observar en la literatura de Barrientos et al. (2005) se debe considerar un conjunto de características necesarias a la hora de elegir un robot industrial.

6.1.1 Área de trabajo.

El área de trabajo es el volumen espacial a la que puede llegar el extremo de un robot. Esta área está determinada por el tamaño, forma y diseño de las articulaciones que integran al brazo robótico, así como las limitaciones de movimiento impuestas por el control.

Se busca que el brazo robótico logre realizar los distintos trabajos que se desarrollan en la industria, algunos de estos demandan una gran área de trabajo, es por esto que se consideró una extensión del prototipo máxima de 1 metro.

6.1.2 Grados de Libertad.

Existen aplicaciones donde se necesita orientar la herramienta del brazo robótico para que esta pueda acceder a posiciones complicadas, como es el caso de la soldadura, siendo precisos 6 grados de libertad, es por esto que se consideró realizar un diseño de 6 DOF.

Es común que el número de DOF en distintos robots comerciales coincida con el número de articulaciones, es decir, cada articulación genera un grado de libertad. Las articulaciones propuestas en el diseño son: base, hombro, brazo, codo, antebrazo y muñeca.

6.1.3 Velocidad.

La velocidad de movimiento de un brazo robótico oscila entre 1 y 4 m/s con carga máxima, sin embargo, esta velocidad se alcanza con motores especializados y costosos. Es por esto que se seleccionó una velocidad de trabajo baja, en promedio de 10 r.p.m., abaratando costos en la construcción del prototipo.

6.1.4 Capacidad de Carga.

Los valores más frecuentes de capacidades de carga en robots industriales varían de entre los 5 y 50 kg, al tratarse de un prototipo se seleccionó una carga máxima de 0.5 kg, carga suficiente para simular los procesos que se dan en la industria.

6.1.5 Sistemas de transmisión.

Se necesita que un brazo robótico sea preciso en sus movimientos, es por esto que se seleccionó que el prototipo trabaje, en su mayoría de transmisiones, con correas de sincronismo ya que estas son ideales para accionamientos con alta flexibilidad de correa y permite diámetros de piñón mínimos. Las correas dentadas son adecuadas para accionamientos en los que se requiere gran precisión.

6.1.6 Material de construcción.

Se buscó construir un prototipo económico, es por esto que eligió trabajar con filamento PLA reforzado con fibra de carbono, puesto que proporciona una gran resistencia estructural y adhesión de capas. Es un material extremadamente rígido, perfecto para imprimir modelos que no deben doblarse y que deben soportar altas cargas mecánicas.

6.1.7 Diseño Conceptual.

Después de analizar cada una de las variables necesarias a la hora de seleccionar un brazo robótico industrial se realizó un dibujo conceptual del prototipo (figura 16) para después poder diseñarlo en 3D como se observa en la figura 17.

Figura 16

Pre diseño 2d del prototipo.



Nota. Elaboración propia (2021).

Figura 17

Diseño conceptual del prototipo de brazo robótico.



Nota. Elaboración propia (2021).

6.2 Simulación del Prototipo.

Se determinó que la mejor forma para desarrollar los cálculos del prototipo es realizar una simulación en un software especializado, debido a la alta complejidad que se encuentra al calcular los torques necesarios. El grado de dificultad aumenta respecto a los DOF que se tiene en un brazo robótico, además es importante conocer la dinámica inversa que actúa sobre el prototipo. Como se puede observar en la figura 2, se necesita tener en cuenta diferentes variables para poder desarrollar el algoritmo recursivo de Newton-Euler, algoritmo utilizado para calcular los torques que se generan en cada articulación. Para encontrar ciertos parámetros necesarios para el cálculo de las transmisiones del prototipo, y verificar el correcto funcionamiento del mismo se utilizó el programa Adams View, el cual es un software que estudia la dinámica de las piezas móviles y cómo se distribuyen las cargas y fuerzas en los sistemas mecánicos.

Existen algunos programas en los cuales se puede simular el movimiento de un brazo robótico como Matlab⁷ utilizando sus diferentes *toolkits*⁸, Vrob⁹ en el cual también se puede encontrar masas, torques, fuerzas, velocidades; ROS¹⁰ el cual es un sistema

⁷ MATLAB es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

⁸ Es una biblioteca o una colección de bibliotecas que contiene un conjunto de elementos de control gráficos utilizados para construir la interfaz gráfica de usuario de los programas.

⁹ Vrob es un software basado en Linux el cual permite la simulación y control de sistemas robóticos automatizados.

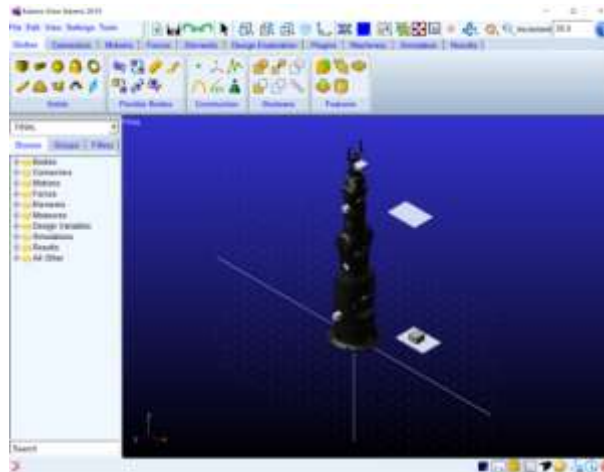
¹⁰ Sistema Operativo Robótico es un framework para el desarrollo de software para robots que provee la funcionalidad de un sistema operativo en un clúster heterogéneo.

operativo dedicado a la robótica el cual también permite crear el control del brazo robótico.

Se exportó el diseño al programa Adams View® (figura 18), con sus relaciones de posición, centro de masa y momentos de inercia entre otros datos necesarios.

Figura 18

Diseño del prototipo exportado al programa de simulación.



Nota. Elaboración propia (2021).

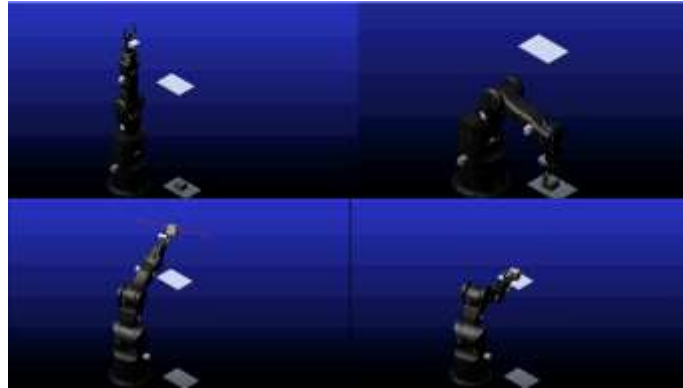
En este programa se realizó varias simulaciones *pick & place*, la cual es la acción que más realizan los robots industriales según el libro Fundamentos de la robótica de los autores Barrientos, et al. (2005) y consiste en recoger un producto y colocarlo en algún otro lugar. Para realizar esta simulación se le dio movimientos por pasos (*STEP*) a cada articulación en los cuales se establece el ángulo de movimiento (d) y el tiempo (time a to b) en el que debe cumplir este movimiento. De todas las simulaciones se escogió la que mayor demanda de torque necesitaba para realizar el movimiento.

- Base: $\text{STEP}(\text{time}, 1.1, 0, 3, 108d) + \text{STEP}(\text{time}, 3.5, 0, 4, -108d)$
- Hombro: $\text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 1, -30d) + \text{STEP}(\text{time}, 1.1, 0, 2, 25.4d) + \text{STEP}(\text{time}, 2, 0, 3, -10d) + \text{STEP}(\text{time}, 3.5, 0, 5, 14.6d)$
- Brazo: $\text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 1, -70d) + \text{STEP}(\text{time}, 1.1, 0, 2, 4.4d) + \text{STEP}(\text{time}, 2, 0, 3, -40d) + \text{STEP}(\text{time}, 3.5, 0, 5, 105.6d)$
- Codo: $\text{STEP}(\text{time}, 1.1, 0, 2, 180d) + \text{STEP}(\text{time}, 3.5, 0, 5, -180d)$
- Antebrazo: $\text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 1, -80d) + \text{STEP}(\text{time}, 1.1, 0, 2, 80d) + \text{STEP}(\text{time}, 2, 0, 3, -30.4d) + \text{STEP}(\text{time}, 3.5, 0, 5, 30.4d)$
- Muñeca: $\text{STEP}(\text{time}, 2, 0, 3, -180d) + \text{STEP}(\text{time}, 3.5, 0, 5, 180d)$

En la figura 19 se puede observar los diferentes movimientos que realizó el prototipo para realizar la acción.

Figura 19

Secuencia de los movimientos del prototipo realizados en la simulación.



Nota. Elaboración propia (2021).

6.2.1 Torque Necesario para Realizar el Movimiento de cada Articulación

Con estas simulaciones (Anexo 5) se encontró el torque necesario para realizar el movimiento de cada articulación. Una vez obtenidas las gráficas torque-tiempo se tabularon los resultados escogiendo para el cálculo matemático el mayor torque, el cual ayudará en la selección de los distintos motores con los que trabajará el prototipo.

También se encontró el valor del punto medio de cada una de las simulaciones para así saber el torque medio con el que trabajarán las articulaciones. Para hallar el punto medio se utilizó la ecuación:

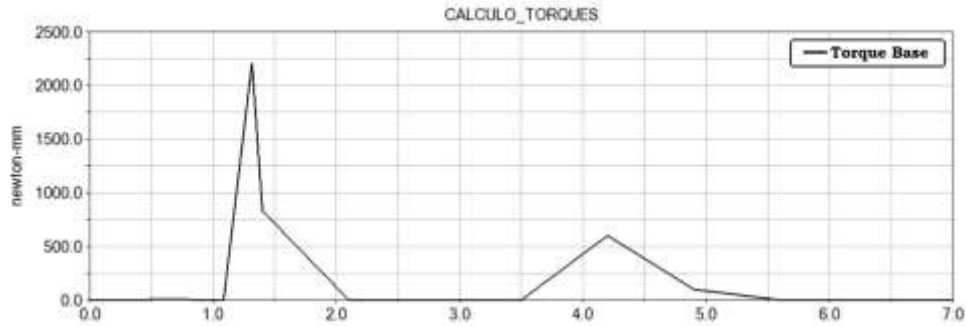
$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n f(\bar{x}_i) = \frac{b-a}{n} [f(\bar{x}_1) + f(\bar{x}_2) + \dots + f(\bar{x}_n)] \quad (1)$$

Una vez obtenidos los resultados de la simulación se tabularon las tablas de cada articulación en el programa Excel, donde se vuelve a graficar las curvas y se hallan las ecuaciones que componen las mismas, para así encontrar el área bajo la curva y poder obtener el valor del punto medio (Anexo 6).

6.2.1.1 Torque de la Base.

Figura 20

Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor de la base del prototipo.



Nota. Gráfica obtenida de Adams View (2021).

Tabla 8

Tabulación de datos de la gráfica 25.

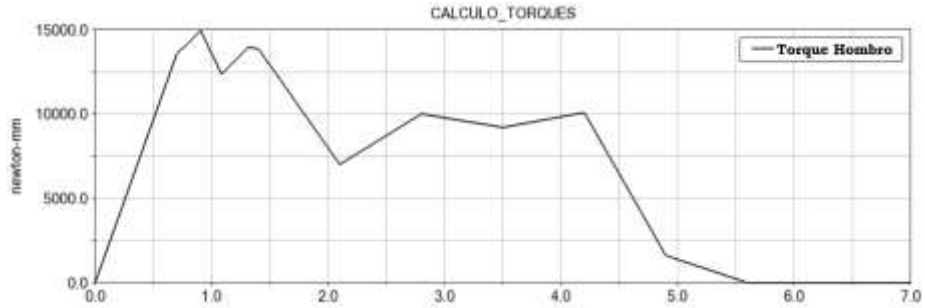
Tiempo (s)	Torque (N*mm)
0.0	0.154
0.7	5.7512
0.9057	2.5912
1.0852	0.00072677
1.3152	2207.6977
1.4	832.5216
2.1	0.4496
2.8	2.9866
3.5	0.0003651
4.2	600.685
4.9	98.9723
5.6	6.267
6.3	0.00272
7.0	0

Nota. Elaboración propia (2021).

6.2.1.2 Torque del Hombro.

Figura 21

Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor del hombro del prototipo.



Nota. Gráfica obtenida de Adams View (2021).

Tabla 9

Tabulación de datos de la gráfica 26.

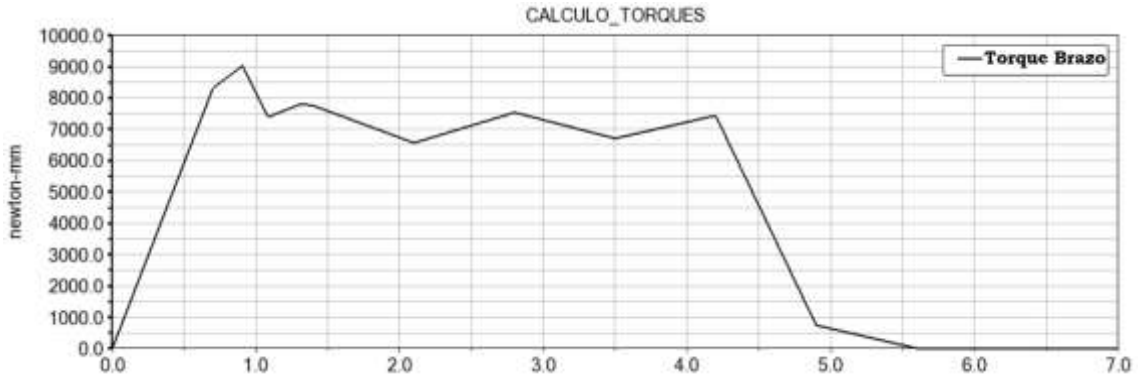
TIEMPO (s)	TORQUE (N*mm)
0.0	6.4946
0.7	13544.899
0.9057	14945.2973
1.0852	12360.9751
1.3152	13938.8174
1.4	13881.5509
2.1	7015.2639
2.8	10002.6431
3.5	9209.4801
4.2	10085.343
4.9	1616.605
5.6	6.435
6.3	1.321
7.0	0

Nota. Elaboración propia (2021).

6.2.1.3 Torque del Brazo.

Figura 22

Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor del brazo del prototipo.



Nota. Gráfica obtenida de Adams View (2021).

Tabla 10

Tabulación de datos de la gráfica 27.

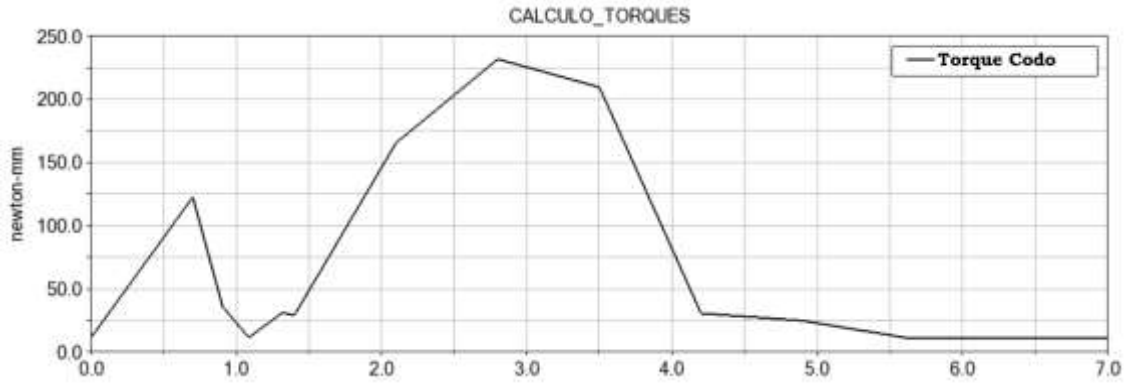
TIEMPO (s)	TORQUE (N*mm)
0.0	8.1909
0.7	8311.2309
0.9057	9026.1746
1.0852	7394.1181
1.3152	7809.14
1.4	7751.6013
2.1	6566.2826
2.8	7535.5288
3.5	6706.4127
4.2	7438.9565
4.9	741.6479
5.6	8.1313
6.3	6.4533
7.0	0

Nota. Elaboración propia (2021).

6.2.1.4 Torque del Codo.

Figura 23

Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor del codo del prototipo.



Nota. Gráfica obtenida de Adams View (2021).

Tabla 11

Tabulación de datos de la gráfica 28.

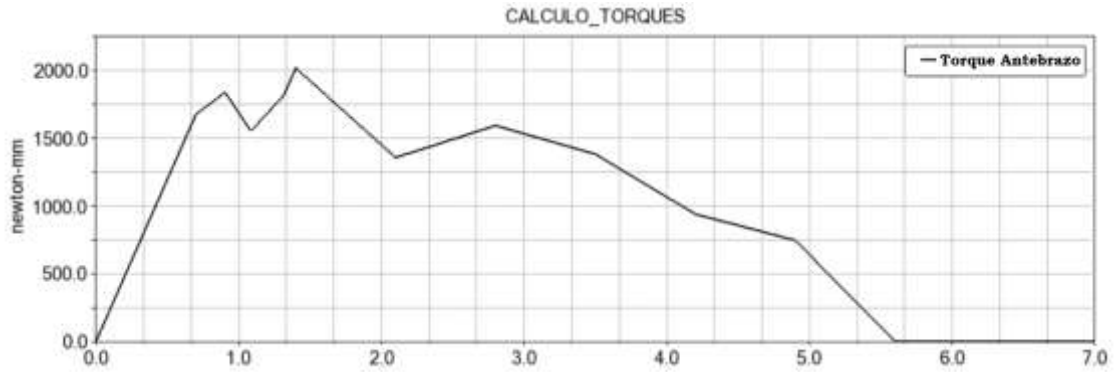
TIEMPO (s)	TORQUE (N*mm)
0.0	11.5867
0.7	122.5315
0.9057	35.9833
1.0852	11.5268
1.3152	31.0003
1.4	29.2761
2.1	165.5169
2.8	231.7579
3.5	209.5077
4.2	30.6691
4.9	24.8499
5.6	11.5271
6.3	5.5742
7.0	0

Nota. Elaboración propia (2021).

6.2.1.5 Torque del Antebrazo.

Figura 24

Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor del antebrazo del prototipo.



Nota. Gráfica obtenida de Adams View (2021).

Tabla 12

Tabulación de datos de la gráfica 29.

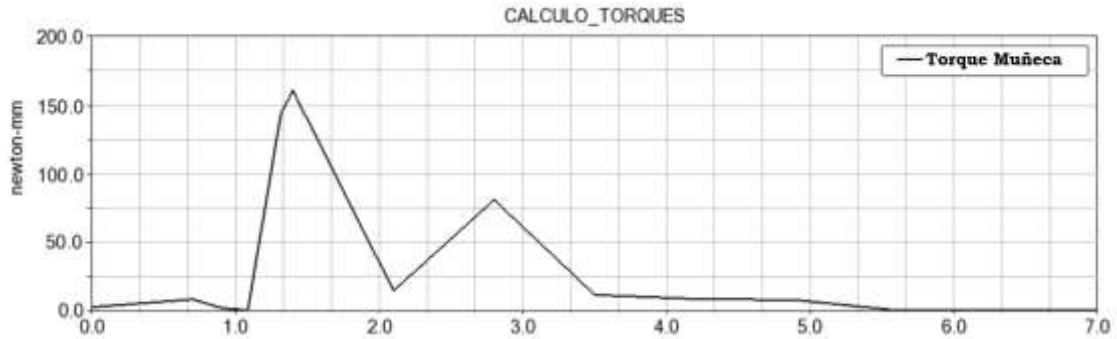
TIEMPO (s)	TORQUE (N*mm)
0.0	14.360
0.7	1719.410
0.9057	1645.745
1.0852	1598.636
1.3152	1768.417
1.4	2044.975
2.1	1462.378
2.8	1574.398
3.5	1326.589
4.2	1057.189
4.9	752.96
5.6	129.638
6.3	6.782
7.0	0

Nota. Elaboración propia (2021).

6.2.1.6 Torque de la Muñeca.

Figura 25

Gráfica de torque con respecto al tiempo del motor de la muñeca del prototipo.



Nota. Gráfica obtenida de Adams View (2021).

Tabla 13

Tabulación de datos de la gráfica 30.

TIEMPO (s)	TORQUE (N*mm)
0.0	5.368
0.7	9.632
0.9057	4.963
1.0852	3.269
1.3152	147.652
1.4	162.231
2.1	26.586
2.8	77.689
3.5	15.698
4.2	16.824
4.9	13.382
5.6	7.256
6.3	2.652
7.0	0

Nota. Elaboración propia (2021).

6.2.2 Selección de los Motores

Una vez que se encontró los torques necesarios para realizar el movimiento de cada articulación, se procedió a seleccionar el torque de los motores D.C del prototipo. Se consideró que el rendimiento que da una transmisión por engranajes y por transmisiones combinadas es de:

$$\eta_{transmisión} = 0.95$$

$$\eta_{transmisión\ combinando} = 0.90$$

También se consideró la eficiencia que tiene un motor D.C debido a pérdidas de energía, fricción y rozamiento entre sus componentes es de:

$$Ef_{motor\ D.C} = 0.85$$

Con todos estos datos se calcula el torque que debe tener el eje del motor para poder realizar el movimiento de la transmisión (Tabla 14). La relación de transmisión i está dada por el número de dientes de los engranajes.

Tabla 14

Selección del torque del motor de cada articulación.

Articulación	Torque Necesario (Nm)	Relación de transmisión	Torque eje motor* (Nm)	Torque motor (Nm)	Torque motor seleccionado (Nm)	Torque disponible (Nm)
Base	2,30	50/10= 5	0,484	0,57	0,6	3
Hombro	14,94	77/14= 5,5	3,01	3,541	4,8	26,4
Brazo	9,02	61/14= 4,36	2,174	2,443	2,54	11,07
Codo	0,23	1/1= 1	0,23	0,27	0,44	0,44
Antebrazo	2,04	45/10= 4,5	0,49	0,581	0,6	2,7
Muñeca	0,16	1/1= 1	0,16	0,19	0,3	0,3
Pinza	1,785	24/13= 1,85	1,269	1,27	1,27	2,35

Nota. Elaboración propia (2021).

En el anexo 7 se seleccionan los motores que mejor se adaptan a los requerimientos del sistema, lo cual implica en primera instancia que sean capaces de soportar el momento calculado previamente.

6.3 Cálculo de las Transmisiones del Prototipo

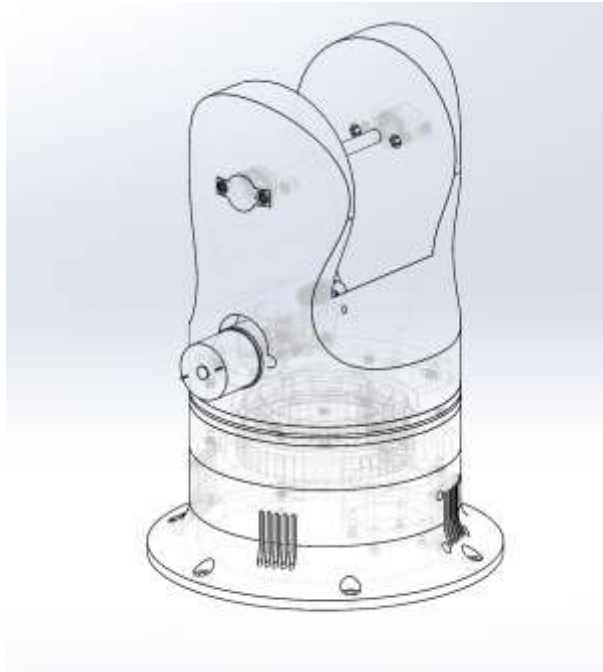
6.3.1 Cálculo de la Articulación Base-Hombro

En esta articulación se tiene una transmisión por engranajes como se ve en la fig. 26. Se estableció ciertos factores antes de realizar el diseño, tales como: el paso de los

dientes de los engranajes (m), la longitud del diente (L_{diente}) y el número de dientes (z) tanto de la patea como del piñón.

Figura 26

Articulación base-hombro.



Nota. Elaboración propia (2021).

6.3.1.1 Cálculo Engranajes. Para esta articulación se estableció un paso de 2 mm, una longitud de diente de 20mm, un piñón con 10 dientes y un engranaje con 50 dientes.

$$m = 2 \text{ mm}$$

$$L_{diente} = 20 \text{ mm}$$

$$z_{piñón} = 10 \text{ dientes}$$

$$z_{engranaje} = 50 \text{ dientes}$$

Se calcula la relación de transmisión (i) de esta articulación:

$$i = \frac{z_{engranaje}}{z_{piñón}} \quad (2)$$

$$i = \frac{50}{10} = 5$$

Se calcula el diámetro primitivo (D_p) de los engranajes.

$$Dp_{\text{piñón}} = z_{\text{piñón}} \cdot m \quad (3)$$

$$Dp_{\text{engranaje}} = z_{\text{engranaje}} \cdot m \quad (4)$$

$$Dp_{\text{piñón}} = 10 \cdot 2 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$$

$$Dp_{\text{engranaje}} = 50 \cdot 2 \text{ mm} = 100 \text{ mm}$$

Se calcula el diámetro externo (De) de los engranajes.

$$De_{\text{piñón}} = (z_{\text{piñón}} + 2) \cdot m \quad (5)$$

$$De_{\text{engranaje}} = (z_{\text{engranaje}} + 2) \cdot m \quad (6)$$

$$De_{\text{piñón}} = (10 + 2) \cdot 2 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$$

$$De_{\text{engranaje}} = (50 + 2) \cdot 2 \text{ mm} = 104 \text{ mm}$$

Se calcula el diámetro interno (Di) de los engranajes.

$$Di_{\text{piñón}} = (z_{\text{piñón}} - 2.5) \cdot m \quad (7)$$

$$Di_{\text{engranaje}} = (z_{\text{engranaje}} - 2.5) \cdot m \quad (8)$$

$$Di_{\text{piñón}} = (10 - 2.5) \cdot 2 \text{ mm} = 15 \text{ mm}$$

$$Di_{\text{engranaje}} = (50 - 2.5) \cdot 2 \text{ mm} = 95 \text{ mm}$$

Se calcula la altura de la cabeza (H_{cabeza}) de los dientes de los engranajes.

$$H_{\text{cabeza}} = m \quad (9)$$

$$H_{\text{cabeza}} = 2 \text{ mm}$$

Se calcula la altura de los dientes (H_{diente}) de los engranajes.

$$H_{\text{diente}} = 2.25 \cdot m \quad (10)$$

$$H_{\text{diente}} = 2.25 \cdot 2 \text{ mm} = 4.5 \text{ mm}$$

Se calcula la altura del pie (H_{pie}) de los engranajes.

$$H_{pie} = 1.25 \cdot m \quad (11)$$

$$H_{pie} = 1.25 \cdot 2 \text{ mm} = 2.5 \text{ mm}$$

Se calcula la holgura de los engranajes.

$$\text{Holgura} = 1.25 \cdot m - 1 \quad (12)$$

$$\text{Holgura} = 1.25 \cdot 2 \text{ mm} - 1 = 0.5 \text{ mm}$$

Se calcula el paso circular (P_c) de los engranajes.

$$P_c = \pi \cdot m \quad (13)$$

$$P_c = \pi \cdot 1.5 \text{ mm} = 4.712 \text{ mm}$$

Se calcula la distancia entre centros (D_c) de los engranajes

$$D_c = m \cdot \frac{z_1 + z_2}{2} \quad (14)$$

$$D_c = 2 \text{ mm} \cdot \frac{10 + 50}{2} = 60 \text{ mm}$$

6.3.1.2 Cálculo del Esfuerzo Soportado por el Diente del Engranaje. Se desea que la velocidad con la que trabajará esta articulación sea muy baja, teniendo un valor máximo de 15 rpm, aplicando la relación de transmisión se obtiene un valor de 75 rpm en el eje del motor.

Aplicando el factor de conversión a rad/s se obtiene una velocidad angular (ω) de

$$\omega = 75 \text{ rpm} \cdot \frac{\pi}{30} = 7.854 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

El torque necesario que debe dar el motor para mover esta articulación es de 0.57 N*m, con este torque se haya la fuerza tangencial (F_T) que actúa en los dientes de los engranajes.

$$F_T = 2 \cdot \frac{T_{motor}}{D_{p_{piñón}}} \quad (15)$$

$$F_T = 2 \cdot \frac{0.57 \text{ N} \cdot \text{m}}{0.02 \text{ m}} = 56.996 \text{ N}$$

Se selecciona el factor de forma de Lewis (Y) en la tabla 15.

Tabla 15

Factor de forma de Lewis Y.

FD = altura completa (valle deplata)

NÚM. DE DIENTES	CARGA EN LA PUNTA			CARGA CERCA DEL CENTRO		NÚM. DE DIENTES	CARGA EN LA PUNTA			CARGA CERCA DEL CENTRO	
	14½°	20°	25°	14½°	20°		14½°	20°	25°	14½°	20°
	FD	FD	Corre	FD	FD		FD	FD	Corre	FD	FD
10	0,176	0,201	0,261			32	0,322	0,364	0,443	0,547	0,627
11	0,192	0,226	0,289			33	0,324	0,367	0,445	0,550	0,633
12	0,210	0,245	0,311	0,355	0,415	34	0,327	0,371	0,449	0,554	0,635
13	0,227	0,264	0,324	0,377	0,443	37	0,330	0,380	0,454	0,563	0,645
14	0,236	0,276	0,339	0,399	0,468	38	0,333	0,384	0,457	0,568	0,653
15	0,245	0,289	0,349	0,413	0,490	40	0,336	0,389	0,459	0,570	0,659
16	0,251	0,295	0,360	0,430	0,503	45	0,340	0,399	0,468	0,579	0,678
17	0,254	0,302	0,368	0,446	0,512	50	0,346	0,408	0,474	0,588	0,694
18	0,250	0,306	0,377	0,459	0,522	55	0,352	0,417	0,480	0,596	0,704
19	0,257	0,314	0,386	0,471	0,534	60	0,355	0,421	0,484	0,603	0,713
20	0,263	0,320	0,393	0,481	0,544	65	0,358	0,425	0,488	0,607	0,721
21	0,269	0,326	0,399	0,490	0,553	70	0,360	0,429	0,493	0,610	0,728
22	0,272	0,330	0,404	0,496	0,559	75	0,361	0,432	0,496	0,613	0,735
23	0,276	0,333	0,408	0,502	0,565	80	0,363	0,436	0,499	0,615	0,739
24	0,282	0,337	0,411	0,509	0,572	90	0,366	0,442	0,503	0,619	0,747
25	0,285	0,340	0,414	0,513	0,580	100	0,368	0,446	0,506	0,622	0,755
26	0,288	0,344	0,421	0,522	0,588	150	0,375	0,458	0,518	0,635	0,779
27	0,311	0,348	0,426	0,528	0,592	200	0,378	0,463	0,524	0,640	0,787
28	0,314	0,352	0,430	0,534	0,597	300	0,382	0,471	0,534	0,650	0,801
29	0,316	0,355	0,434	0,537	0,602	Crema tera					
30	0,318	0,358	0,437	0,540	0,606		0,390	0,484	0,550	0,660	0,823

Nota. Fuente: (Builes, 2011).

El factor de forma de Lewis para engranajes de 10 dientes es de $Y=0.201$

La velocidad lineal (v) con la que trabajará el piñón es de:

$$v = \omega \cdot \frac{De_{\text{piñón}}}{2} \quad (16)$$

$$v = 7.854 \cdot \frac{24 \text{ mm}}{2} = 0.094 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se calcula el factor dinámico (k_v), este se calculará para perfil fundido o perfil moldeado ya que los engranajes serán impresos en 3D a altas temperaturas.

$$k_v = \frac{3.05 \frac{\text{m}}{\text{s}} + v}{3.05 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \quad (17)$$

$$k_v = \frac{3.05 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0.094 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3.05 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1.03$$

Finalmente se calcula el esfuerzo que soportara el diente (σ_{diente}), a este esfuerzo se le aplicara un factor de seguridad (F_s) de 3.

$$\sigma_{\text{diente}} = \frac{F_T}{m \cdot L_{\text{diente}}} \cdot \frac{k_v}{Y} \cdot F_s \quad (18)$$

$$\sigma_{diente} = \frac{56.966 N}{0.002m \cdot 0.02m} \cdot \frac{1.03}{0.201} \cdot 3 = 21.89 \cdot 10^6 Pa$$

Según la tabla 16 es esfuerzo máximo admisible del PLA con fibra de carbono es de 54.5 MPa, por lo tanto, los engranajes soportaran al esfuerzo al que están sometidos los dientes de los mismos.

Tabla 16

Propiedades mecánicas del PLA con fibra de carbono.

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	54,5 MPa	ISO 527	50 mm/min
Elongation at break	103 %	ISO 527	50 mm/min
Tensile modulus	500 MPa	ISO 527	50 mm/min
Charpy impact resistance	86.2 kJ/m ²	ISO 179	25 °C, unnotched
Hardness	75 Shore D	ISO 7619	

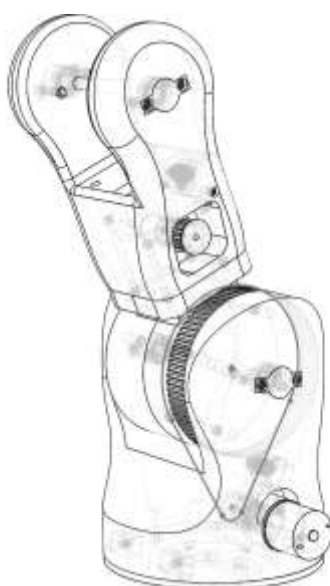
Nota. (PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta 1,75 mm). <https://19ne.short.gy/qrdhne>

6.3.2 Cálculo de la Articulación Hombro-Brazo

En esta articulación se tiene una transmisión por poleas dentadas como se ve en la fig. 27. Se estableció ciertos factores antes de realizar el diseño tales como el paso de los dientes de las poleas (m), el número de dientes (z) tanto de la polea como del piñón y la distancia entre centros de las poleas (Dc).

Figura 27

Articulación hombro-brazo.



Nota. Elaboración propia (2021).

6.3.2.1 Cálculo Engranajes. Para esta articulación se estableció un paso de 1.5 mm, un piñón con 14 dientes y un engranaje con 77 dientes.

$$m = 1.5 \text{ mm}$$

$$z_{\text{piñón}} = 14 \text{ dientes}$$

$$z_{\text{engranaje}} = 77 \text{ dientes}$$

Se calcula la relación de transmisión (i) de esta articulación desde la ecuación (2):

$$i = \frac{77}{14} = 5.5$$

Se calcula el diámetro primitivo (D_p) de los engranajes a partir de las ecuaciones (3) y (4).

$$D_{p_{\text{piñón}}} = 14 \cdot 1.5 \text{ mm} = 21 \text{ mm}$$

$$D_{p_{\text{engranaje}}} = 77 \cdot 1.5 \text{ mm} = 115.5 \text{ mm}$$

Se calcula el diámetro externo (D_e) de los engranajes. Este diámetro será también el diámetro que tendrán las poleas (D_p) a partir de las ecuaciones (5) y (6).

$$D_{e_{\text{piñón}}} = (14 + 2) \cdot 1.5 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$$

$$D_{e_{\text{engranaje}}} = (77 + 2) \cdot 1.5 \text{ mm} = 118.5 \text{ mm}$$

Se calcula el diámetro interno (D_i) de los engranajes con las ecuaciones (7) y (8).

$$D_{i_{\text{piñón}}} = (14 - 2.5) \cdot 1.5 \text{ mm} = 17.25 \text{ mm}$$

$$D_{i_{\text{engranaje}}} = (77 - 2.5) \cdot 1.5 \text{ mm} = 111.75 \text{ mm}$$

Se calcula la altura de la cabeza (H_{cabeza}) de los dientes de los engranajes a partir de la ecuación (9).

$$H_{\text{cabeza}} = 1.5 \text{ mm}$$

Se calcula la altura de los dientes (H_{diente}) de los engranajes con la ecuación (10).

$$H_{\text{diente}} = 2.25 \cdot 1.5 \text{ mm} = 3.375 \text{ mm}$$

Se calcula la altura del pie (H_{pie}) de los engranajes a partir de la ecuación (11).

$$H_{\text{pie}} = 1.25 \cdot m$$

$$H_{\text{pie}} = 1.25 \cdot 1.5 \text{ mm} = 1.875 \text{ mm}$$

Se calcula la holgura de los engranajes desde la ecuación (12).

$$Holgura = 1.25 \cdot 1.5 \text{ mm} - 1 = 0.375 \text{ mm}$$

Se calcula el paso circular (P_c) de los engranajes a partir de la ecuación (13).

$$P_c = \pi \cdot 1.5 \text{ mm} = 4.712 \text{ mm}$$

6.3.2.2 Longitud de la Correa. De la ecuación x se hayo que los diámetros de las poleas, tanto de la polea mayor (M) como de la polea menor (m) son:

$$D_{pm} = 24 \text{ mm}$$

$$D_{pM} = 118.5 \text{ mm}$$

Según la norma DIN 7753 la distancia entre centros de una transmisión por poleas debe estar en el siguiente rango:

$$0.7 \cdot (D_{pm} + D_{pM}) < D_c < 2 \cdot (D_{pm} + D_{pM}) \quad (19)$$

La distancia entre centros que se tiene en el diseño es de 101.8 mm

$$D_c = 101.8 \text{ mm}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (19) y hallando el valor dentro del rango que tiene esta distancia entre centros se encuentra que la misma cumple con el rango.

$$x = \frac{D_c}{D_{pm} + D_{pM}} = \frac{101.8 \text{ mm}}{(24 \text{ mm} + 118.5 \text{ mm})} = 0.714$$

Se encontró el ángulo de contacto (α_p) entre la correa y las poleas.

$$\alpha_{pm} = \pi - 2 \cdot \sin^{-1} \frac{D_{pM} - D_{pm}}{2 \cdot D_c} \quad (20)$$

$$\alpha_{pM} = \pi + 2 \cdot \sin^{-1} \frac{D_{pM} - D_{pm}}{2 \cdot D_c} \quad (21)$$

$$\alpha_{pm} = \pi - 2 \cdot \sin^{-1} \frac{118.5 \text{ mm} - 24 \text{ mm}}{2 \cdot 101.8 \text{ mm}} = 2.176 \text{ rad}$$

$$\alpha_{pM} = \pi + 2 \cdot \sin^{-1} \frac{118.5 \text{ mm} - 24 \text{ mm}}{2 \cdot 101.8 \text{ mm}} = 4.107 \text{ rad}$$

Se encontró la longitud de tramo (L_{tramo}) de la correa.

$$L_{tramo} = D_c \cdot \cos \left(\sin^{-1} \frac{D_{pM} - D_{pm}}{2 \cdot D_c} \right) \quad (22)$$

$$L_{tramo} = 101.8 \text{ mm} \cdot \cos(\sin^{-1} \frac{118.5 \text{ mm} - 24 \text{ mm}}{2 \cdot 101.8 \text{ mm}}) = 90.17 \text{ mm}$$

Se halla las longitudes de arco de la correa.

$$Arco_{pm} = \frac{D_{pm} \cdot \alpha_{pm}}{2} \quad (23)$$

$$Arco_{pM} = \frac{D_{pM} \cdot \alpha_{pM}}{2} \quad (24)$$

$$Arco_{pm} = \frac{24 \text{ mm} \cdot 2.176}{2} = 26.115 \text{ mm}$$

$$Arco_{pM} = \frac{118.5 \text{ mm} \cdot 4.107 \text{ rad}}{2} = 243.336 \text{ mm}$$

Finalmente, se obtuvo la longitud total de la correa.

$$L_{correa} = Arco_{pm} + Arco_{pM} + 2 \cdot L_{tramo} \quad (25)$$

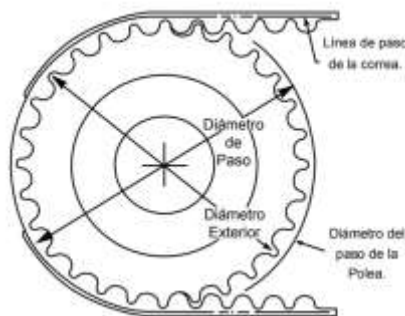
$$L_{correa} = 26.115 \text{ mm} + 243.336 \text{ mm} + 2 \cdot 90.17 \text{ mm} = 449.8 \text{ mm} \approx 450 \text{ mm}$$

6.3.2.3 Selección de la Correa.

Las tres dimensiones principales para seleccionar una correa síncrona (figura 28) son la longitud, el paso y el ancho de la correa. El paso es la distancia en milímetros existente entre un diente y el siguiente. Este se selecciona en la siguiente tabla (figura 29), introduciendo los RPM de la polea más pequeña y los HP de la potencia de diseño.

Figura 28

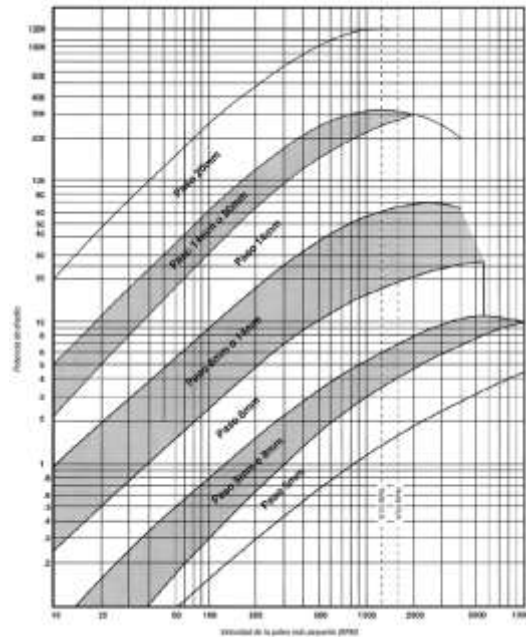
Diagrama de correa síncrona.



Nota. Fuente: (Intermec, 2020)

Figura 29

Tabla para la selección del paso de las correas.



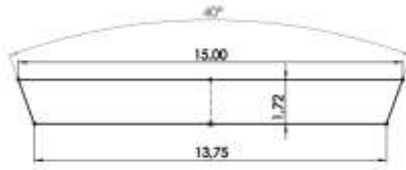
Nota. Fuente: (Intermec, 2020)

El motor seleccionado tiene una potencia de 6W, que convirtiéndolos a hp da 0.08 hp, se aplicará un factor de servicio de 1 ya que este motor soportará carga ligera y tendrá un servicio de funcionamiento intermedio. La velocidad con la que trabajará esta articulación será muy baja, teniendo un valor de 10 rpm, aplicando la relación de transmisión se obtiene un valor de 55 rpm en el eje del motor.

Introduciendo estos valores a la tabla se encontró un paso de 5mm. Según el manual, este tipo de correas tienen un ancho estándar de 15mm y de 20mm para el paso 5mm. Se tomará un ancho de 15mm para la selección del número de correas.

6.3.2.4 Número de Correas. Una vez seleccionada la correa, se calculó cuantas correas serán necesarias para soportar la potencia de la transmisión. Para esto se halla el área que tendrá la corra en la parte más crítica de la misma.

$$Area = \frac{B + b}{2} \cdot h \quad (26)$$



$$Area = \frac{15 \text{ mm} + 13.75 \text{ mm}}{2} \cdot 1.72 \text{ mm} = 24.725 \text{ mm}^2$$

El peso específico (γ) y el esfuerzo permisible ($\sigma_{admissible}$) según el fabricante de correas es:

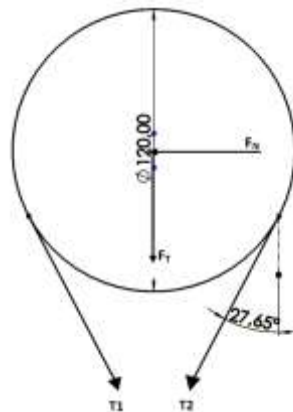
$$\gamma = 10862.23 \frac{N}{m^3}$$

$$\sigma_{admissible} = 5514285.7 \text{ Pa}$$

Se graficó el diagrama de fuerzas, para saber que fuerzas y tensiones se aplican sobre la correa.

Figura 30

Diagrama de fuerzas aplicadas a la correa de la articulación hombro-brazo.



Nota. Elaboración propia (2021)

La correa está sometida a tensiones en cada extremo de la misma, se calcula la primera de ella (T_1).

$$T_1 = \sigma_{admissible} \cdot Area \tag{27}$$

$$T_1 = 5514285.7 \text{ Pa} \cdot 2.4725 \cdot 10^{-5} \cdot m^2 = 136.341N$$

Se calcula la masa lineal de la correa (m_L).

$$m_L = \frac{\gamma \cdot Area}{g} \tag{28}$$

$$m_L = \frac{10862.23 \frac{N}{m^3} \cdot 2.4725 \cdot 10^{-5} m^2}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 0.027 \frac{kg}{m}$$

Después se calcula la velocidad lineal (v_L) que tendrá la correa .

$$v_L = \frac{\omega \cdot D_{pm}}{2} \quad (29)$$

$$v_L = \frac{5.76 \frac{rad}{s} \cdot 0.024 m}{2} = 0.069 \frac{m}{s}$$

Se encuentra la fuerza centrífuga (F_c) a la que es sometida la correa.

$$F_c = m_L \cdot v_L^2 \quad (30)$$

$$F_c = 0.027 \frac{kg}{m} \cdot \left(0.069 \frac{m}{s}\right)^2 = 1.308 \cdot 10^{-4} N$$

De la formula (31) se despejó T_2 para encontrar la segunda tensión a la que está sometida la correa.

$$e^{\alpha\mu} = \frac{T_1 - F_c}{T_2 - F_c} \quad (31)$$

Donde:

α = ángulo de abrazamiento de la correa.

μ = coeficiente de rozamiento entre correas y poleas.

$$T_2 = \frac{T_1 - F_c}{e^{\alpha\mu}} + F_c \quad (32)$$

$$T_2 = \frac{136.341 N - 1.308 \cdot 10^{-4} N}{e^{2.176 rad \cdot 0.7}} + 1.308 \cdot 10^{-4} N = 29.717 N$$

Se calcula la fuerza tangencial que actúa sobre la correa.

$$F_{tang} = T_1 - T_2 \quad (33)$$

$$F_{tang} = 136.341 N - 29.717 N = 106.624 N$$

Se calcula la potencia a la que trabajara la correa.

$$Pot_{correa} = F_{tang} \cdot v_L \quad (34)$$

$$Pot_{correa} = 106.624 \text{ N} \cdot 0.069 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7.35 \text{ W}$$

Se calcula el número de correas con las que trabajará esta transmisión.

$$\#Correas = \frac{Pot_{motor}}{Pot_{correa}} \quad (35)$$

$$\#Correas = \frac{6 \text{ W}}{7.35 \text{ W}} = 0.816 \approx 1 \text{ Correa}$$

La correa seleccionada para esta articulación es una 4505M15.

6.3.2.5 Selección del Diámetro del Eje. Se calculó el diámetro del eje mediante la teoría de la distorsión. Primero se dibujó el diagrama de cuerpo libre del eje (fig. 31), donde tenemos la polea y en sus extremos dos rodamientos.

Figura 31

Diagrama de cuerpo libre del eje de la articulación hombro-brazo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Como se puede observar en la figura 30, la pulea ejerce dos fuerzas sobre el eje, la fuerza normal (F_N) y la fuerza tangencial (F_T).

$$F_N = (T_1 - T_2) \cdot \sin \beta \quad (36)$$

$$F_N = (136.341 \text{ N} - 29.717 \text{ N}) \cdot \sin 0.483 = 49.489 \text{ N}$$

$$F_x = F_N = 49.489 \text{ N}$$

$$F_T = (T_1 + T_2) \cdot \sin \beta \quad (37)$$

$$F_T = (136.341 \text{ N} + 29.717 \text{ N}) \cdot \sin 0.483 = 147.087 \text{ N}$$

$$F_y = F_T = 147.087 \text{ N}$$

En el eje x

Figura 32

Diagrama de fuerzas en el eje x de la articulación hombro-brazo.



boración propia (2021)

$$\sum F_x = 0 \tag{38}$$

$$R_{Ix} - 49.489 \text{ N} + R_{Dx} = 0$$

$$\sum MR_{Ix} = 0 \tag{39}$$

$$-49.489 \text{ N}(32 \text{ mm}) + R_{Dx}(140 \text{ mm}) = 0$$

$$R_{Dx} = \frac{49.489 \text{ N} \cdot 32 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = 11.312 \text{ N}$$

$$R_{Ix} = 49.489 \text{ N} - 11.312 \text{ N} = 38.177 \text{ N}$$

Fuerza cortante en el eje x

Figura 33

Fuerza cortante en el eje x de la articulación hombro-brazo.

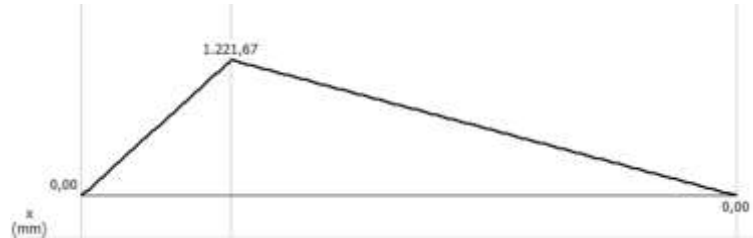


Nota. Fuente: MDSolids 4.0.

Momento flector en el eje x

Figura 34

Momento flector en el eje x de la articulación hombro-brazo.



Nota. Fuente: MDSolids 4.0.

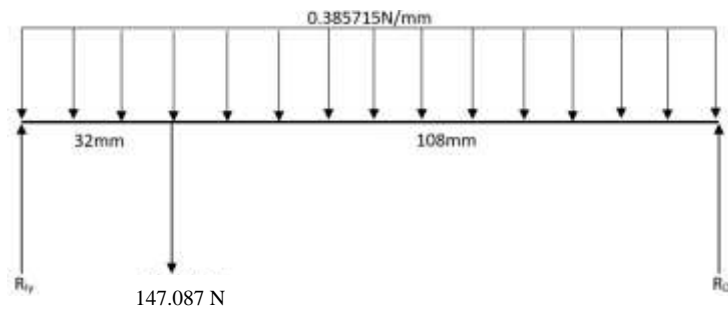
$$Mf_{Dx} = 1221.67 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$Mf_{Ix} = 1221.67 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

En el eje Y

Figura 35

Diagrama de fuerzas en el eje y de la articulación hombro-brazo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se encuentra la resultante del peso que el brazo robótico ejerce sobre el eje de esta transmisión.

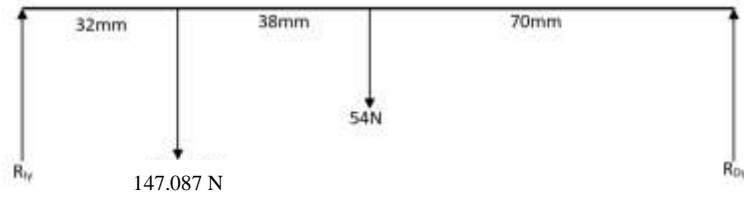
$$A = b \cdot h \tag{40}$$

$$A = 0.385715 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot 140 \text{ mm} = 54 \text{ N}$$

$$\text{Centroide}_{\text{longitudinal}} = \frac{140 \text{ mm}}{2} = 70 \text{ mm}$$

Figura 36

Diagrama de fuerzas totales en el eje y de la articulación hombro-brazo.



Nota. Elaboración propia (2021)

$$\sum F_y = 0 \quad (41)$$

$$R_{Iy} - 147.087 \text{ N} - 54 \text{ N} + R_{Dy} = 0$$

$$\sum MR_{Iy} = 0 \quad (42)$$

$$-147.087 \text{ N}(32 \text{ mm}) - 54 \text{ N}(70 \text{ mm}) + R_{Dy}(140 \text{ mm}) = 0$$

$$R_{Dy} = \frac{(147.087 \text{ N} \cdot 32 \text{ mm}) + (54 \text{ N} \cdot 70 \text{ mm})}{140 \text{ mm}} = 60.62 \text{ N}$$

$$R_{Iy} = 147.087 \text{ N} + 54 \text{ N} - 60.62 \text{ N} = 140.467 \text{ N}$$

Fuerza cortante en el eje y

Figura 37

Fuerza cortante en el eje y de la articulación hombro-brazo.

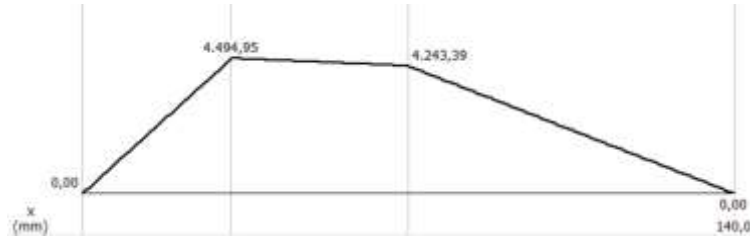


Nota. Fuente: MDSolids 4.0.

Momento flector en el eje y

Figura 38

Momento flector en el eje y de la articulación hombro-brazo.



Nota. Fuente: MDSolids 4.0.

$$Mf_{Iy} = 4494.95 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$Mf_{Dy} = 4243.39 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Una vez calculados los momentos flectores en el eje y y en el eje x, se calculó los momentos flectores máximos en el lado derecho del eje y en el lado izquierdo del eje.

$$Mf_I = \sqrt{Mf_{Ix}^2 + Mf_{Iy}^2} \tag{43}$$

$$Mf_I = \sqrt{(1221.67 \text{ N} \cdot \text{mm})^2 + (4494.95 \text{ N} \cdot \text{mm})^2} = 4.658 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mf_D = \sqrt{Mf_{Dx}^2 + Mf_{Dy}^2} \tag{44}$$

$$Mf_D = \sqrt{(1221.67 \text{ N} \cdot \text{mm})^2 + (4243.39 \text{ N} \cdot \text{mm})^2} = 4.416 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El momento torsor es el mismo que se necesita para realizar el movimiento de la articulación y el momento flector máximo es el que se ejerce en el lado izquierdo del eje.

$$M_T = 14.9 \text{ Nm}$$

$$M_f = 4.658 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Se aplica un factor de seguridad de 3, y se elige un eje SAE 4340.

$$\eta_S = 3$$

$$\sigma_{y \text{ SAE4340}} = 686 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Se calcula el diámetro del eje por la teoría de la distorsión.

$$\phi_{eje_{TED}} = \sqrt[3]{\left(\frac{32\eta_S}{\pi\sigma_{y \text{ SAE4340}}}\right) \cdot \sqrt{\frac{3}{4}M_T^2 + M_f^2}} \tag{45}$$

$$\phi_{eje_{TED}} = \sqrt[3]{\left(\frac{32 \cdot 3}{\pi \cdot 686 \cdot 10^6 Pa}\right)^2 \sqrt{\frac{3}{4}(14.9 N \cdot m)^2 + (4.658 N \cdot m)^2}} = 8 mm$$

El diámetro seleccionado para esta articulación será de 8mm. Se comprobó si el diámetro seleccionado cumple con los requerimientos a través de la rigidez angular.

$$\Delta\theta = \frac{M_T \cdot L}{G \cdot J} \quad (46)$$

Donde:

$\Delta\theta$ es la rigidez angular.

M_T es el momento torsor aplicado al eje.

L es la longitud del eje.

G es el modulo cortante.

J el momento angular.

$$G = 80 \cdot 10^9 Pa$$

$$J = \frac{\pi \cdot \phi_{eje}^4}{32} \quad (47)$$

$$J = \frac{\pi \cdot (0.008 m)^4}{32} = 4.021 \cdot 10^{-9} m^4$$

$$\Delta\theta = \frac{14.9 Nm \cdot 0.14 m}{80 \cdot 10^9 Pa \cdot 4.021 \cdot 10^{-9} m^4} = 0.00648 deg \cdot \frac{360^\circ}{2 \cdot \pi} = 0.3715 deg$$

La rigidez angular máxima del eje se la encuentra convirtiendo la longitud a grados a través del factor de conversión:

$$deg = \frac{L}{30.48 cm} \cdot ft \cdot 1^\circ \quad (48)$$

$$\Delta\theta_{max} = \frac{14cm}{30.48cm} \cdot ft \cdot 1^\circ = 0.4593 deg$$

La rigidez angular máxima del eje es mayor a la calculada, por lo cual el diámetro seleccionado del eje es correcto.

$$\Delta\theta_{max} \geq \Delta\theta$$

6.3.2.6 Selección de los Rodamientos. Se procede a calcular el módulo de las reacciones que ejercen en el extremo del eje.

$$R_I = \sqrt{R_{Ix}^2 + R_{Iy}^2} \quad (49)$$

$$R_D = \sqrt{R_{Dx}^2 + R_{Dy}^2} \quad (50)$$

$$R_I = \sqrt{(38.177 \text{ N})^2 + (140.467 \text{ N})^2} = 145.563 \text{ N}$$

$$R_D = \sqrt{(11.312 \text{ N})^2 + (60.62 \text{ N})^2} = 61.666 \text{ N}$$

El F_L recomendado según el catálogo FAG (Anexo 8) es de 2÷3 en transmisiones de máquina general, subcategoría: transmisiones universales. El F_z recomendado para transmisiones por correas de 2.5.

$$F_z = 2.5$$

Se calcula la carga dinámica equivalente para el rodamiento izquierdo, el cual es el rodamiento que soportara más carga.

$$P_I = R_I \cdot F_z \quad (51)$$

$$P_I = 145.563 \cdot 2.5 = 0.364 \text{ kN}$$

Para un diámetro de 8 mm de eje, se selecciona el rodamiento 608 del anexo 8.

$$C = 3.25 \text{ kN}$$

$$C_o = 1.37 \text{ kN}$$

$$F_o = 12.4$$

Se calcula el factor de velocidad.

$$F_n = \sqrt[3]{\frac{33.33}{n}} \quad (52)$$

$$F_n = \sqrt[3]{\frac{33.33}{10}} = 1.494$$

Se calcula el factor de esfuerzos dinámicos.

$$F_L = \frac{C}{P} \cdot F_n \quad (53)$$

Donde

F_L es el factor de esfuerzos dinámicos

C es la capacidad de carga dinámica

P es la carga dinámica equivalente

F_n es el factor de velocidad

$$F_L = \frac{3.25 \text{ kN}}{0.364 \text{ kN}} \cdot 1.494 = 13.341$$

El F_L calculado es superior al seleccionado, por lo cual el rodamiento 608 cumple con los requerimientos solicitados.

De la formula (54) se despeja la vida nominal del rodamiento en horas (L_h).

$$F_L = \sqrt[3]{\frac{L_h}{500}} \quad (54)$$

$$L_h = 500 \cdot F_L^3 = 500 \cdot (13.341)^3 = 1.187 \cdot 10^6 \text{ horas de vida util.}$$

En el lado derecho se utilizará también un rodamiento 608 ya que en este lado se ejerce menor carga y según lo calculado este rulimán asegura un buen funcionamiento.

Por motivos de simetría y ya que la articulación hombro-brazo es la que soporta más carga, se selecciona el mismo diámetro de eje y los mismos rodamientos para las demás articulaciones.

6.4 Diseño 3D del Prototipo de Brazo Robótico Industrial

Luego de seleccionar cada uno de los componentes de transmisión de potencia, se procedió a realizar el diseño final de cada una de las articulaciones.

6.4.1 Base

La base es el elemento que soportará todo el peso del prototipo, por esa razón se utilizara una transmisión por engranajes, ya que estos ofrecen una mayor resistencia a torques altos y no necesitan de mucha distancia. La base (fig. 39) es accionada por un motorreductor POLOLU metálico 47:1 25Dx67L mm MP 12v, el cual ejerce un movimiento rotatorio en todo el brazo robótico, ayudando a este movimiento un rodamiento 16014.

Figura 39

Diseño de la base del brazo robótico.

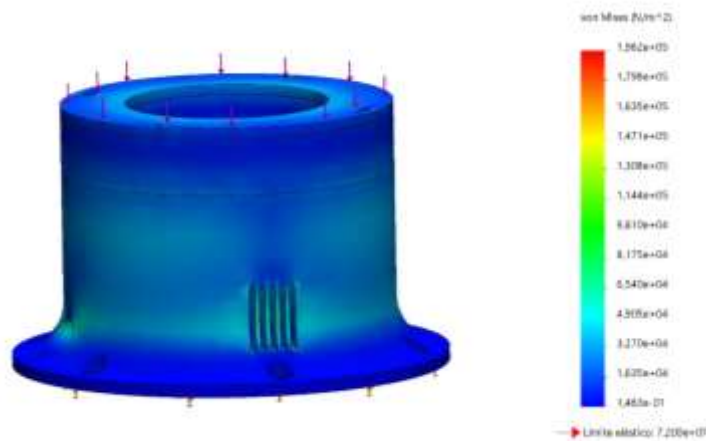


Nota. Elaboración propia (2021).

Se comprobó mediante método de elementos finitos que la articulación soporte los esfuerzos generados por las cargas de las demás articulaciones, se realizó una simulación estática de la base (figura 40) donde se evidencia que los esfuerzos que se generan en esta articulación están por debajo del límite elástico del material seleccionado.

Figura 40

Simulación estática de la base en el programa de Solid Works®.



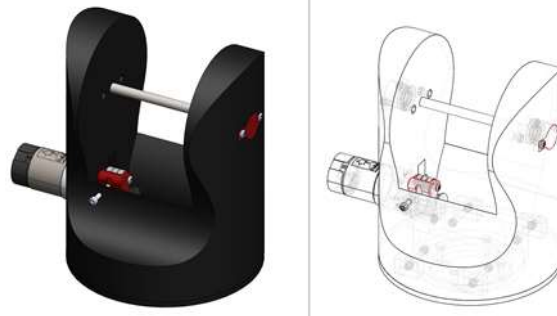
Nota. Simulación obtenida en el programa Solid Works® (2021).

6.4.2 Hombro

El hombro es la articulación que se ensamblará a la base y permite el movimiento vertical del prototipo. El hombro (fig. 41) cuenta con un motorreductor POLOLU metálico 150:1 37Dx73L mm MP 12v, al eje de este motor está conectada una polea dentada de 14 dientes, la cual acciona mediante una correa dentada T5 de 450 mm el giro del brazo. En esta articulación se encuentra un eje de 8 mm el cual está soportado por dos rodamientos 608zz. Para tensar la correa se diseñó un tensor el cual consta de 3 rodamientos 624.

Figura 41

Diseño de la base del brazo robótico.



Nota. Elaboración propia (2021).

6.4.3 Brazo

Unido al eje del hombro se encuentra el brazo, el cual tiene acoplada una polea dentada de 77 dientes. El brazo (fig. 42) cuenta con un motorreductor POLOLU metálico 227:1 25Dx71L mm MP 12v, conectado al eje de este motor está una polea dentada de 14 dientes, la cual acciona mediante una correa dentada T5 de 425 mm el giro del codo. En esta articulación se encuentra un eje de 8 mm el cual está soportado por dos rodamientos 608zz. Para tensar la correa se diseñó un tensor el cual consta de 3 rodamientos 624.

Figura 42

Diseño del brazo del prototipo.



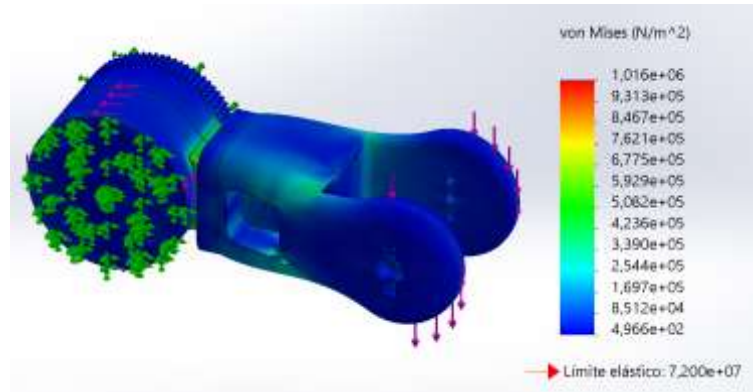
Nota. Elaboración propia (2021).

Se comprobó mediante método de elementos finitos que la articulación soporte los esfuerzos generados por las cargas de las demás articulaciones, se realizó una

simulación estática del brazo (figura 43) donde se evidencia que los esfuerzos que se generan en esta articulación están por debajo del límite elástico del material seleccionado.

Figura 43

Simulación estática del brazo en el programa de Solid Works®.



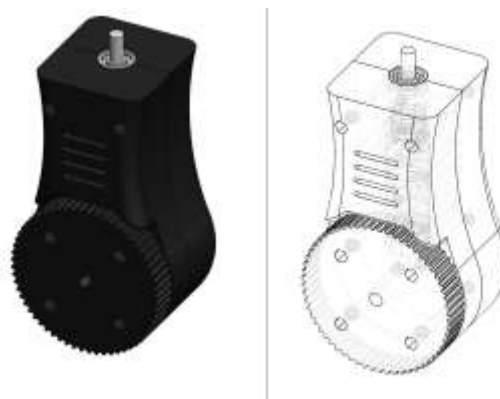
Nota. Simulación obtenida en el programa Solid Works® (2021).

6.4.4 Codo

Ensamblado al brazo está el codo, el cual tiene acoplado una polea dentada de 61 dientes. Esta articulación permitirá el giro del antebrazo, para realizar este movimiento se ha colocado un motorreductor POLOLU metálico 34:1 25Dx67L mm MP 12v incorporado en medio de la articulación el cual está sujeto a un acople de 4mm a 8mm, para facilitar el giro del eje de 8mm se ha incorporado un rodamiento 608zz.

Figura 44

Diseño del codo del brazo robótico.



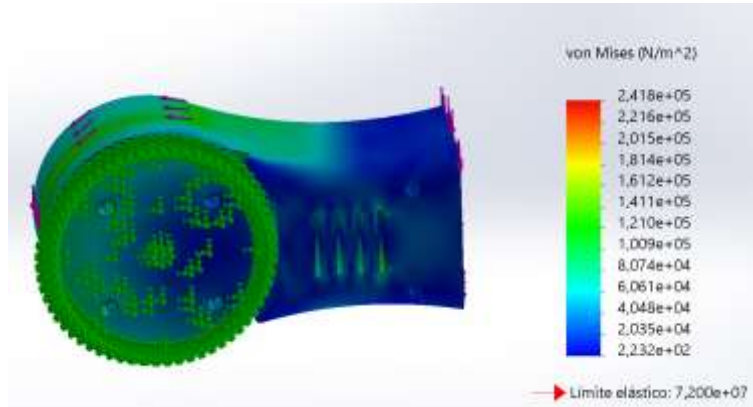
Nota. Elaboración propia (2021).

Se comprobó mediante método de elementos finitos que la articulación soporte los esfuerzos generados por las cargas de las demás articulaciones, se realizó una

simulación estática del codo (figura 45) donde se evidencia que los esfuerzos que se generan en esta articulación están por debajo del límite elástico del material seleccionado.

Figura 45

Simulación estática del codo en el programa de Solid Works®.



Nota. Simulación obtenida en el programa Solid Works® (2021).

6.4.5 Antebrazo

El antebrazo se ensambla al prototipo en el eje de 8 mm del codo, el cual permite el movimiento vertical del prototipo. El antebrazo (fig. 46) cuenta con un motorreductor POLOLU metálico 47:1 25Dx67L mm MP 12v, conectado al eje de este motor está una polea dentada de 10 dientes, la cual acciona mediante una correa dentada T5 de 275 mm el giro de la muñeca. En esta articulación se encuentra un eje de 8 mm el cual está soportado por dos rodamientos 608zz. Para tensar la correa se diseñó un tensor el cual consta de 3 rodamientos 624.

Figura 46

Diseño del antebrazo del brazo robótico.



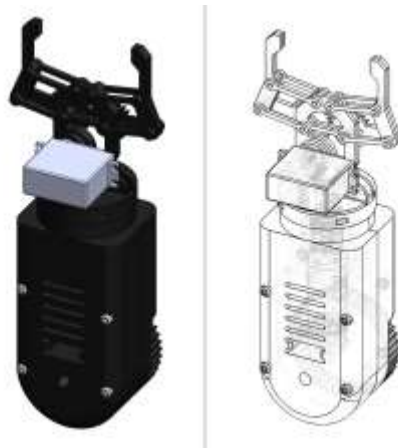
Nota. Elaboración propia (2021).

6.4.6 Muñeca

Ensamblado al eje del antebrazo se tiene la muñeca, la cual tiene acoplada una polea dentada de 45 dientes. Esta articulación permitirá el giro del antebrazo, para realizar este movimiento se ha colocado un motorreductor POLOLU metálico 20.4:1 25Dx65L mm MP 12v incorporado en medio de la articulación el cual está sujeto a un acople de 4mm a 8mm, para facilitar el giro del eje de 8mm se ha incorporado un rodamiento 608zz. La muñeca ensamblara el actuador final, se ha diseñado esta para que sea intercambiable entre los distintos tipos de actuadores finales.

Figura 47

Diseño de la muñeca del brazo robótico.

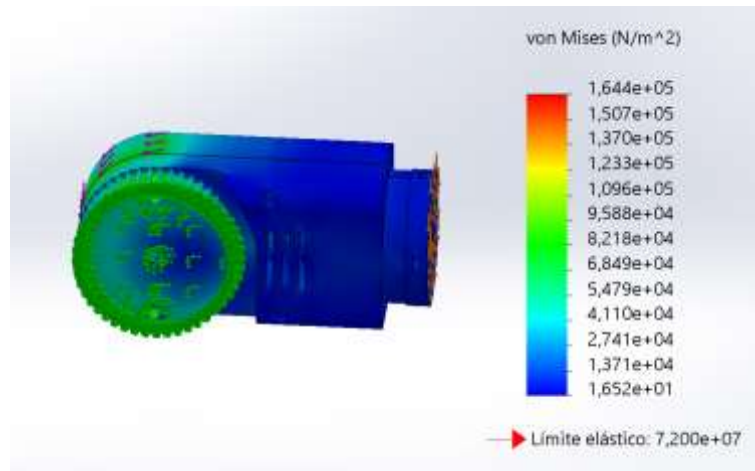


Nota. Elaboración propia (2021).

Se comprobó mediante método de elementos finitos que la articulación soporte los esfuerzos generados por las cargas de las demás articulaciones, se realizó una simulación estática de la muñeca (fig. 48) donde se evidencia que los esfuerzos que se generan en esta articulación están por debajo del límite elástico del material seleccionado.

Figura 48

Simulación estática de la muñeca en el programa de Solid Works®.



Nota. Simulación obtenida en el programa Solid Works® (2021).

6.4.7 Prototipo

Una vez realizado el diseño de cada uno de los componentes que conformaran el prototipo se hizo el ensamblaje del mismo, dando como resultado el diseño que se muestra en la figura 49.

Figura 49

Diseño del brazo robótico.



Nota. Elaboración propia (2021).

6.5 Construcción del Brazo Robótico

6.5.1 Impresión de las Piezas

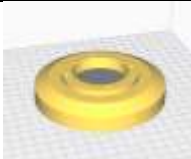
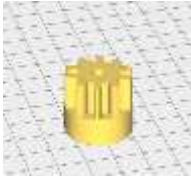

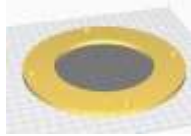


La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición capaz de crear un objeto tridimensional mediante la superposición de capas sucesivas de un determinado material. Se eligió este tipo de mecanizado por la rapidez que ofrece, el

abaratamiento de costos en materiales y la facilidad de modelar piezas complejas, precisas y de bajo peso. Algunas piezas, las cuales no serán sometidas a ningún tipo de esfuerzo fueron impresas en PLA color rojo, este tipo de filamento ofrece menor resistencia.

En la tabla 17 se puede observar las piezas del prototipo que fueron impresas en 3D, el material y el tiempo de impresión necesario para obtener la pieza.

Tabla 17

Piezas exportadas a programa para impresión 3D.

NOMBRE	MATERIAL	TIEMPO IMPRESIÓN (h)	MODELO A IMPRIMIR
ART1- ENGRANAJE INTERNO	FIBRA CARBONO	15	
ART1- PIÑÓN MOTOR PEQUEÑO	FIBRA CARBONO	1	
ART1- SOPORTE RODAMIENTO	FIBRA CARBONO	11,46	
ART1- TAPA RODAMIENTO	FIBRA CARBONO	3,28	
ART1- BASE	FIBRA CARBONO	33	
ART1- SOPORTE MOTOR	PLA	2,5	

ART2- UNIÓN ARTICULACIÓN	FIBRA CARBONO	11,13	
ART2- POLEA DENTADA	FIBRA CARBONO	5,72	
ART2- TAPA	PLA	0,2	
ART2- TENSOR	PLA	0,2	
ART2- UNIÓN ARTICULACIÓN 1	FIBRA CARBONO	39	
ART3- PARTE GIRATORIA A	FIBRA CARBONO	23,34	
ART3- PARTE GIRATORIA B	FIBRA CARBONO	12,58	
ART3- POLEA DENTADA	FIBRA CARBONO	1	
ART3- TAPA	PLA	0,2	

ART3- TENSOR	PLA	0.2	
ART3- UNIÓN ARTICULACIÓN 2	FIBRA CARBONO	26,16	
ART4- PARTE GIRATORIA A	FIBRA CARBONO	14,2	
ART4- PARTE GIRATORIA B	FIBRA CARBONO	24,49	
ART5- TAPA INFERIOR	PLA	0,2	
ART5- TAPA	PLA	0,2	
ART5- TENSOR	PLA	0,2	
ART5- POLEA DENTADA	FIBRA CARBONO	1	
ART5- UNIÓN ARTICULACIÓN 4	FIBRA CARBONO	13,44	

ART6- PARTE GIRATORIA A	FIBRA CARBONO	13,33	
ART6- PARTE GIRATORIA B	FIBRA CARBONO	8,11	
ART6- SUJETA PINZA	FIBRA CARBONO	2,27	
ART6- PINZA	FIBRA CARBONO	0,4	

Nota. Elaboración propia (2021).

Figura 50

Mecanizado de piezas del prototipo en impresora 3D.



Nota. Figuras mecanizadas en la impresora 3D Ender 5 Pro. Elaboración propia (2021)

6.5.2 Ensamblaje del Prototipo

6.5.2.1 Ensamblaje Base.

Tabla 18

Piezas a utilizar en el ensamble de la base.

ITEM	PIEZA	UNIDADES
1	ART1- ENGRANAJE INTERNO	1
2	ART1- PIÑÓN MOTOR PEQUEÑO	1
3	ART1- SOPORTE RODAMIENTO	1
4	ART1- TAPA RODAMIENTO	1
5	ART1- BASE	1
6	ART1- SOPORTE MOTOR	1
7	MOTORREDUCTOR POLOLU METÁLICO 47:1 25DX67L MM MP 12V	1
8	RULIMAN NSK 16014 (70X110X13)	1
9	PERNO ALLEN M4X20 MM	4
10	PERNO ALLEN M4X50 MM	4
11	TUERCA M4	8

Nota. Elaboración propia (2021).

Figura 51

Piezas necesarias para ensamblar la base del prototipo.



Nota. Elaboración propia (2021).

Para armar la base, primero, se debe insertar el motorreductor Pololu en la pieza ART1-SOPORTE MOTOR, luego en el eje del motor se debe ensamblar la pieza ART1-PIÑÓN MOTOR PEQUEÑO como se muestra en la figura 52.

Figura 52

Ensamble del motor y piñón.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se atornilla la pieza ART1-SOPORTE MOTOR a ART1-BASE dando como resultado el ensamble de la figura 53.

Figura 53

Ensamble del motor en la base.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se procede a colocar la pieza ART1-ENGRANAJE INTERNO, sincronizando los dientes de cada engranaje, luego encima de la base se debe ensamblar la pieza ART1-SOPORTE RODAMIENTO y se coloca el rulimán NSK 16014. Finalmente, se atornilla la pieza ART1-TAPA RODAMIENTO a ART1-BASE (figura 54), dando como resultado final el ensamble que se muestra en la figura 55.

Figura 54

Pieza ART-TAPA RODAMIENTO atornillada a la base.



Nota. Elaboración propia (2021)

Figura 55

Ensamble final de la base.



Nota. Elaboración propia (2021).

6.5.2.2 Ensamblaje Hombro.

Tabla 19

Piezas a utilizar en el ensamble del hombro.

ITEM	PIEZA	UNIDADES
1	ART2- UNIÓN ARTICULACIÓN 1	1
2	ART2- TENSOR	1
3	ART2- TAPA	2
4	ART2- POLEA DENTADA	1
5	ART2- UNIÓN ARTICULACIÓN	1
6	150:1 METAL GEARMOTOR 37DX73L MM 12V WITH 64 CPR ENCONDER (HELICAL PIÑÓN)	1
7	EJE DE ACERO SAE4340 Ø8 MMX140 MM	1
8	RULIMAN NSK 624DDMC3 (4X13X5)	3
9	RULIMAN NSK 608DD1MC3E (8X22X7)	2
10	PERNO ALLEN M4X25 MM	5
11	PERNO ALLEN M4X30 MM	5
12	PERNO ALLEN M4X20 MM	1
13	TURCA M4	10

Nota. Elaboración propia (2021)

Figura 56

Piezas necesarias para ensamblar el hombro del prototipo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se ensambla los rodamientos NSK 608DD y el eje de acero en la pieza ART2-UNIÓN ARTICULACIÓN 1, después se debe colocar las tapas ART2-TAPA como se muestra en la figura 57.

Figura 57

ART2- UNIÓN ARTICULACIÓN 1 con tapas.

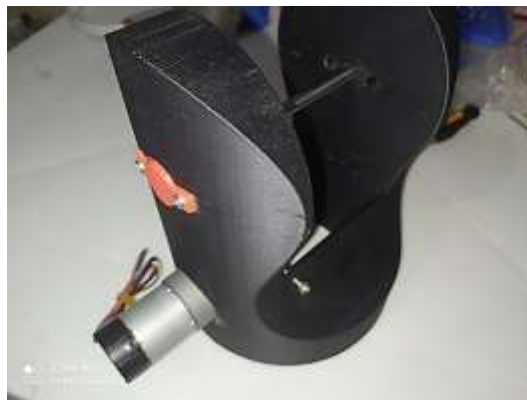


Nota. Elaboración propia (2021)

Se coloca el motor Pololu y en su eje se ensambla en piñón ART2-POLEA DENTADA (fig. 58).

Figura 58

Motor Pololu en ART2- UNIÓN ARTICULACIÓN 1.



Nota. Elaboración propia (2021)

Finalmente, se coloca el tensor ART2-TENSOR junto a los rodamientos NSK 624. En la figura 59 se puede observar el ensamble de la articulación del hombro.

Figura 59

Ensamble hombro.



Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.2.3 Ensamblaje Brazo.

Tabla 20

Piezas a utilizar en el ensamble del brazo.

ITEM	PIEZA	UNIDADES
1	ART3- PARTE GIRATORIA A	1
2	ART3- PARTE GIRATORIA B	1
3	ART3- TAPA	2
4	ART3- TENSOR	1
5	ART3- POLEA DENTADA	1
6	ART3- UNIÓN ARTICULACIÓN 2	1
7	227:1 METAL GEARMOTOR 25DX71L MM MP 12V WITH 48 CPR ENCODER	1
8	EJE DE ACERO SAE4340 Ø8 MMX115	1
9	RULIMAN NSK 624DDMC3 (4X13X5)	3
10	RULIMAN NSK 608DD1MC3E (8X22X7)	2
11	PERNO ALLEN M4X60 MM	6
12	PERNO ALLEN M4X50 MM	2
13	PERNO ALLEN M4X40 MM	1
14	PERNO ALLEN M4X20 MM	5
15	TURCA M4	14

Nota. Elaboración propia (2021)

Figura 60

Piezas necesarias para ensamblar el brazo del prototipo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se ensamblan las piezas ART3- PARTE GIRATORIA A y ART3- PARTE GIRATORIA B atornillándolas entre sí como se muestra en la figura 61.

Figura 61

Unión piezas ART3- PARTE GIRATORIA A y ART3- PARTE GIRATORIA B.



Nota. Elaboración propia (2021)

En la pieza ART3- UNIÓN ARTICULACIÓN 2 se coloca los dos rodamientos NSK 608 y el eje de acero de 8mm de diámetro. Después, se ensambla la pieza ART3- UNIÓN ARTICULACIÓN 2 a las piezas ART3- PARTE GIRATORIA A y ART3- PARTE GIRATORIA B como se muestra en la figura 62.

Figura 62

Unión piezas ART3- UNIÓN ARTICULACIÓN 2, ART3- PARTE GIRATORIA A y ART3- PARTE GIRATORIA B.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se ensambla el tensor ART3-TENSOR con sus respectivos rodamientos y se atornilla las tapas ART3-TAPA. Finalmente, se une el motor y la pieza ART3- POLEA DENTADA al ensamble final (fig. 63).

Figura 63

Ensamble brazo.



Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.2.4 Ensamblaje Codo.

Tabla 21

Piezas a utilizar en el ensamble del codo.

ITEM	PIEZA	UNIDADES
1	ART4- PARTE GIRATORIA A	1
2	ART4- PARTE GIRATORIA B	1
3	34:1 METAL GEARMOTOR 25DX67L MM MP 12V WITH 48 CPR ENCODER	1

4	EJE DE ACERO ROSCADO SAE4340 Ø8 MMX35 MM	1
5	TUERCA M8	1
6	RULIMAN NSK 608DD1MC3E (8X22X7)	2
7	ACOPLE FLEXIBLE 4*8MM	1
8	PERNO ALLEN M4X60 MM	6
9	TURCA M4	6

Nota. Elaboración propia (2021)

Figura 64

Piezas necesarias para ensamblar el codo del prototipo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se une al acople el motor Pololu y el eje roscado. Luego, se ensambla el motor y el rodamiento NSK 608 a la pieza ART4- PARTE GIRATORIA A, como se muestra en la figura 65.

Figura 65

Motor Pololu acoplado a la pieza ART4- PARTE GIRATORIA A.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se atornilla la pieza ART4- PARTE GIRATORIA A a la pieza ART3- PARTE GIRATORIA B, dando como resultado el ensamble que se muestra en la figura 66.

Figura 66

Ensamble codo.



Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.2.5 Ensamblaje Antebrazo.

Tabla 22

Piezas a utilizar en el ensamble del antebrazo.

ITEM	PIEZA	UNIDADES
1	ART5- UNIÓN ARTICULACIÓN 4	1
2	ART5- PIÑÓN MOTOR PEQUEÑO	1
3	ART5- TAPA	2
4	ART5- TENSOR	1
5	ART5- TAPA INFERIOR	1
6	ART5- POLEA DENTADA	1
7	47:1 METAL GEARMOTOR 25DX67L MM MP 12V WITH 48 CPR ENCODER	1
8	EJE DE ACERO SAE4340 Ø8 MMX80 MM	1
9	RULIMAN NSK 624DDMC3 (4X13X5)	3
10	RULIMAN NSK 608DD1MC3E (8X22X7)	2
11	PERNO ALLEN M4X15 MM	2
12	PERNO ALLEN M4X10 MM	4
13	PERNO ALLEN M4X30 MM	1

14	PERNO ALLEN M4X20 MM	1
15	TURCA M4	8

Nota. Elaboración propia (2021)

Figura 67

Piezas necesarias para ensamblar el antebrazo del prototipo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se ensambla el motor a la pieza ART5- UNIÓN ARTICULACIÓN 4, en el eje del motor se acopla la polea ART5- POLEA DENTADA. Luego, se asegura la pieza ART5- TENSOR con los rodamientos NSK 624 (fig. 68).

Figura 68

Motor Pololu y tensor acoplados a la pieza ART5- UNIÓN ARTICULACIÓN 4.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se ensambla a la pieza ART5- UNIÓN ARTICULACIÓN 4 la tuerca M8 y se atornilla la tapa ART5- TAPA INFERIOR. Se coloca los rodamientos NSK 608 y el eje de acero al ensamble (figura 69).

Figura 69

Proceso de ensamblaje de la muñeca.



Nota. Elaboración propia (2021)

Finalmente se atornilla las tapas Art5- TAPA al ensamble final, como se puede observar en la figura 70.

Figura 70

Ensamble muñeca.



Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.2.5 Ensamblaje Muñeca.

Tabla 23

Piezas a utilizar en el ensamble de la muñeca.

ITEM	PIEZA	UNIDADES
1	ART6- PARTE GIRATORIA A	1
2	ART6- PARTE GIRATORIA B	1

3	ART6- SUJETA PINZA	1
4	ART6- PINZA	1
5	20,4:1 METAL GEARMOTOR 25DX65L MM MP 12V WITH 48 CPR ENCODER	1
6	ACOPLE FLEXIBLE 4*8MM	1
7	SERVOMOTOR TOWER PRO MG996R 13 KGCM 180°	1
8	EJE DE ACERO ROSCADO SAE4340 Ø8 MMX50MM	1
9	RULIMAN NSK 608DD1MC3E (8X22X7)	1
10	PERNO ALLEN M3X15 MM	11
11	PERNO ALLEN M4X50 MM	4
12	PERNO ALLEN M4X30 MM	4
13	TURCA M3	11
14	TURCA M4	8
15	TURCA M8	1

Nota. Elaboración propia (2021)

Figura 71

Piezas necesarias para ensamblar el antebrazo del prototipo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se une al acople el motor Pololu y el eje roscado. Luego, se ensambla el motor a la pieza ART6- PARTE GIRATORIA A, como se muestra en la figura 72.

Figura 72

Unión del motor Pololu a la pieza ART6- PARTE GIRATORIA A.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se ensambla cada una de las piezas de la pinza tal como en la figura 73.

Figura 73

Ensamblaje de la pinza.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se acopla el servomotor TOWER PRO MG996R 13 KGCM 180° a la pinza como se puede apreciar en la figura 74.

Figura 74

Unión del servomotor a la pinza.



Nota. Elaboración propia (2021)

Se acopla el rodamiento NSK 608 a la pieza ART6- SUJETA PINZA. Finalmente, se atornilla la pinza y la pieza ART6- SUJETA PINZA a la unión de las piezas ART6- PARTE GIRATORIA B y ART6- PARTE GIRATORIA A como se muestra en la figura 75.

Figura 75.

Ensamblaje final de la muñeca.



Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.2.5 Ensamblaje Final del Prototipo. Una vez realizada la unión de cada uno de los componentes que conformaran el prototipo se hizo el ensamblaje del mismo, dando como resultado el prototipo de brazo robótico que se muestra en la figura 76.

Figura 76

Ensamblaje final del prototipo.



Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.3 Control del Prototipo

El prototipo es solo el inicio de un proyecto más grande, el cual busca crear un laboratorio de automatización industrial, en el cual los estudiantes podrán conocer e interactuar con las distintas aplicaciones de los robots en la industria como la soldadura, el fresado, corte laser, aplicación de pintura, pick and place, entre muchas otras. Es por esto que se debe realizar un control específico para cada operación, dotando al brazo robótico de distintos sistemas de manejo como puede ser control por mandos, pantallas táctiles, computadoras, celulares, visión artificial, sensores de movimiento, entre otros.

Cualquier sistema de control a desarrollar, con base a las características físicas de la estructura del prototipo debe ser capaz de calcular las trayectorias que el brazo robótico debe ejecutar para llegar a determinado punto. Antes de realizar cualquier movimiento, el sistema de control debe verificar que todos estos se realicen dentro del espacio de trabajo permitido, en caso contrario, puede suceder que el robot salga del espacio de trabajo y las piezas que lo componen se dañen o que los mecanismos se traben.

Para determinar con exactitud el espacio de trabajo del prototipo se realizó un control de relaciones de posición en Solidworks® (fig. 77), en el cual se hayo el ángulo mínimo y máximo en el cual pueden trabajar las articulaciones, como se puede observar en la imagen 78.

Figura 77

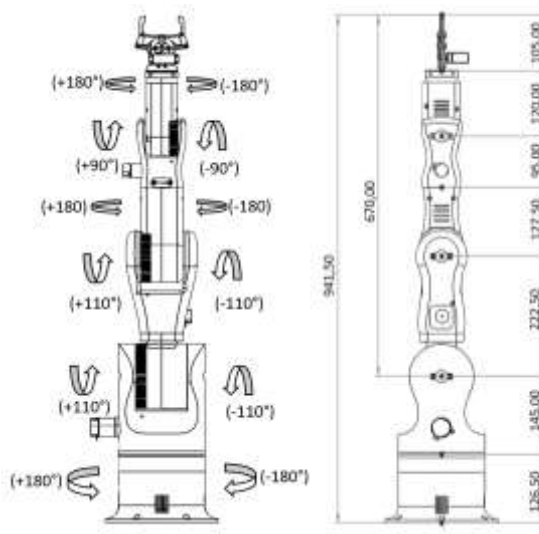
Controlador de referencias de posición en el programa Solid Works®.



Nota. Solidworks® (2021)

Figura 78

Ángulo de movimiento y distancia de trabajo del prototipo.

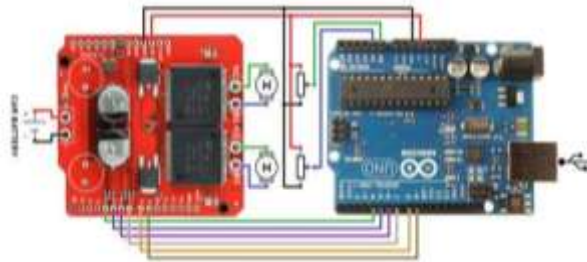


Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.3.1 Control Básico del Prototipo. En este proyecto se creará solo un control básico, el cual dotará al brazo robótico movimientos sencillos para así poder comprobar el funcionamiento de los actuadores y la correcta movilidad mecánica del prototipo. Para realizar este control se utilizó un mini controlador Monster VNH2SP30 30A Dual comandado por Arduino, como se puede apreciar en la figura 79.

Figura 79

Diagrama de control mini controlador VNH2SP30 30A DUAL.



Nota. Fuente: (Monster Moto Shield VNH2SP30 Motor Driver 14A (Peak 30A), 2020) .

Figura 80

Circuito de control del mini controlador VNH2SP30 30A DUAL.



Nota. Elaboración propia (2021)

El programa de control (Anexo 10) fue escrito para controlar variables el arranque y parada, la velocidad y el sentido de giro del actuador. En la imagen 81 se aprecia el monitor en serie del programa. En el monitor se puede observar los comandos a utilizar para controlar los actuadores:

- STOP: Si se oprime el número 1, el controlador ordenará la parada de los actuadores.
- FORWARD: Si se oprime el número 2, el controlador ordenará que el actuador comience a girar.
- Reverse: Si se oprime el número 3, el controlador ordenará al actuador que gire en sentido contrario.
- READ CURRENT: Si se oprime el número 4, el monitor mostrará la lectura de la corriente a la que están trabajando los actuadores.
- INCREASE SPEED: Si se oprime el símbolo +, se incrementará la velocidad del actuador en 10 pulsos. Si se oprime ++, el actuador trabajará en su máxima velocidad.
- DECREASE SPEED: Si se oprime el símbolo -, se disminuirá la velocidad del actuador en 10 pulsos. Si se oprime --, el actuador trabajará en su mínima velocidad.

Figura 81

Monitor en serie del programa Arduino.



Nota. Fuente: IDE de Arduino.

6.5.3.2 Objeto a Levantar por el Actuador Final. El prototipo está diseñado para soportar un máximo de carga de 0.5 kg. El objeto a levantar para realizar las pruebas de funcionamiento es un tubo cuadrado de acero cuyo peso exacto es de 0.52 kg como se muestra en la figura 82.

Figura 82

Peso de objeto a levantar por el prototipo



Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.3.3 Prueba de la Articulación Base-Hombro. Se hizo la conexión del motorreductor Pololu metálico 47:1 25Dx67L mm (mp) 12v con encoder 64 CPR al mini controlador VNH2SP30 30A DUAL (fig. 83) y se procedió a correr el programa IDE de Arduino para realizar pruebas de funcionamiento que se describen en la tabla 24.

Figura 83

Movimiento de la articulación base-hombro.



Nota. Elaboración propia (2021)

Tabla 24

Pruebas de control de la base-hombro.

Prueba realizada	Mínimo	Máximo
Prueba de velocidad (rpm)	0 rpm	12 rpm
Prueba de movimiento (°)	-180°	+180°
Prueba de resistencia (kg)	0 kg	0.9 kg

Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.3.4 Prueba de la Articulación Hombro-Brazo. Se hizo la conexión del motorreductor metálico 150:1 37Dx73L mm 12v con encoder 64 CPR (piñón helicoidal) al mini controlador VNH2SP30 30A DUAL (fig. 84) y se procedió a correr el programa IDE de Arduino para realizar pruebas de funcionamiento que se describen en la tabla 25.

Figura 84

Movimiento de la articulación hombro-brazo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Tabla 25*Pruebas de control del hombro-brazo.*

Prueba realizada	Mínimo	Máximo
Prueba de velocidad (rpm)	0 rpm	8 rpm
Prueba de movimiento (°)	-110°	+110°
Prueba de resistencia (kg)	0 kg	0.7 kg

Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.3.5 Prueba de la Articulación Brazo-Codo. Se hizo la conexión del motorreductor metálico 227:1 25Dx71L mm (mp) 12v con encoder 48 CPR al mini controlador VNH2SP30 30A DUAL (fig. 85) y se procedió a correr el programa IDE de Arduino para realizar pruebas de funcionamiento que se describen en la tabla 26.

Figura 85*Movimiento de la articulación brazo-codo.**Nota. Elaboración propia (2021)***Tabla 26***Pruebas de control del brazo-codo.*

Prueba realizada	Mínimo	Máximo
Prueba de velocidad (rpm)	0 rpm	11 rpm
Prueba de movimiento (°)	-110°	+110°
Prueba de resistencia (kg)	0 kg	0.8 kg

Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.3.6 Prueba de la Articulación Codo-Antebrazo. Se hizo la conexión del motorreductor metálico 34:1 25Dx67L mm (mp) 12v con codificador 48 CPR al mini controlador VNH2SP30 30A DUAL (fig. 86) y se procedió a correr el programa IDE de Arduino para realizar pruebas de funcionamiento que se describen en la tabla 27.

Figura 86

Movimiento de la articulación codo-antebrazo.



Nota. Elaboración propia (2021)

Tabla 27

Pruebas de control del codo-antebrazo.

Prueba realizada	Mínimo	Máximo
Prueba de velocidad (rpm)	0 rpm	16 rpm
Prueba de movimiento (°)	-180°	+180°
Prueba de resistencia (kg)	0 kg	0.9 kg

Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.3.7 Prueba de la Articulación Antebrazo-Muñeca. Se hizo la conexión del motorreductor metálico 47:1 25Dx67L mm (mp) 12v con codificador 48 CPR al mini controlador VNH2SP30 30A DUAL (fig. 87) y se procedió a correr el programa IDE de Arduino para realizar pruebas de funcionamiento que se describen en la tabla 28.

Figura 87

Movimiento de la articulación antebrazo-muñeca.



Nota. Elaboración propia (2021)

Tabla 28

Pruebas de control del antebrazo-muñeca.

Prueba realizada	Mínimo	Máximo
Prueba de velocidad (rpm)	0 rpm	15 rpm
Prueba de movimiento (°)	-90°	+90°
Prueba de resistencia (kg)	0 kg	0.6 kg

Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.3.8 Prueba de la Articulación Muñeca-Pinza. Se hizo la conexión del motorreductor metálico 20,4:1 25Dx65L mm (mp) 12v con codificador 48 CPR al mini controlador VNH2SP30 30A DUAL (fig. 88) y se procedió a correr el programa IDE de Arduino para realizar pruebas de funcionamiento que se describen en la tabla 29.

Figura 88

Movimiento de la articulación muñeca-pinza.



Nota. Elaboración propia (2021)

Tabla 29

Pruebas de control de la muñeca-pinza.

Prueba realizada	Mínimo	Máximo
Prueba de velocidad (rpm)	0 rpm	20 rpm
Prueba de movimiento (°)	-180°	+180°
Prueba de resistencia (kg)	0 kg	0.9 kg

Nota. Elaboración propia (2021)

6.5.4 Costos y Materiales

En la tabla 30 se puede observar los costos de los materiales que se utilizaron para la construcción del prototipo. El valor total es de \$ 1231.50 dólares, costo muy económico

en comparación a los brazos robóticos de similares características que se puede encontrar en el mercado, valores que sobrepasan los \$ 5.000 dólares, llegando en algunos casos a costar \$ 20,000.

Tabla 30

Presupuesto total del prototipo.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
1	IMPRESORA 3D CREALITY ENDER 5 PRO	1	\$ 550,00	\$ 550,00
1	1 KG FILAMENTO CARBONFIL 1,75MM	5	\$ 35,00	\$ 175,00
2	1KG FILAMENTO PREMIUM PLA ROJO 1,75MM	1	\$ 20,00	\$ 20,00
3	47:1 METAL GEARMOTOR 25DX67L MM MP 12V WITH 48 CPR ENCODER	2	\$ 40,00	\$ 80,00
4	150:1 METAL GEARMOTOR 37DX73L MM 12V WITH 64 CPR ENCODER (HELICAL PIÑÓN)	1	\$ 40,00	\$ 40,00
5	227:1 METAL GEARMOTOR 25DX71L MM MP 12V WITH 48 CPR ENCODER	1	\$ 40,00	\$ 40,00
6	34:1 METAL GEARMOTOR 25DX67L MM MP 12V WITH 48 CPR ENCODER	1	\$ 40,00	\$ 40,00
7	20,4:1 METAL GEARMOTOR 25DX65L MM MP 12V WITH 48 CPR ENCODER	1	\$ 40,00	\$ 40,00
8	SERVOMOTOR TOWER PRO MG996R 13 KGCM 180°	1	\$ 13,00	\$ 13,00
9	RULIMAN NSK 16014 (70X110X13)	1	\$ 54,00	\$ 54,00
10	RULIMAN NSK 624DDMC3 (4X13X5)	9	\$ 2,50	\$ 22,50
11	RULIMAN NSK 608DD1MC3E (8X22X7)	8	\$ 3,50	\$ 28,00
12	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M3X5	8	\$ 0,50	\$ 4,00
13	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M3X15	6	\$ 0,50	\$ 3,00
14	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X65	4	\$ 0,20	\$ 0,80
15	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X35	1	\$ 0,15	\$ 0,15
16	PERNO ALLEN C/CILINDRICAM4X50	13	\$ 0,15	\$ 1,95
17	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X30	11	\$ 0,15	\$ 1,65
18	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X20	13	\$ 0,10	\$ 1,30
19	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X10	5	\$ 0,10	\$ 0,50
20	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X15	2	\$ 0,10	\$ 0,20
21	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X60	12	\$ 0,20	\$ 2,40
22	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X40	5	\$ 0,15	\$ 0,75
23	PERNO ALLEN C/CILINDRICA M4X25	7	\$ 0,10	\$ 0,70
24	TUERCA M8	2	\$ 0,06	\$ 0,12

25	TUERCA M4	88	\$ 0,01	\$ 0,88
26	ARDUINO MEGA 2560 R3 + CABLE USB	1	\$ 16,00	\$ 16,00
27	MINI CONTROLADOR DE MOTOR DC MONSTER	2	\$ 15,00	\$ 30,00
28	FUENTE DE PODER (VOLTAJE) 220/110V A 12V 10A	1	\$ 18,00	\$ 18,00
29	KIT DE 40 CABLES ARDUINO 20 CM DE LONGITUD HEMBRA-HEMBRA	1	\$ 2,50	\$ 2,50
30	KIT DE 40 CABLES ARDUINO 20 CM DE LONGITUD MACHO-HEMBRA	1	\$ 2,50	\$ 2,50
31	ACOPLE FLEXIBLE 4*8MM	2	\$ 4,00	\$ 8,00
32	BANDA DENTADA CNCHDT-5M-15MM X1M	2	\$ 12,80	\$ 25,60
33	EJE DE ACERO SAE4340 Ø8 MM*600MM	1	\$ 8,00	\$ 8,00
TOTAL				\$ 1231,50

Nota. Elaboración propia (2021)

7. DISCUSIÓN

El presente proyecto de tesis se desarrolló para conocer el trabajo que desempeña un brazo robótico en la industria, es por esto que se planteó el diseño y la construcción de un prototipo de un brazo robótico industrial a escala de seis grados de libertad económico y fácil de construir.

La revisión de la literatura permitió identificar las variables que intervienen en el cálculo matemático y diseño de un brazo robótico industrial, variables como la estructura mecánica de un robot, los tipos de transmisiones, reductores, actuadores y sensores que pueden utilizarse en la construcción del prototipo.

Una vez definidas todas las variables que intervienen en la selección de un robot industrial, se procedió a realizar el diseño conceptual del prototipo, el cual permitió obtener de manera sencilla la masa, centro de masa, el centro de inercia y la longitud de cada una de las articulaciones facilitando así el desarrollo del cálculo matemático.

La simulación del prototipo ayudó, de manera satisfactoria, a encontrar los torques necesarios para que cada motor realice los movimientos de sus articulaciones correspondientes. El programa utilizado para realizar esta simulación fue Adams View®, debido a que este software permite la importación de las piezas diseñadas en Solid Works® con sus respectivas relaciones de posición, matrices de inercia y centros de masa. Si no se hubiese realizado una simulación la complejidad de los cálculos hubiese aumentado de manera considerable ya que se deberían tomar variables físicas en cada una de las articulaciones como la gravedad, la viscosidad, el rozamiento, los momentos de masa e inercia y cada una de las posibles posiciones.

Se seleccionaron motores D.C como actuadores del prototipo ya que este tipo de motores eléctricos ofrecen una sencilla instalación, son precisos y silencios. La marca Pololu tienen una amplia selección de motores que permitieron elegir el par y la velocidad que requería cada articulación.

Al realizar los cálculos se pudo determinar a partir de diferentes teorías de diseño de elementos de máquinas los componentes de transmisión de potencia necesarios para el movimiento de cada articulación. Estos componentes son: ejes, rodamientos, correas de sincronismo y engranajes.

Se decidió trabajar con correas de sincronismo como sistema de transmisión puesto que estas ofrecen una gran precisión de movimiento y no requieren de grandes

velocidades para poder trabajar. Al realizar el diseño se buscó que la holgura entre los dientes de los engranajes de las poleas y los dientes de la correa de sincronismo fuera mínima, asegurando así que no exista pérdida de potencia en las transmisiones, haciendo que estas sean lo más precisas.

Una vez obtenidos estos datos se realizó el diseño final del prototipo, modificando lo necesario al diseño conceptual, permitiendo así poder realizar una construcción rápida y sencilla, ya que cada una de las articulaciones fueron impresas en 3D utilizando un filamento de plástico reforzado con fibra de carbono.

Se seleccionó trabajar con impresión 3D, puesto que es un sistema bastante económico y eficaz, el cual permitió desarrollar piezas más complejas y ligeras en comparación a otros tipos de mecanizados, como el fresado o torneado, los cuales requieren materiales más pesados y costosos.

El control realizado permitió hacer las pruebas necesarias al prototipo para comprobar la buena funcionabilidad del mismo y verificar que se cumplan con todos los parámetros establecidos, como la velocidad máxima de cada motor, la precisión del brazo robótico y el esfuerzo máximo que puede soportar cada articulación.

Conociendo cada uno de los materiales usados y sus costos, se estableció el presupuesto del prototipo dando un total de \$1231.50 USD. En el mercado se encuentran brazos robóticos industriales de similares características que superan los \$5.000 dólares. Las características destacables en estos brazos son su gran velocidad de trabajo y su capacidad de carga máxima. El prototipo construido es lento en comparación a estas máquinas, esto es debido a que a la hora de seleccionar motores predominó el precio de los mismos, abaratando los costos de construcción.

En la universidad Nacional de Loja se han desarrollado muy pocos proyectos que involucren un brazo robótico, es por esto que se busca que se siga investigando y desarrollando nuevos proyectos en esta línea de la automatización. Entre los proyectos realizados tenemos el de (Caraguay y Loja, 2011) en el que se desarrolló la construcción un brazo robótico adquirido para ser controlado por un control Joystick de forma inalámbrica, montado sobre una base móvil. Otra investigación fue la de (Granda y Jiménez, 2011) donde se realizó el diseño y construcción de un brazo mecánico automatizado para un uso didáctico.

Al realizar una comparativa entre el presente proyecto y las dos investigaciones antes mencionadas se puede denotar que el prototipo de brazo robótico industrial a escala fue diseñado con más grados de libertad, dispone de una mayor área de trabajo y su costo es considerablemente reducido. En la tesis de (Caraguay y Loja, 2011) se realizó un brazo robótico de acero diseñado para soportar una carga máxima de 0.5 kg, el cual llegó a costar 3075.00 USD.

A nivel nacional e internacional existe una amplia investigación en el campo de los brazos robóticos. Los proyectos son creados dándole al brazo robótico una función específica, limitando así el campo de trabajo en el que se puede desenvolver el robot, entre estos, está la investigación desarrollada por (López. V, 2016), la cual consiste en el diseño y simulación de un brazo manipulador de objetos en zonas de alto riesgo para seres humanos. En esta investigación se propone el diseño de un brazo robótico de 5 grados de libertad con cuerpo de aluminio el cual soportara una carga máxima de 1.5 kg. Al soportar más peso tuvo que seleccionar motores de alto par elevando así el costo del brazo, el cual es de 4958.13 USD.

8. CONCLUSIONES

- Mediante la revisión literaria se logó identificar y establecer las diferentes variables que se debe tomar en consideración para diseñar y construir un brazo robótico, en la cual se determinó algunos aspectos para el diseño del prototipo. Se definió:
 - Área de trabajo
 - Grados de libertad
 - Velocidad
 - Carga máxima
 - Material de construcción

- El cálculo matemático del prototipo permitió dimensionar variables mecánicas como engranajes, correas de sincronismo, ejes y rodamientos. La simulación del prototipo demostró ser efectiva para la selección de los motores, puesto que genera gráficas torque-tiempo donde se seleccionaron los torques máximos (picos de la gráfica) con los que trabajan cada articulación.
- El diseño del brazo robótico demostró ser funcional ya que soportó las cargas aplicadas en la simulación estática de Solid Works®. Se obtuvo un diseño funcional, aplicando los cambios de las variables mecánicas que se encontraron al momento de realizar los cálculos matemáticos.
- El prototipo construido, en fibra de carbono, soporta las cargas generadas por el peso de cada articulación y por el peso máximo aplicado en el efector final. Al ser mecanizado en impresión 3D, técnica destacada por su precisión, se ensambló de manera rápida.
- Se validó el brazo robótico sometándolo a pruebas de velocidad, de precisión y de resistencia demostrando que el prototipo cumple con las expectativas planteadas durante el proyecto. En la prueba de velocidad se incrementaron los rpm de cada motor hasta que perdió fuerza. En la prueba de precisión se buscó el ángulo de giro, máximo y mínimo, que alcanza cada articulación. Finalmente, en la prueba de resistencia se probó cada articulación aumentando la carga máxima soportada por el prototipo, dando un promedio de 0.8 kg.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una segunda etapa complementaria del proyecto, donde se implemente el control del prototipo del brazo robótico industrial a escala.
- Se puede profundizar en el desarrollo de los actuadores finales, permitiendo al prototipo trabajar en las distintas áreas de la industria.
- No sobrepasar el peso máximo soportado por el robot, puesto que esto puede generar fallos en los motores y por lo tanto fallos en el movimiento del robot.
- Los movimientos de cada articulación tienen límites de giro establecidos por la estructura mecánica del brazo robótico, por lo tanto es necesario fijarse en dichas limitaciones para así evitar generar daños en los componentes del prototipo.
- Explorar la posibilidad de cambiar ciertas piezas del prototipo por otros materiales, con propiedades que soporten mayores ambientes mecánicos, que tenga mayor resistencia y durabilidad.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Angeles, J. (2003). *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms*. New York: Springer.
- Automatización Industrial y robótica. Qué es y sus claves de éxito.* ((s.f.)). Retrieved from Aldakin: <http://www.aldakin.com/automatizacion-industrial-robotica-claves-exito/>
- Avallone, E. A., & Baumeister III, T. (1996). *Marks' Standar Handbook for Mechanical Engineers*. New York: McGraw Hill.
- Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2005). *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexico: McGraw-Hill.
- Builes, F. J. (2011). *Cálculo de piñones rectos*. Recuperado de Slideshare: <https://www.slideshare.net/falzate51/clculo-de-piones-rectos>
- Costas, M. R. (2012). Robótica: entra al mundo de la inteligencia artificial. *Conectados*, 32.
- da Silva, O. J., Paves, M. J., & da Silva, J. U. (2009). *Curso de robótica*. Argentina: Multiplo.
- FU, K., GONZALEZ, R., & LEE, C. (n.d.). *ROBOTICA: Control, detección, visión e inteligencia*. McGraw-Hill.
- Groover, M. P. (2002). *Automation Production, systems and cim*. United States: Pretince Hall.
- Hibbeler, R. (2004). *Mecánica vectorial para ingenieros: Dinámica*. Mexico: Pearson Educación.
- Hibbeler, R. (2010). *Ingeniería mecánica: Estática*. México: Pearson Educación.
- Intermec. (2020). *Correas sincrónicas*. Retrieved from Intermec.com.co: https://www.intermec.com.co/pdf/correas_sincronicas.pdf
- Mason, M. T. (2001). *Mechanics of robotic manipulation*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- McComb, G. (2011). *ROBOT BUILDER'S BONANZA*. United States: McGraw-Hill.

- Monster Moto Shield VNH2SP30 Motor Driver 14A (Peak 30A)*. (2020, 07 12). Retrieved from IoT WEB PLANET: <https://www.iotwebplanet.com/product/monster-moto-shield-vnh2sp30-motor-driver-14a-peak-30a/>
- Pérez, M. A., Cuevas, E., & Zaldivar, D. (2015). *Fundamentos de Robótica y Mecatrónica con MATLAB y Simulink*. Mexico: AlfaOmega.
- PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta 1,75 mm*. (s.f). Retrieved from Impresoras 3D: <https://www.impresoras3d.com/producto/pla-carbon-fiber-fibra-de-carbono-proto-pasta-175-mm/>
- Pololu. (2020). *150:1 Metal Gearmotor 37Dx73L mm 12V with 64 CPR Encoder (Helical Pinion)*. Retrieved from Pololu.com: <https://www.pololu.com/product/2828>
- Pololu. (2020). *20.4:1 Metal Gearmotor 25Dx65L mm MP 12V with 48 CPR Encoder*. Retrieved from Pololu.com: <https://www.pololu.com/product/4863/specs>
- Pololu. (2020). *227:1 Metal Gearmotor 25Dx71L mm MP 12V with 48 CPR Encoder*. Retrieved from Pololu.com: <https://www.pololu.com/product/4869>
- Pololu. (2020). *34:1 Metal Gearmotor 25Dx67L mm MP 12V with 48 CPR Encoder*. Retrieved from Pololu.com: <https://www.pololu.com/product/4864/specs>
- Pololu. (2020). *47:1 Metal Gearmotor 25Dx67L mm MP 12V with 48 CPR Encoder*. Retrieved from Pololu.com: <https://www.pololu.com/product/4865/specs>
- Popov, E. P. (2000). *Mecánica de Sólidos*. México: Pearson Educación.
- Pytel, A., & Singer, F. (1994). *Resistencia de materiales*. México: Oxford.
- Renteira, A., & Rivas, M. (2000). *Robótica industrial. Fundamentos y aplicaciones*. Madrid: McGraw Hill.
- Saha, S. K. (2010). *Introducción a la robótica*. Mexico: McGraw-Hill.
- Shackelford, J. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson Educación.
- Caraguay, J., y Loja, A. (2011). Brazo robótico controlado por un control Joystick de forma inalámbrica, montado sobre una base móvil. [Tesis de tercer nivel, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/18215>
- Granda, A., y Jiménez, O. (2011). Diseño y construcción de brazo mecánico automatizado para uso didáctico. [Tesis de tercer nivel, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/12451>

López Chávez, V.F. (2016). Diseño y simulación de un brazo manipulador de objetos en zonas de alto riesgo para seres humanos. [Tesis de tercer nivel, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16955>.

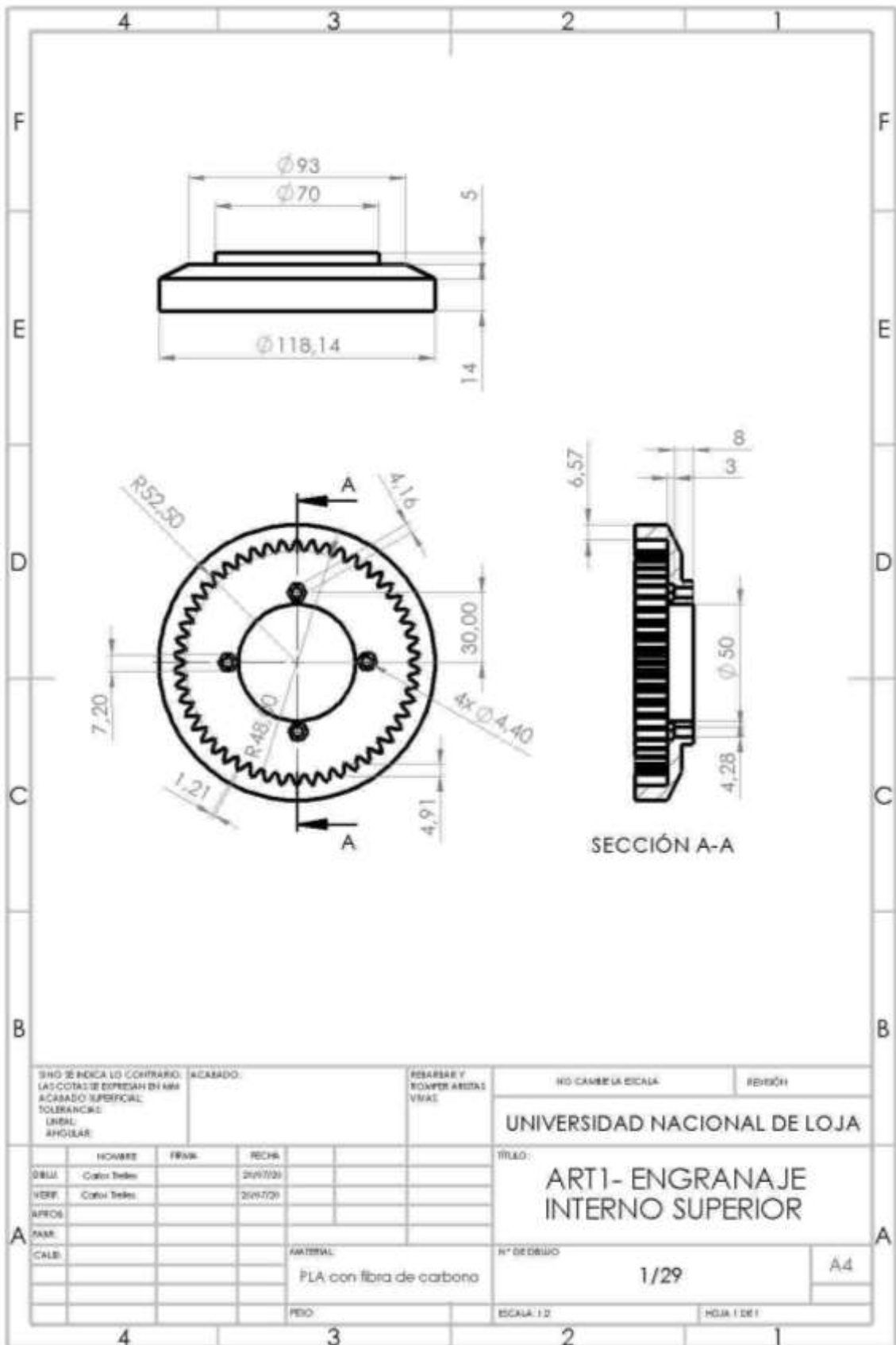
11. ANEXOS

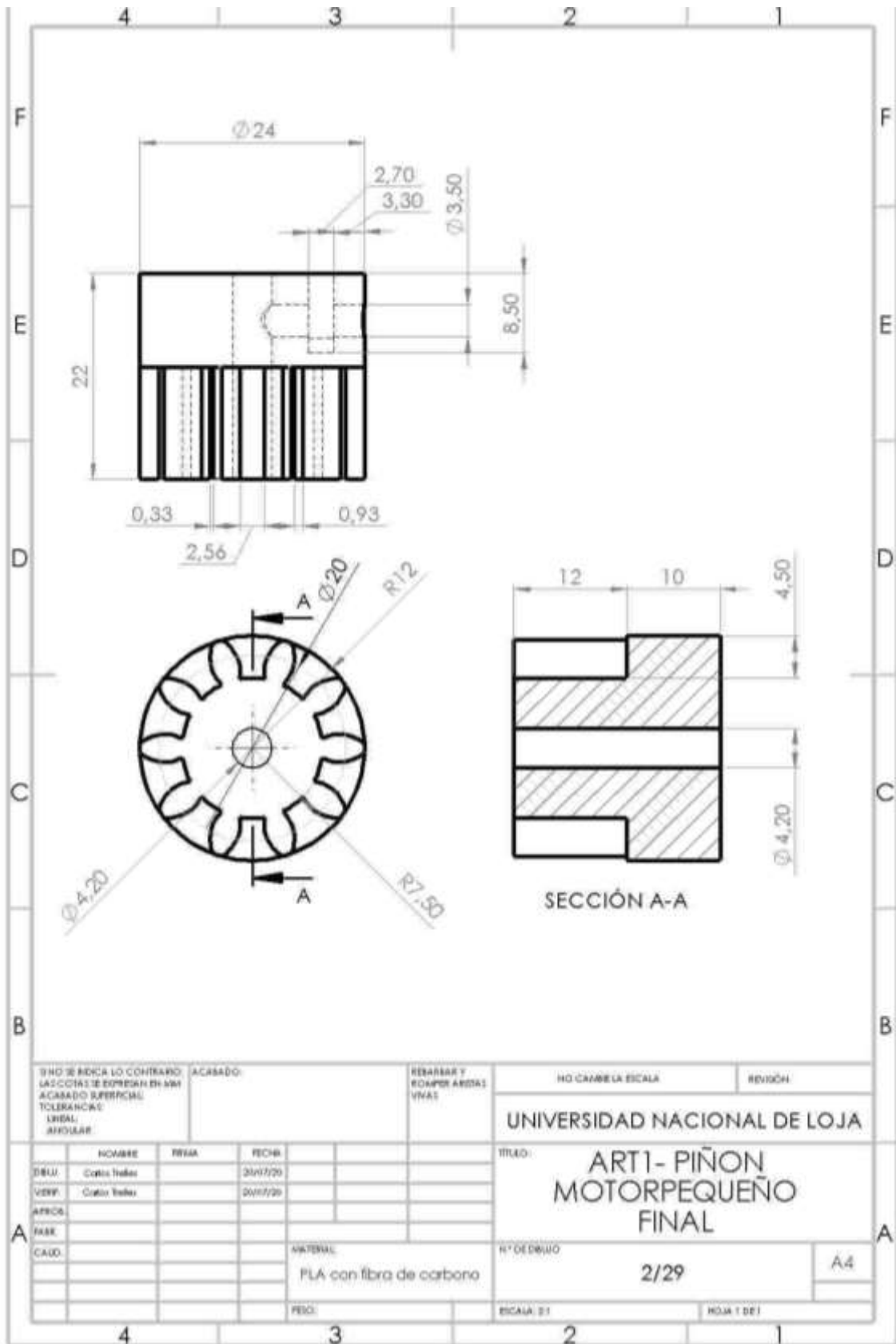
ANEXO 1:

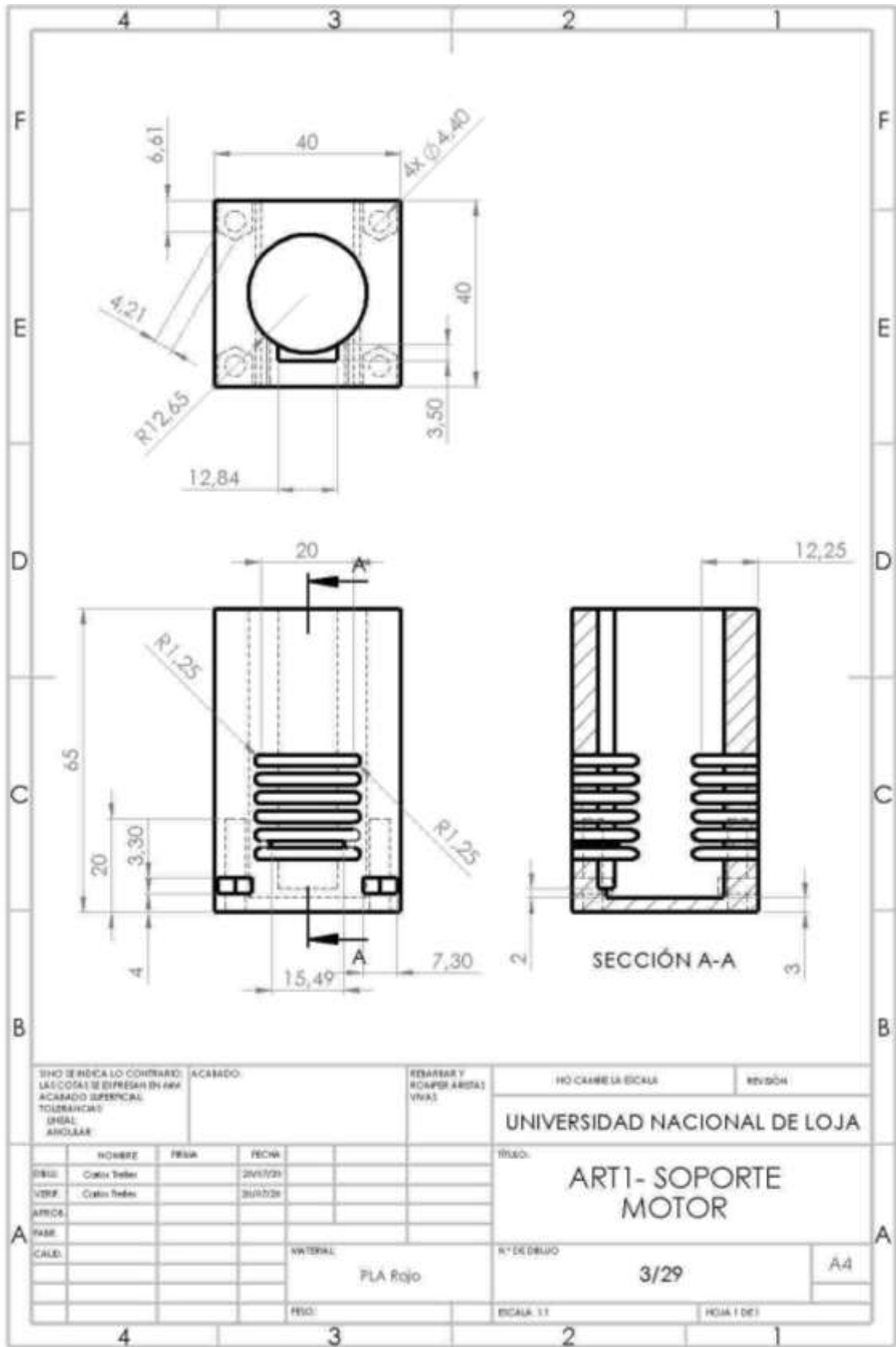
PIEZAS EN FORMATO CAD DEL PROTOTIPO

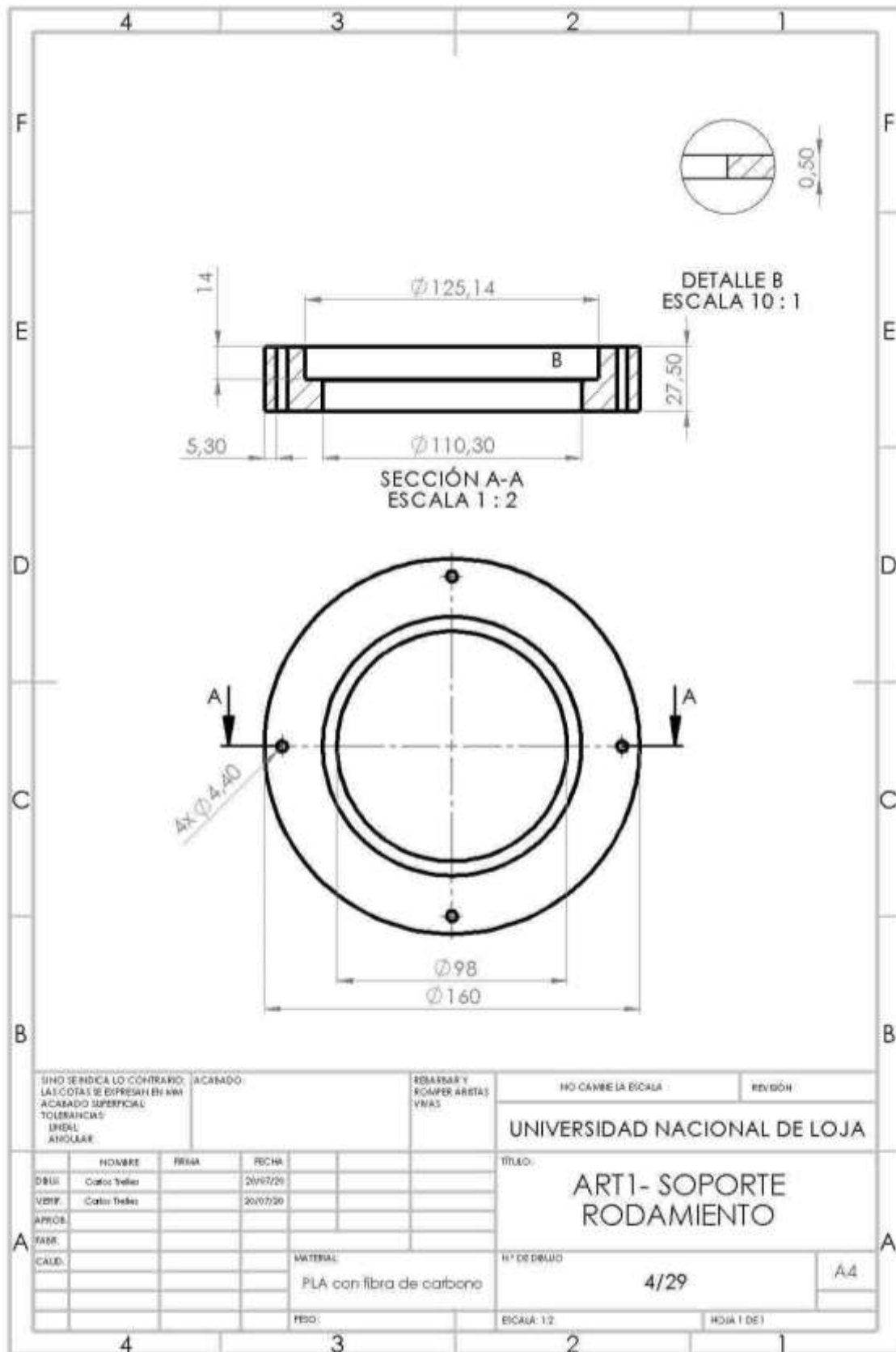
(Archivo digital)

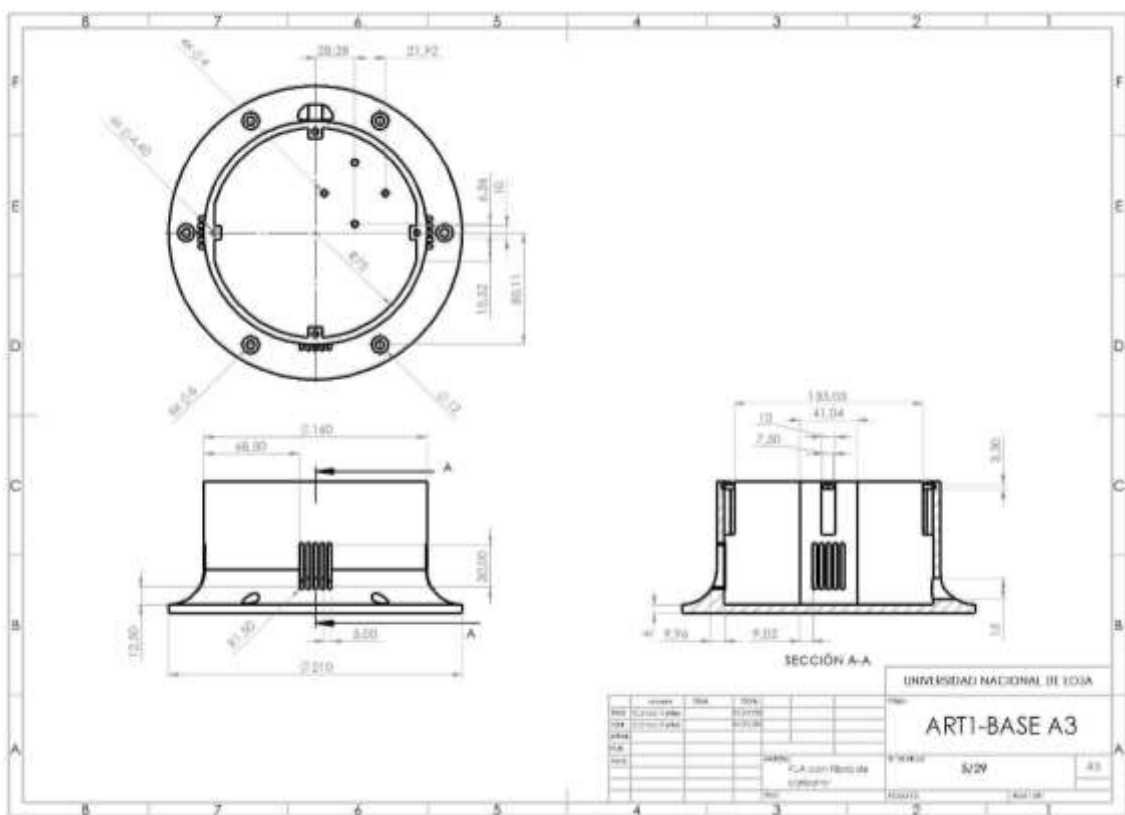
ANEXO 2:
PLANOS DE LAS PIEZAS DEL PROTOTIPO.

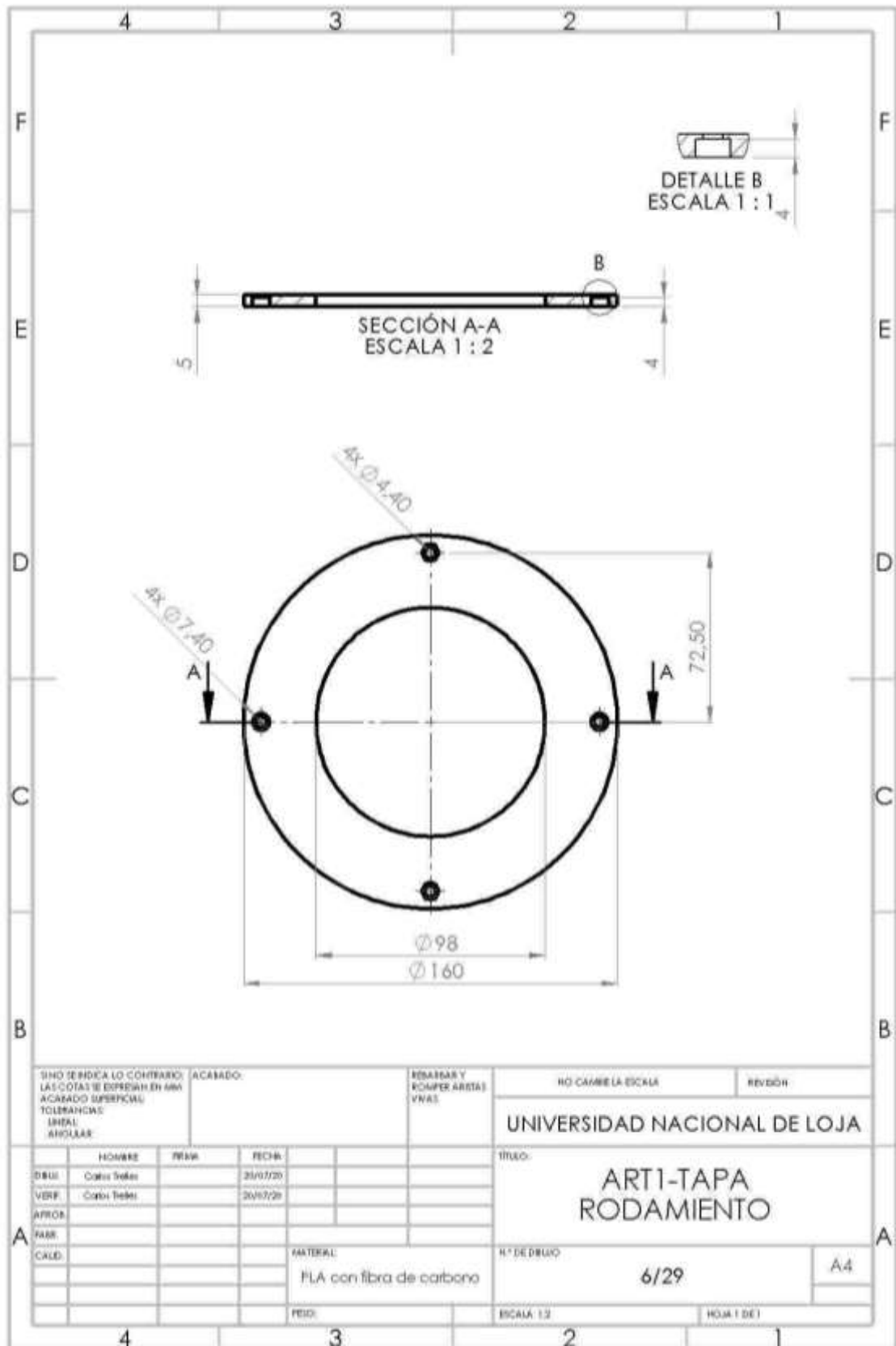


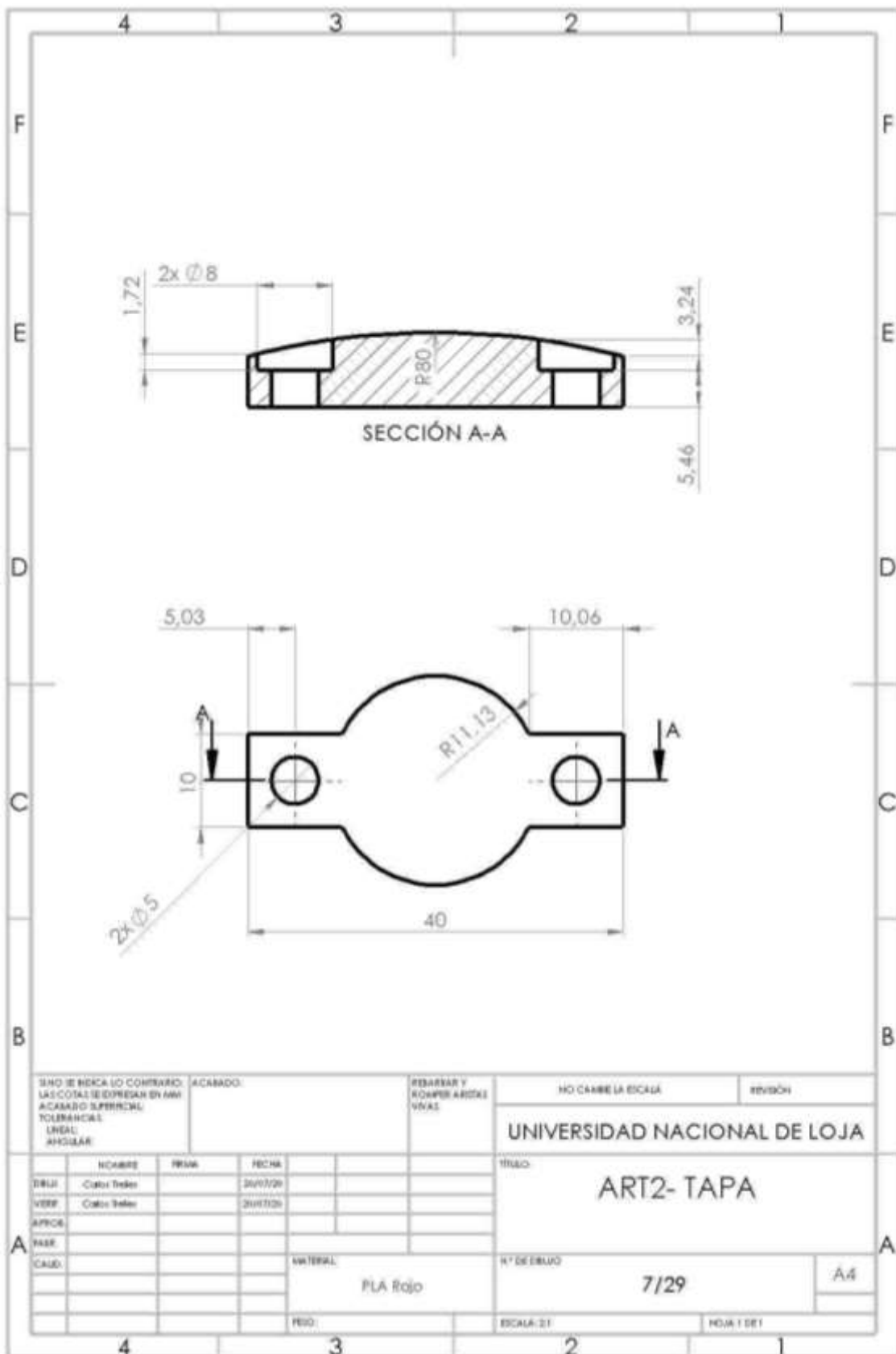


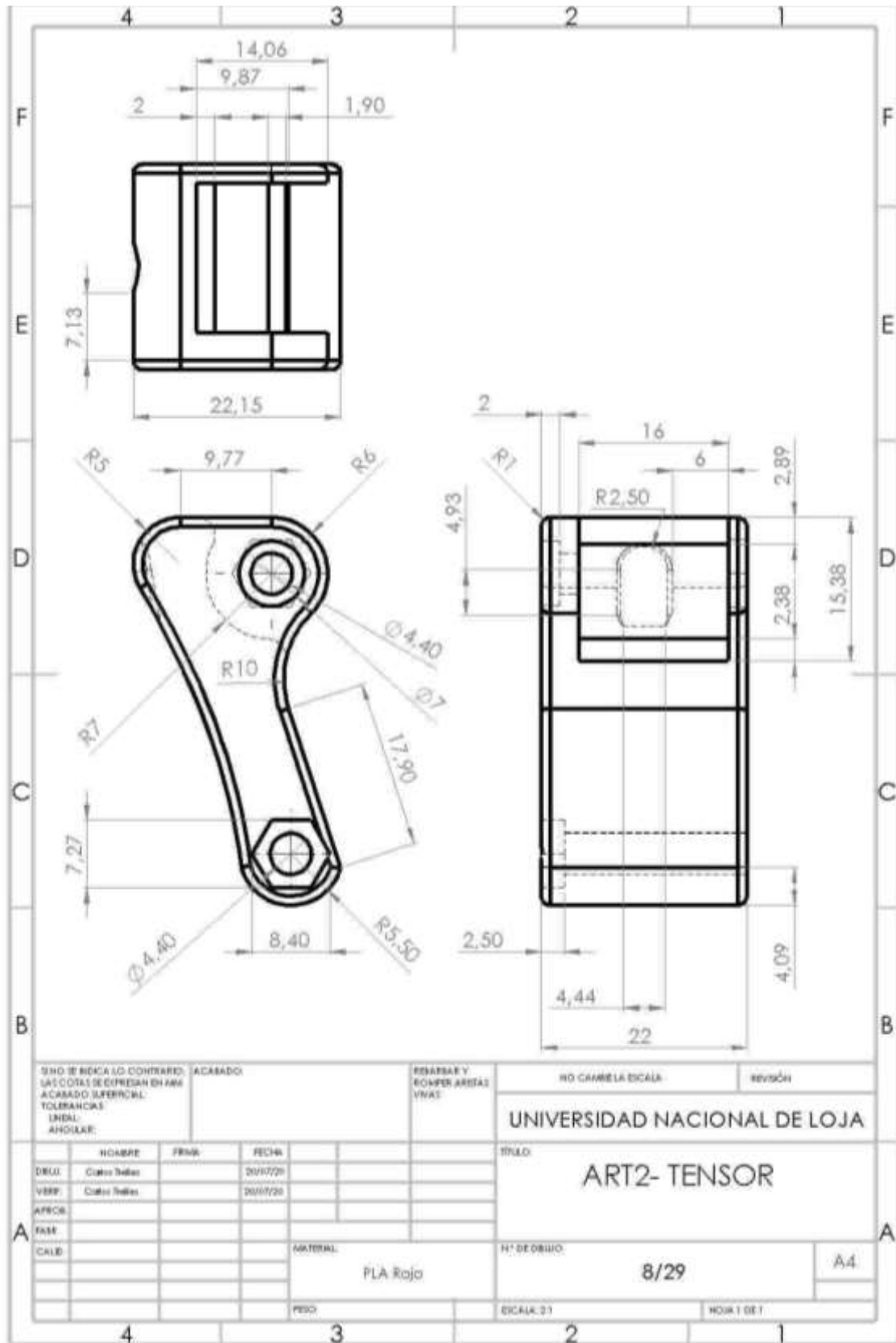


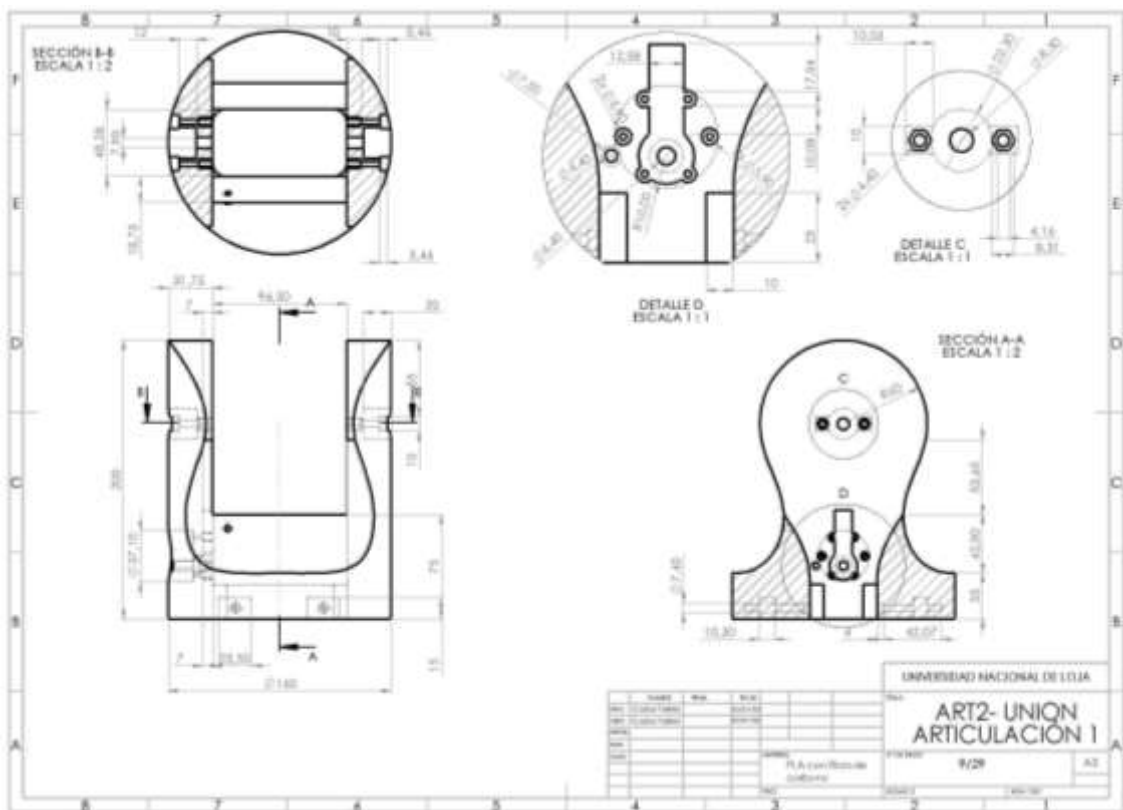


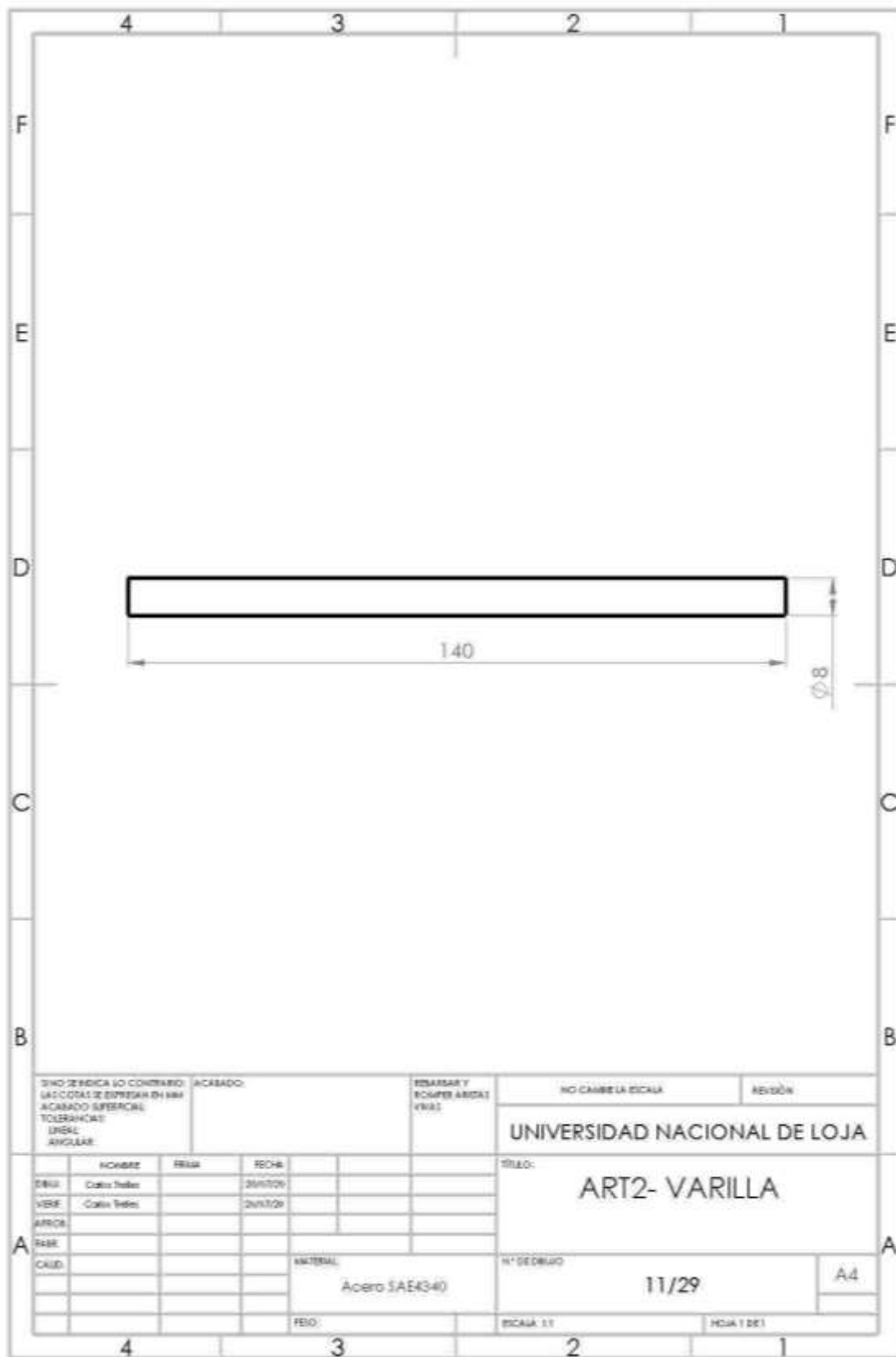




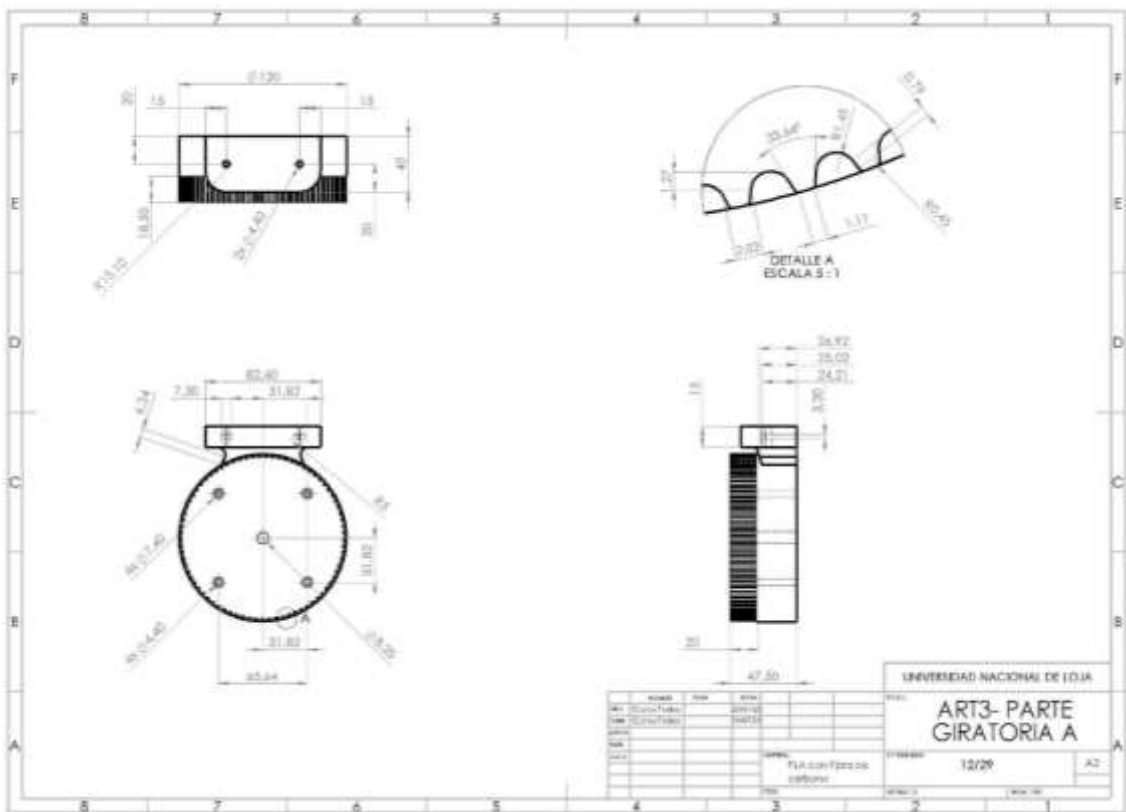


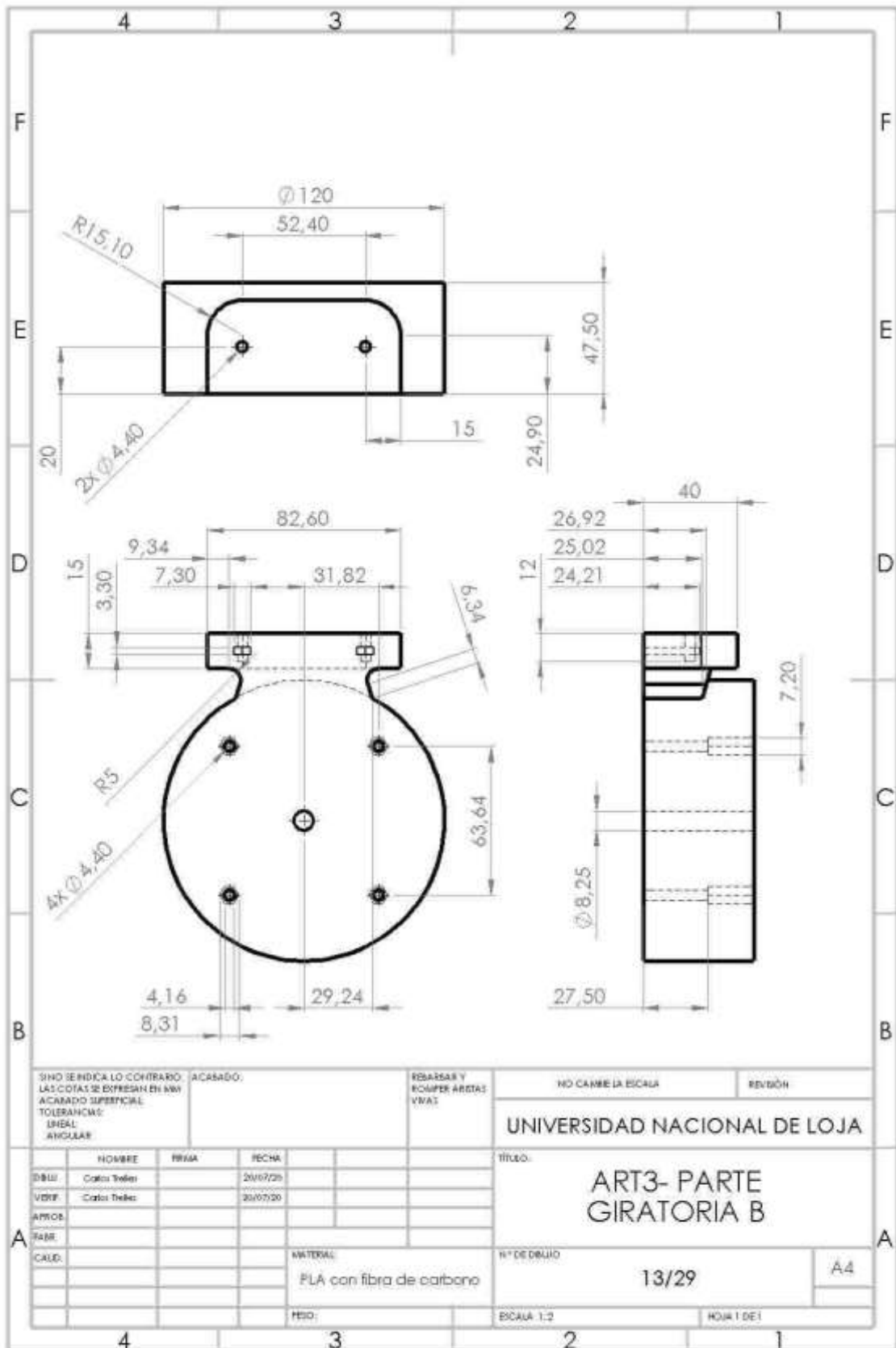






DIBO ZENIFICA LO CONTRARIO		ACABADO:		ESBARSAR Y		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM				COMPARAR COTAS		UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA			
ACABADO SUPERFICIAL				(VER)		TITULO:		ART2- VARILLA	
TOLERANCIAS						NOMBRE:			
LINEAL						FECHA:			
ANGULAR						MATERIAL:		Acero SAE4340	
						N° DE DIBUJO		11/29	
						ESCALA 1:1		A4	
						FEBO:		HOJA 1 DE 1	





SINO SE INDICA LO CONTRARIO, ACABADO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL
 TOLERANCIAS:
 LINEAL
 ANGULAR

REBARBAR Y
 BOMPER ARISTAS
 VIVAS

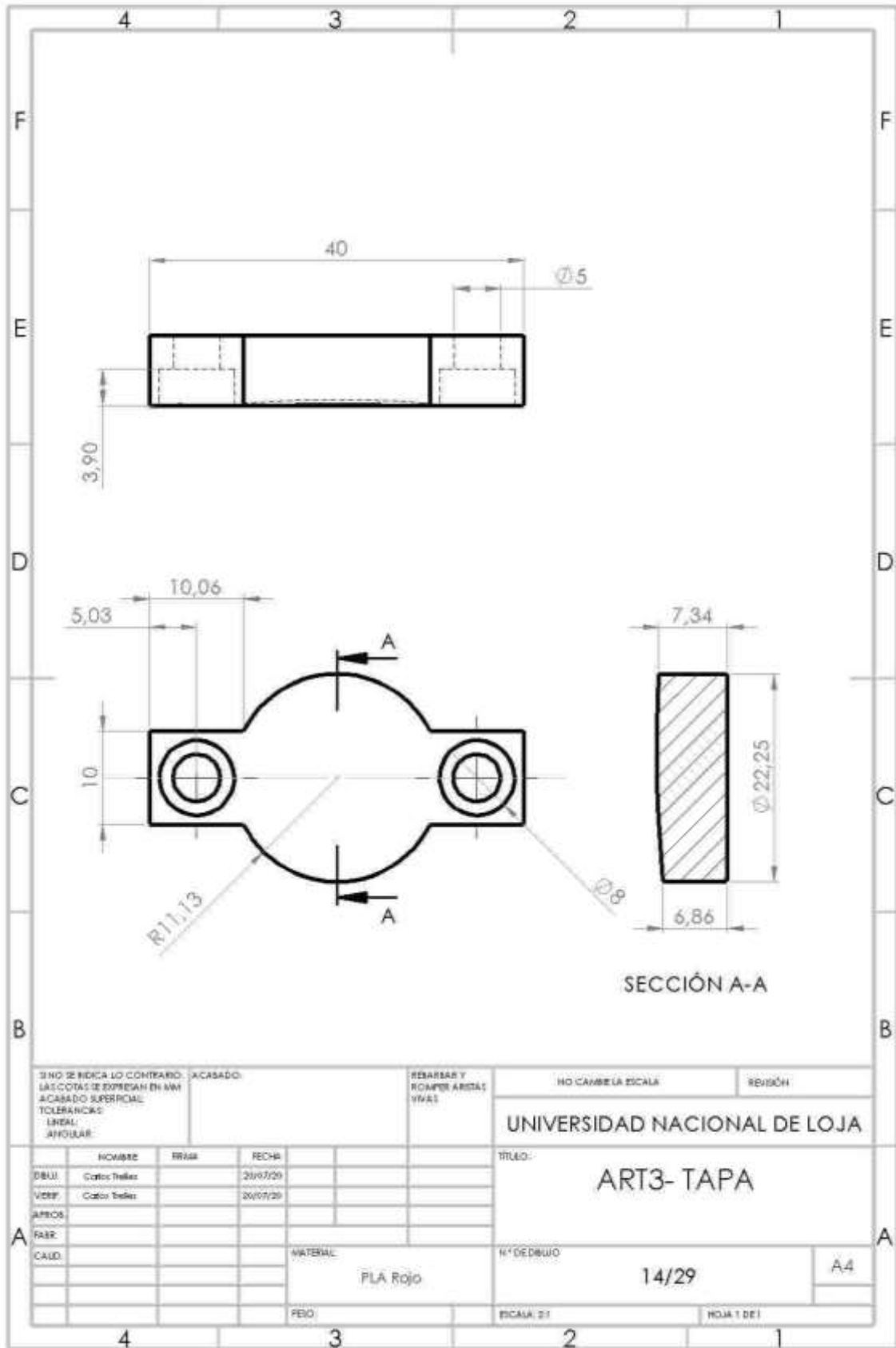
NO CAMBIE LA ESCALA

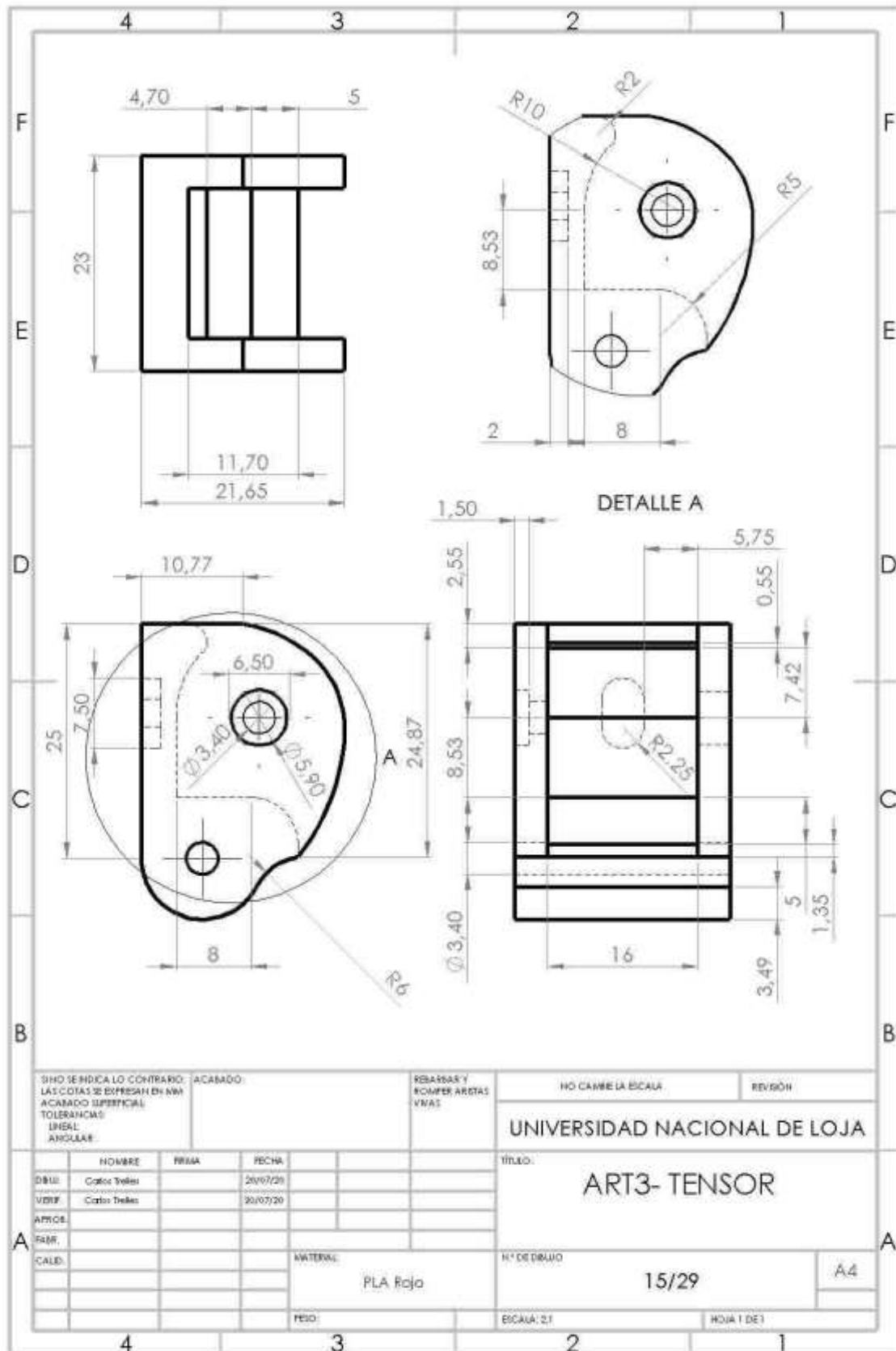
REVISIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

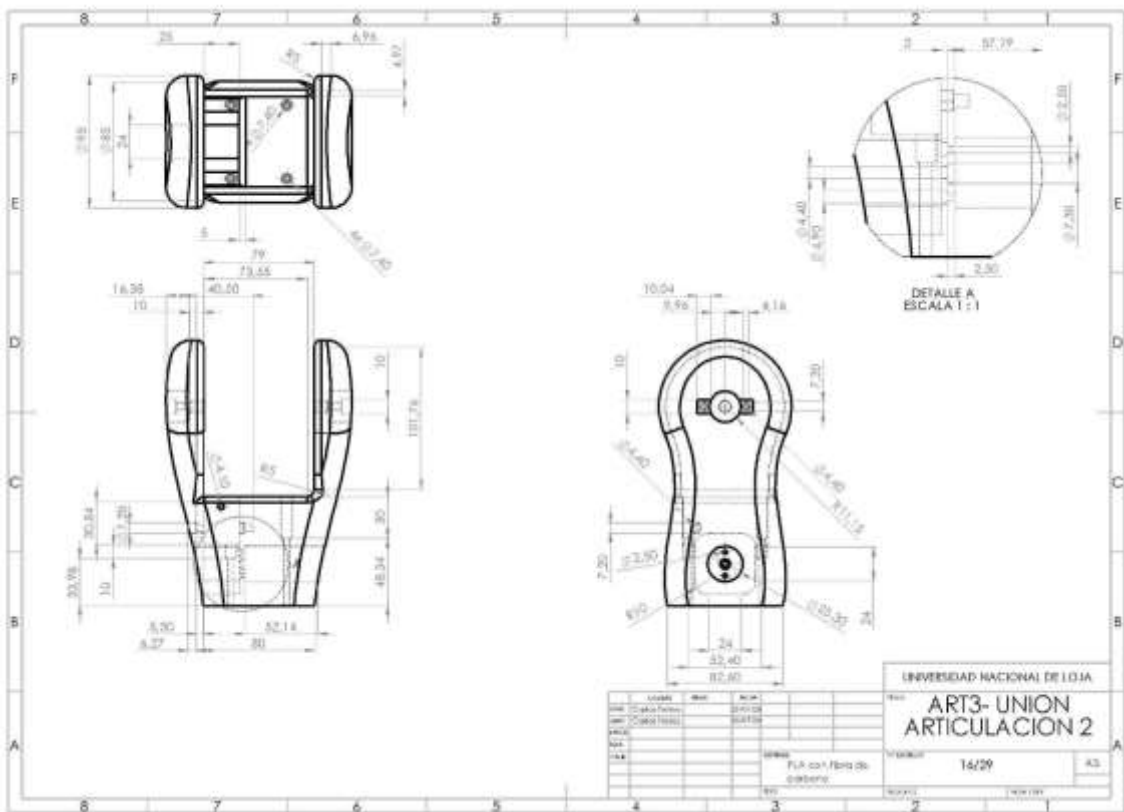
	NOMBRE	PRIMA	FECHA
DISEÑ	Carlos Trujillo		20/07/20
VERIF	Carlos Trujillo		30/07/20
APROB			
FABR			
CAUD			
MATERIAL: PLA con fibra de carbono			
MED:			

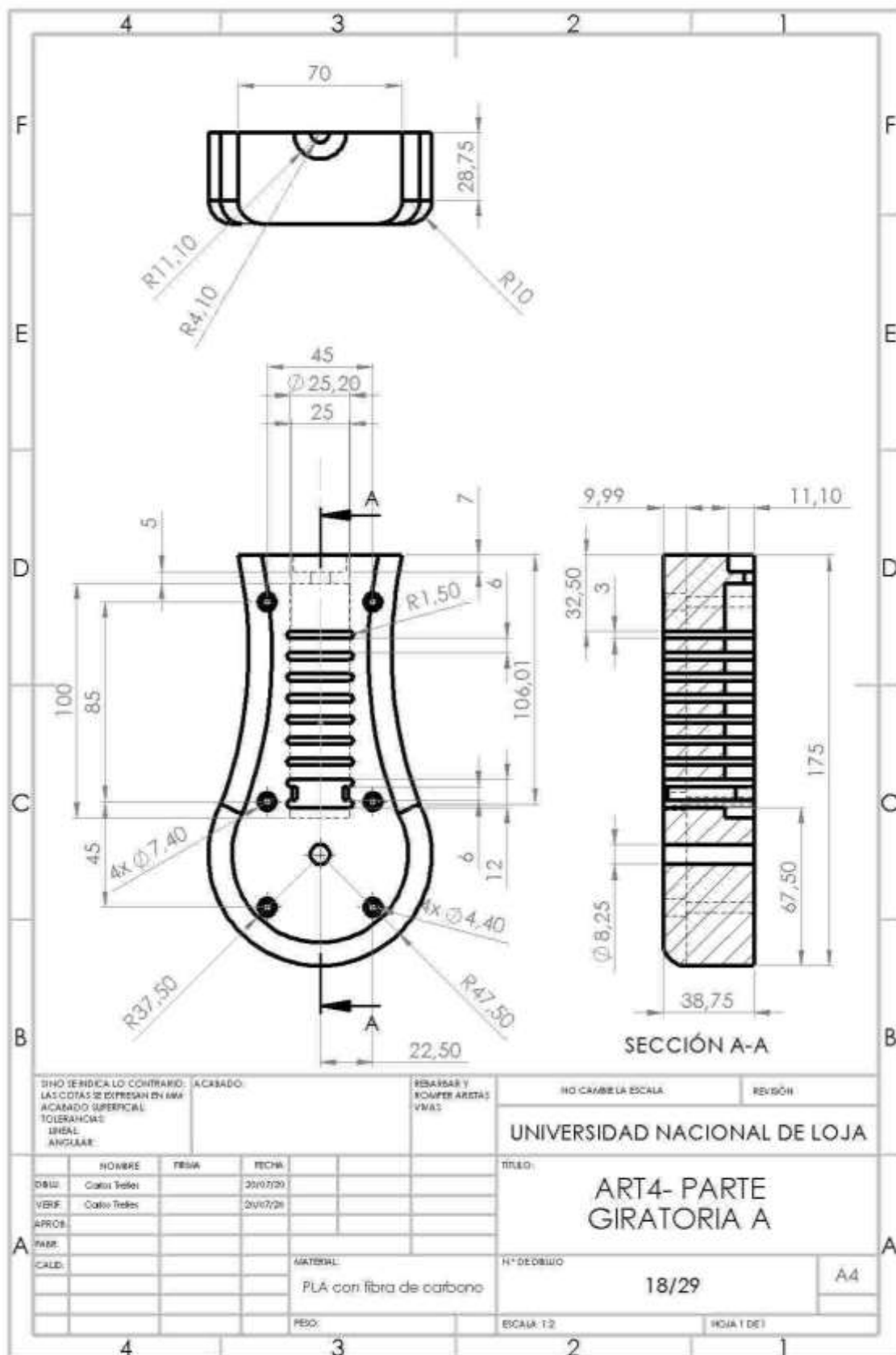
TÍTULO: ART3- PARTE GIRATORIA B	
Nº DE DIBUJO 13/29	A4
ESCALA 1:2	HOJA 1 DE 1

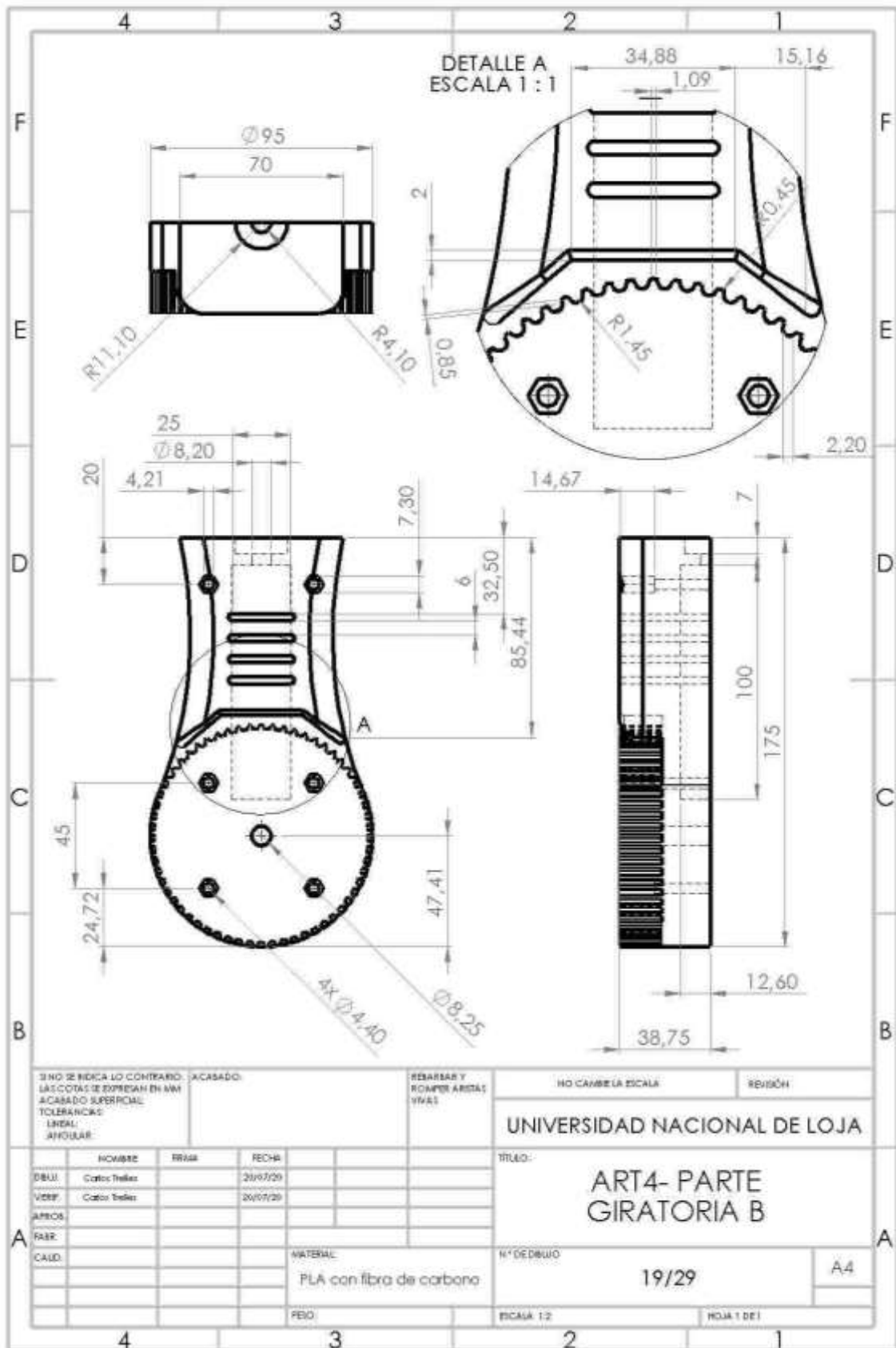


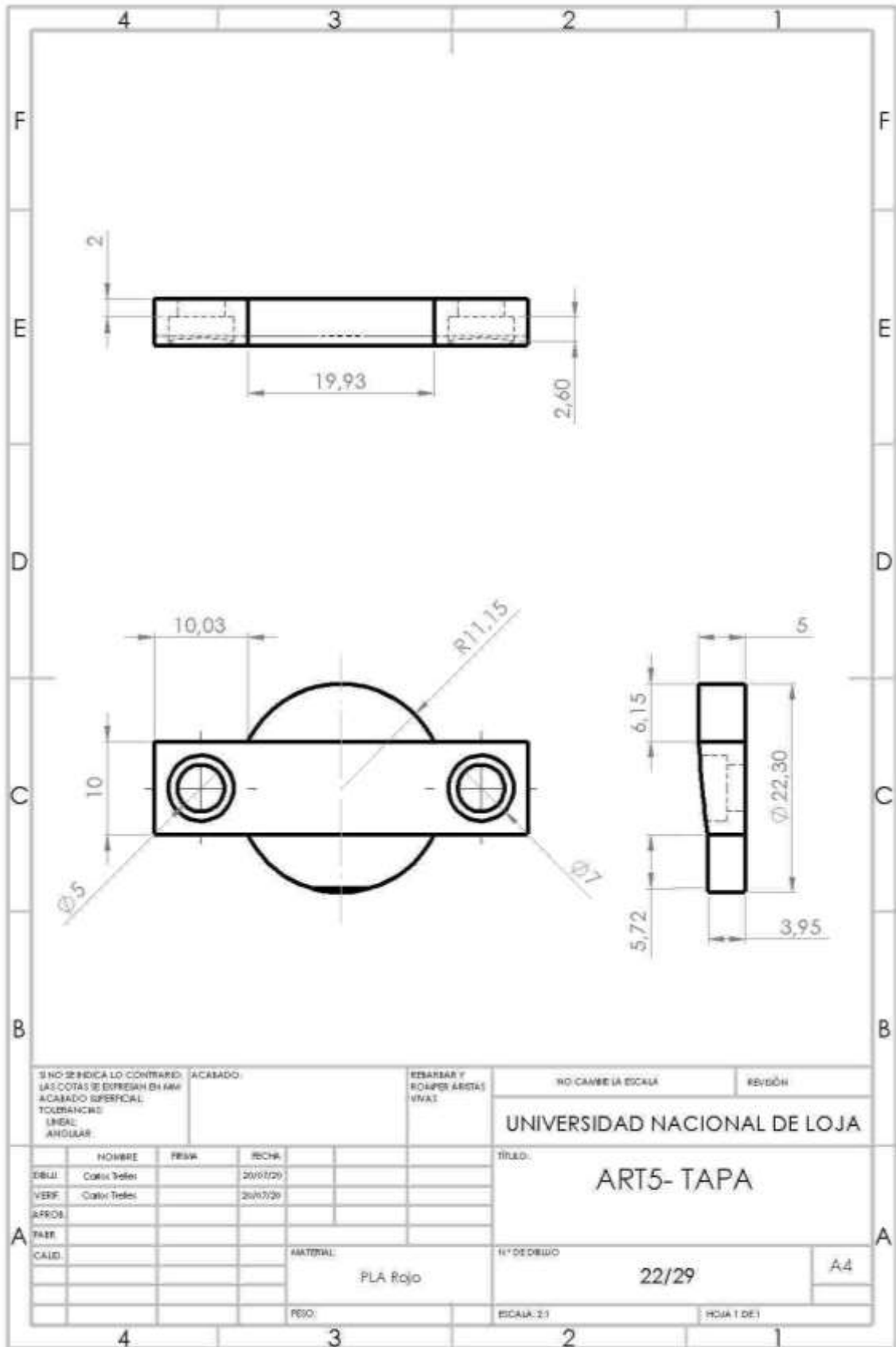


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL TOLERANCIAS LINEAL ANGULAR		ACABADO:		REBARBAS Y ROMPER ARISTAS VNAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA						TÍTULO:			
ART3- TENSOR						Nº DE DIBUJO			
PLA Rojo						15/29		A4	
MATERIAL:						ESCALA: 2:1		HOJA 1 DE 1	
DIBUJ:		NOMBRE:		FECHA:					
VDIV:		FECHA:							
APROB:									
FIRM:									
CALD:									

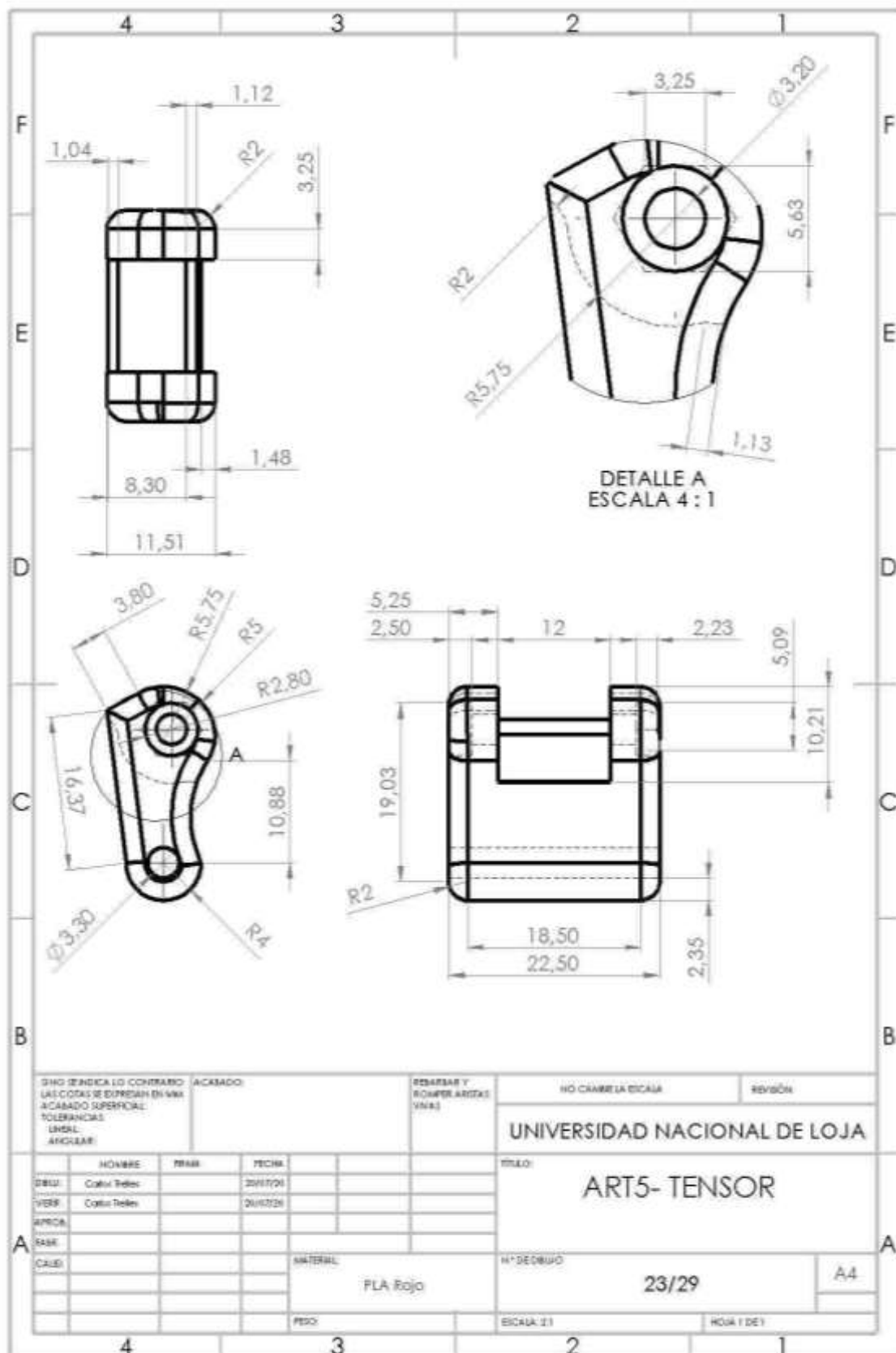


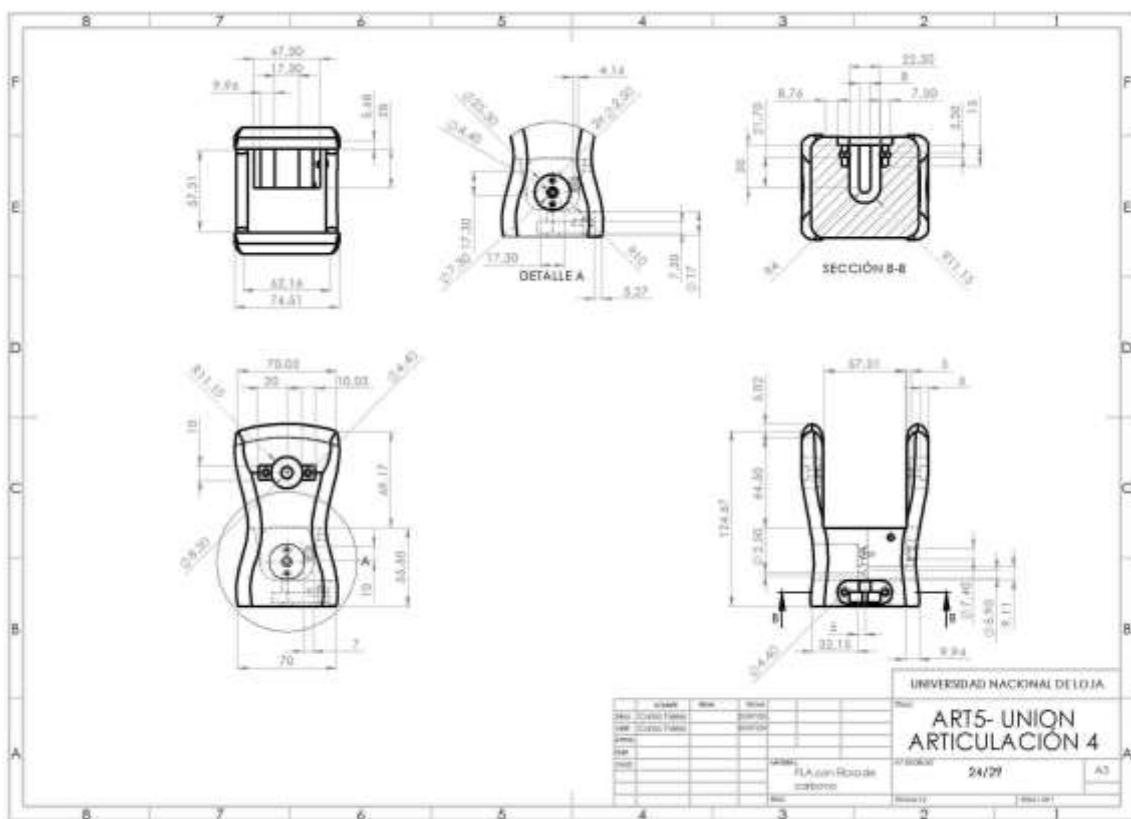


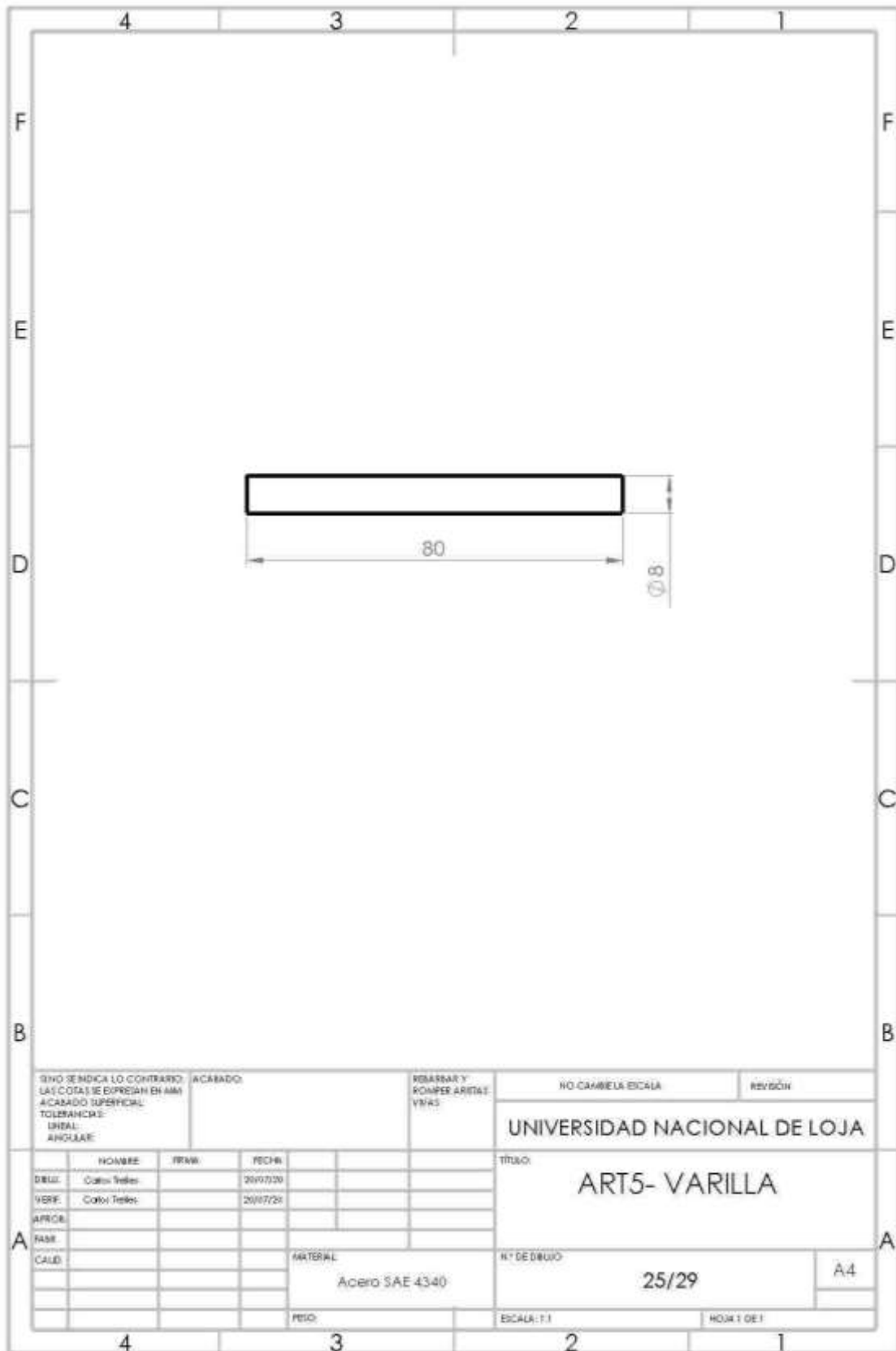


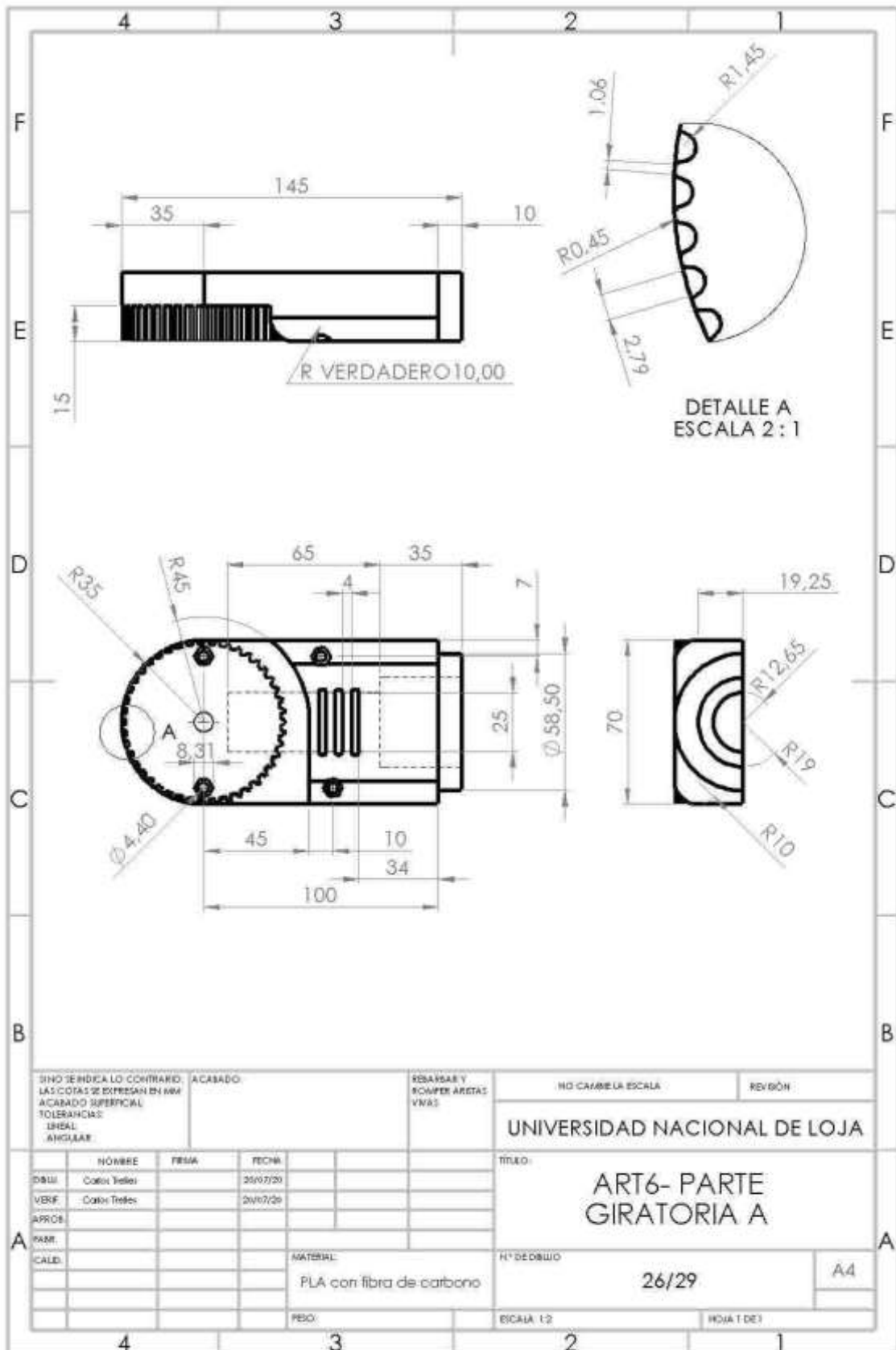


SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO ESPECIAL TOLERANCIAS LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	RESANAR Y ROMPER ARISTAS VNAI	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA				TÍTULO:	
ART5- TAPA				N° DE DIBUJO	
PLA Rojo				22/29	
PESO:				ESCALA: 2:1	
HOJA 1 DE 1				A4	

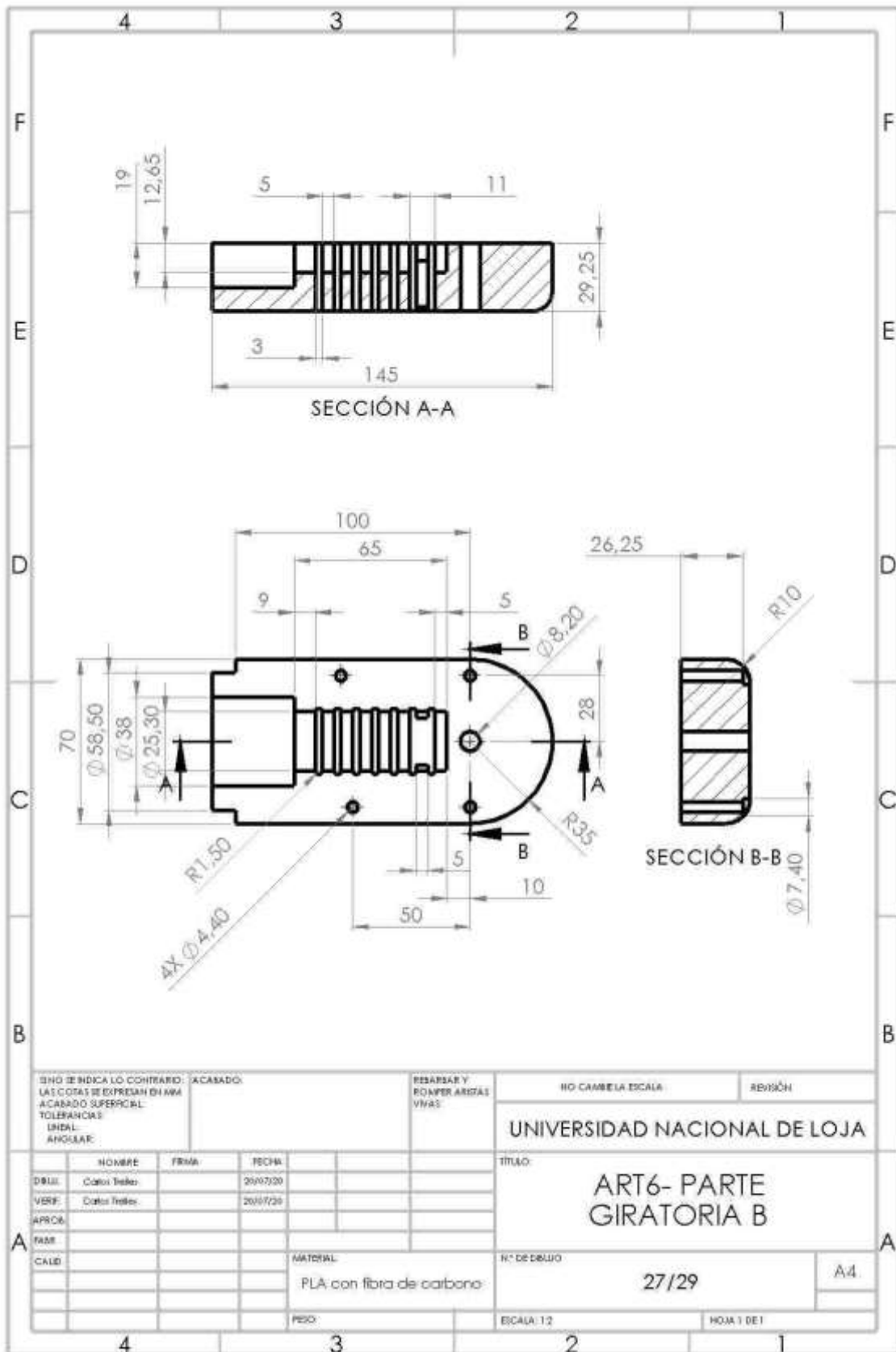


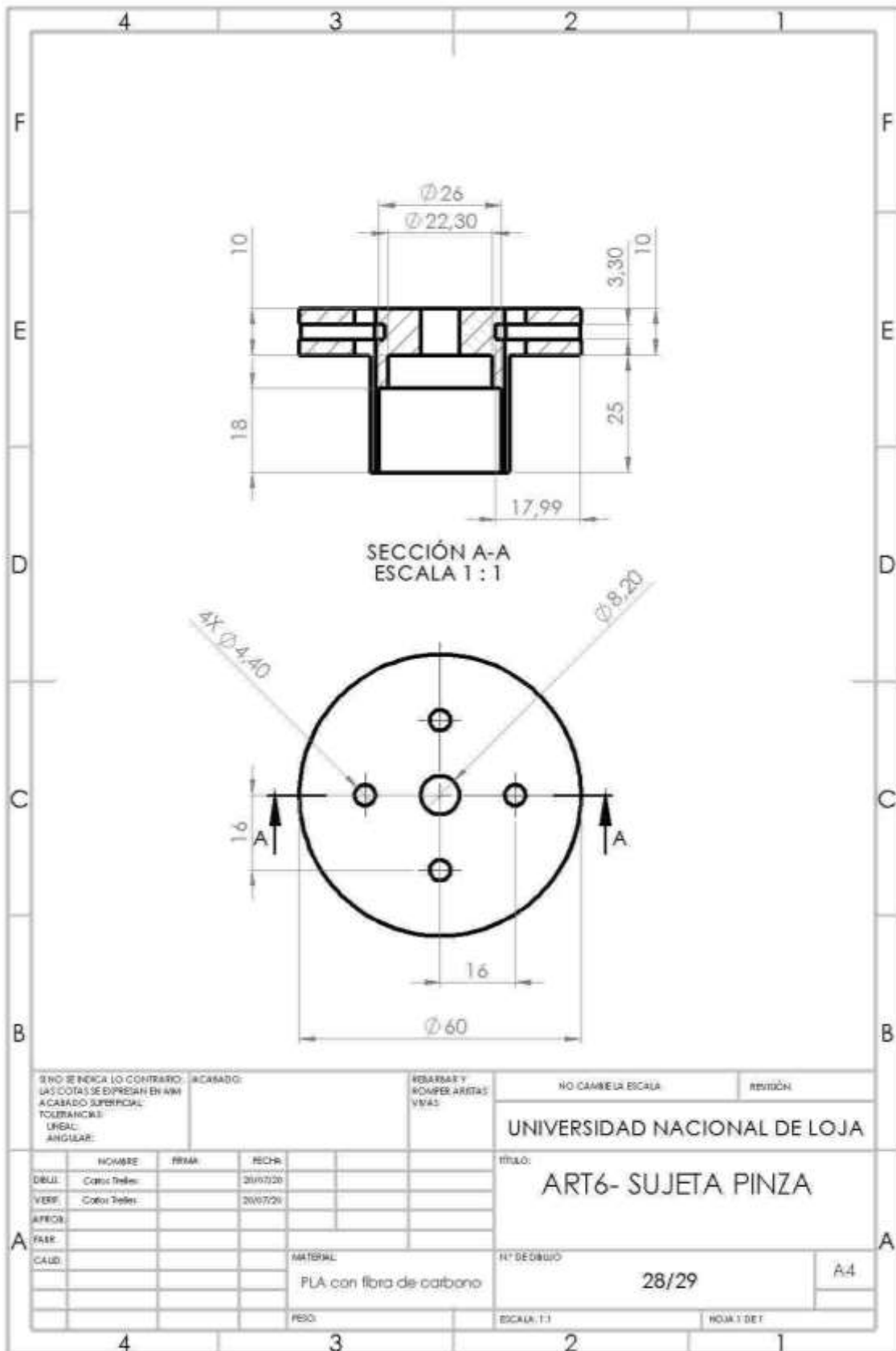


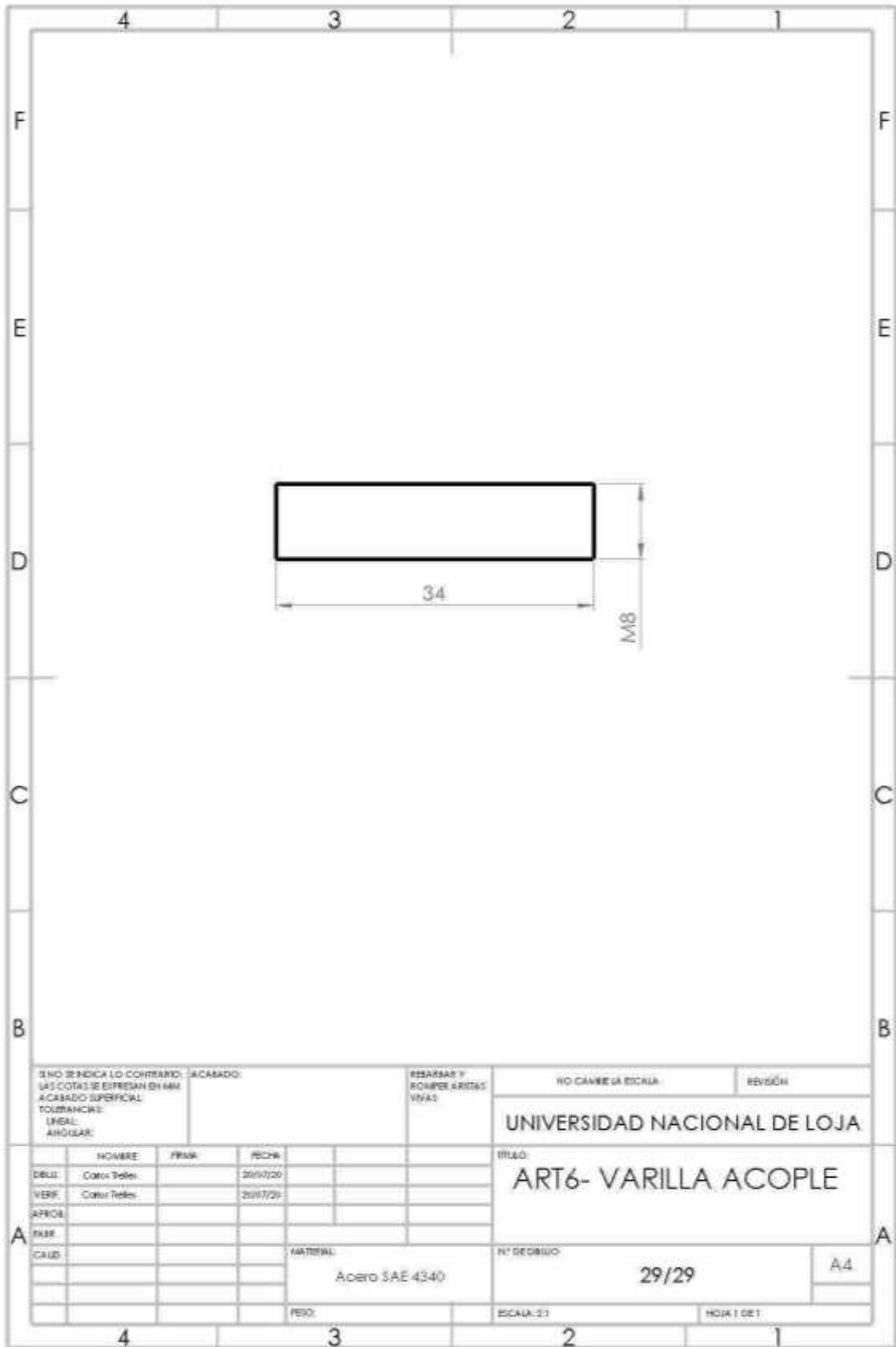




SINO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL TOLERANCIAS: ANGULARES		ACABADO:	REBASAS Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIA LA ESCALA	REVISIÓN
				UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA	
				TÍTULO:	
				ART6- PARTE GIRATORIA A	
				N° DE DIBUJO	
				26/29	
				A4	
				ESCALA 1:2	
				HOJA 1 DE 1	







SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIA: LINEAL: ANGULAR:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																																			
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FRASE</th> <th>FECHA</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DBLU:</td> <td>Coto: Tellei</td> <td></td> <td>20/07/20</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF:</td> <td>Coto: Tellei</td> <td></td> <td>20/07/20</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TRAB:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CAUD:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					NOMBRE	FRASE	FECHA			DBLU:	Coto: Tellei		20/07/20			VERIF:	Coto: Tellei		20/07/20			APROB:						TRAB:						CAUD:						TÍTULO	
	NOMBRE	FRASE	FECHA																																						
DBLU:	Coto: Tellei		20/07/20																																						
VERIF:	Coto: Tellei		20/07/20																																						
APROB:																																									
TRAB:																																									
CAUD:																																									
				ART6- VARILLA ACOPLE																																					
				N° DE DIBUJO																																					
				29/29																																					
				A4																																					
				MATERIAL																																					
				Acero SAE 4340																																					
				ESCALA: 2:1																																					
				HOJA 1 DE 1																																					
				FEBO:																																					

ANEXO 3:
SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO REALIZADA EN
ADAMS VIEW®.
(Archivo digital)

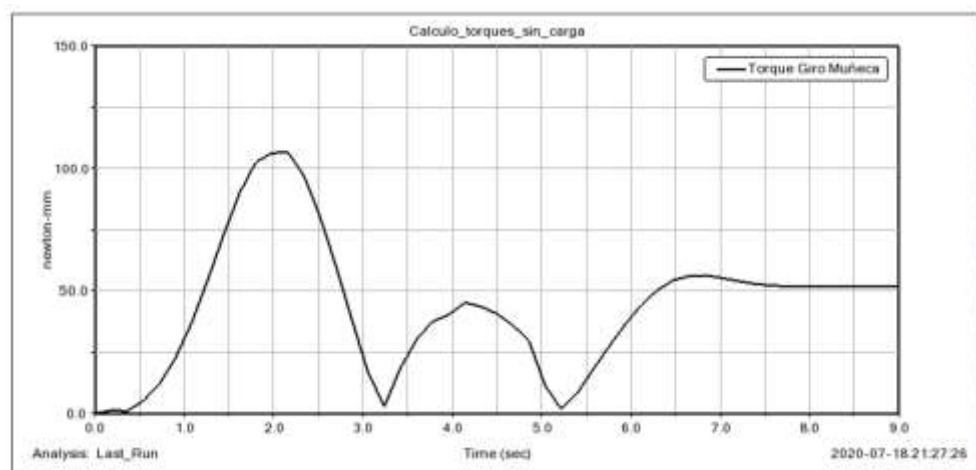
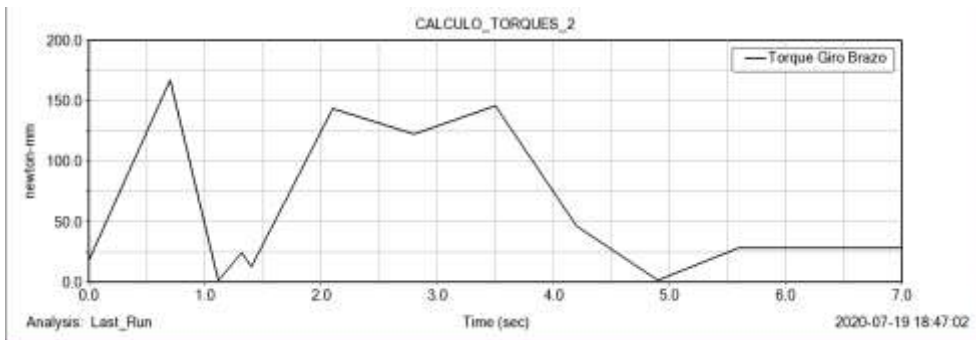
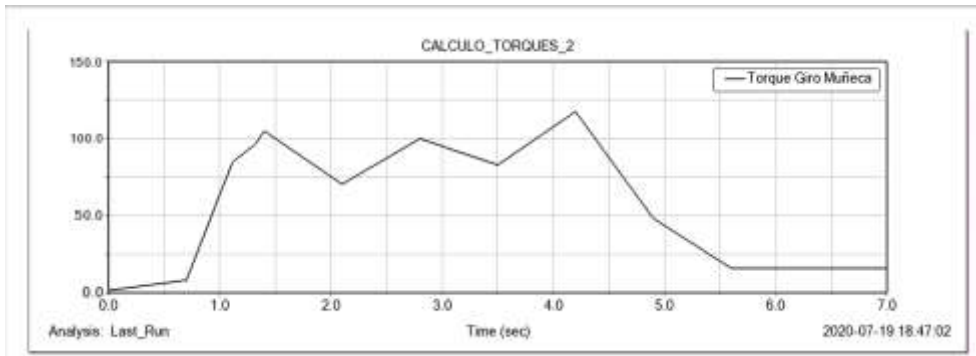
ANEXO 4:
TABLA DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN
ESTÁTICOS Y DINÁMICOS.

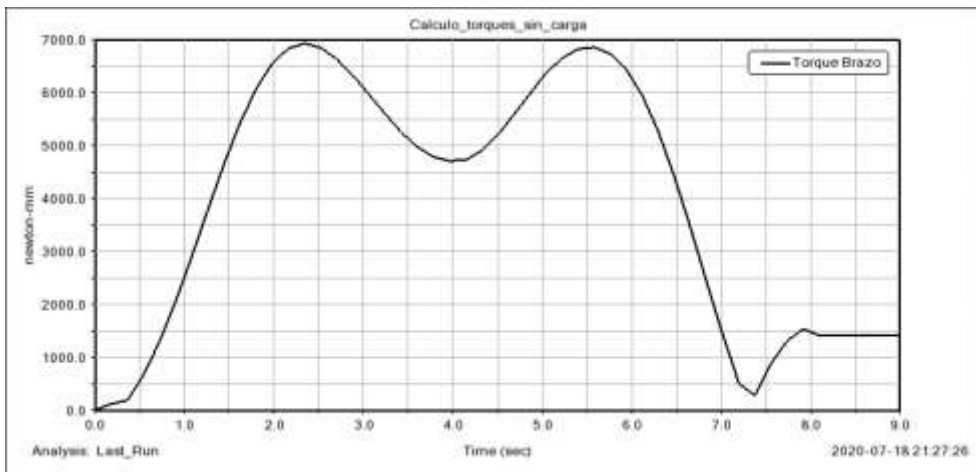
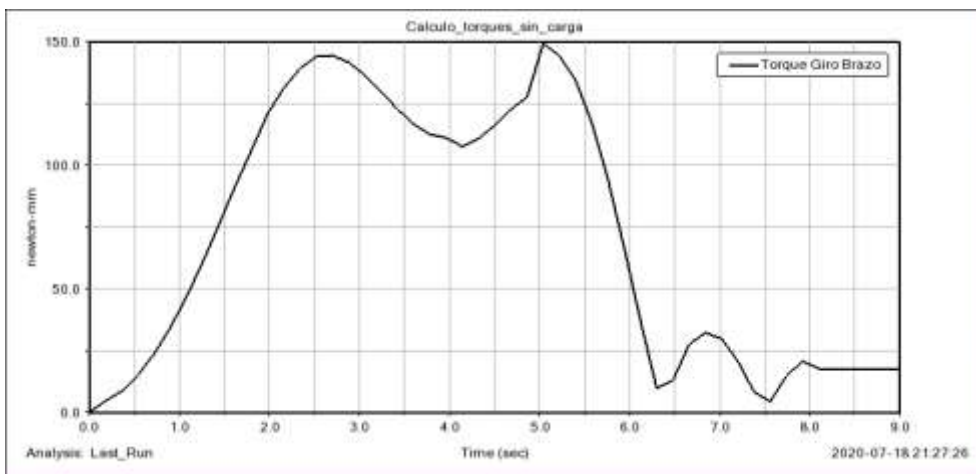
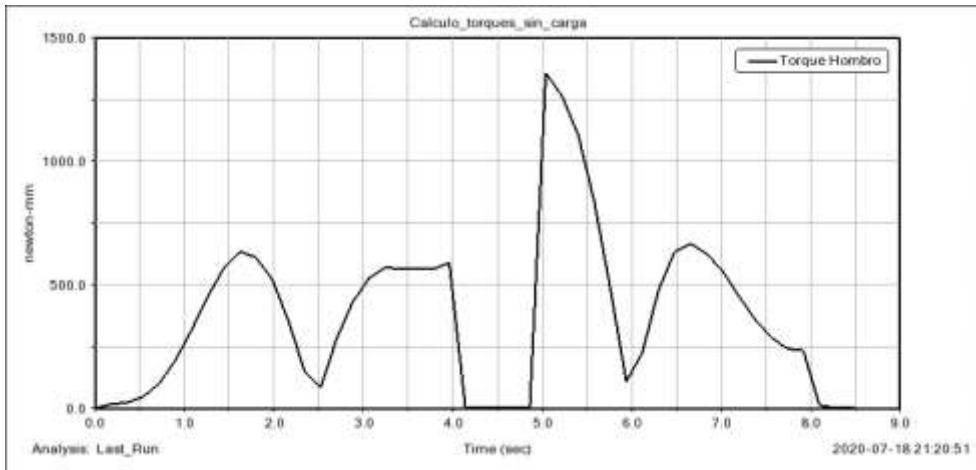
Table 3.2.4 Coefficients of Static and Sliding Friction

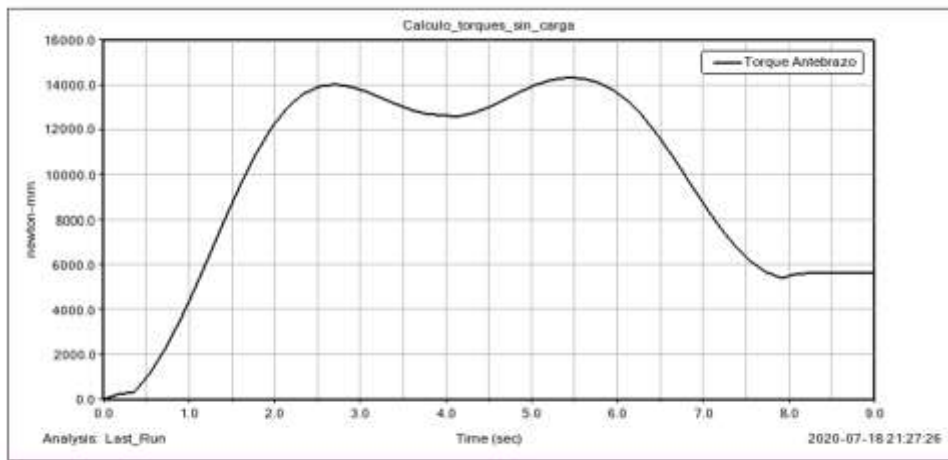
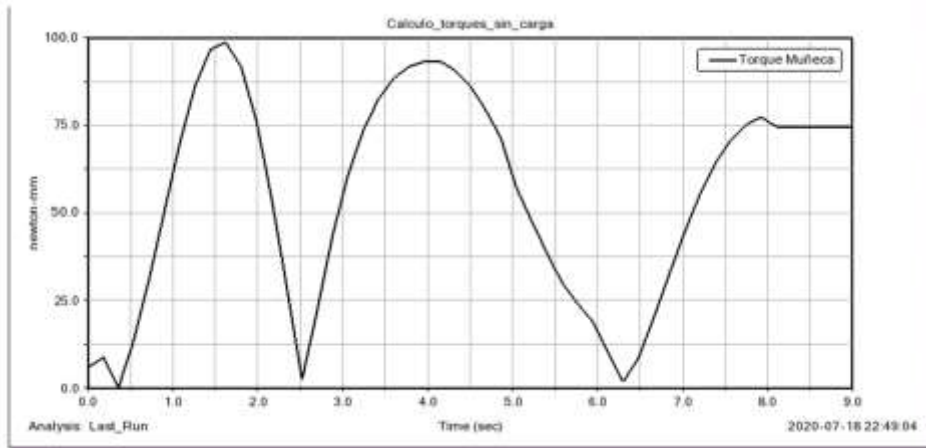
(Reference letters indicate the lubricant used; numbers in parentheses give the sources. See footnote.)

Materials	Static		Sliding	
	Dry	Greasy	Dry	Greasy
Hard steel on hard steel	0.78 (1)	0.11 (1, a) 0.23 (1, b) 0.15 (1, c) 0.11 (1, d) 0.0075 (18, p) 0.0052 (18, h)	0.42 (2)	0.029 (5, h) 0.081 (5, c) 0.080 (5, i) 0.058 (5, j) 0.084 (5, d) 0.105 (5, k) 0.096 (5, l) 0.108 (5, m) 0.12 (5, a)
Mild steel on mild steel	0.74 (19)		0.57 (3)	0.09 (3, a) 0.19 (3, u)
Hard steel on graphite	0.21 (1)	0.09 (1, a)		
Hard steel on babbitt (ASTM No. 1)	0.70 (11)	0.23 (1, b) 0.15 (1, c) 0.08 (1, d) 0.085 (1, e)	0.33 (6)	0.16 (1, b) 0.06 (1, c) 0.11 (1, d)
Hard steel on babbitt (ASTM No. 8)	0.42 (11)	0.17 (1, b) 0.11 (1, c) 0.09 (1, d) 0.08 (1, e)	0.35 (11)	0.14 (1, b) 0.065 (1, c) 0.07 (1, d) 0.08 (11, h)
Hard steel on babbitt (ASTM No. 10)		0.25 (1, b) 0.12 (1, c) 0.10 (1, d) 0.11 (1, e)		0.13 (1, b) 0.06 (1, c) 0.055 (1, d)
Mild steel on cadmium silver				0.097 (2, f)
Mild steel on phosphor bronze			0.34 (3)	0.173 (2, f)
Mild steel on copper lead				0.145 (2, f)
Mild steel on cast iron		0.183 (15, c)	0.23 (6)	0.133 (2, f)
Mild steel on lead	0.95 (11)	0.5 (1, f)	0.95 (11)	0.3 (11, f)
Nickel on mild steel			0.64 (3)	0.178 (3, x)
Aluminum on mild steel	0.61 (8)		0.47 (93)	
Magnesium on mild steel			0.42 (3)	
Magnesium on magnesium	0.6 (22)	0.08 (22, y)		
Teflon on Teflon	0.04 (22)			0.04 (22, f)
Teflon on steel	0.04 (22)			0.04 (22, f)
Tungsten carbide on tungsten carbide	0.2 (22)	0.12 (22, a)		
Tungsten carbide on steel	0.5 (22)	0.08 (22, a)		
Tungsten carbide on copper	0.35 (23)			
Tungsten carbide on iron	0.8 (23)			
Bonded carbide on copper	0.35 (23)			
Bonded carbide on iron	0.8 (23)			
Cadmium on mild steel			0.46 (3)	
Copper on mild steel	0.53 (8)		0.36 (3)	0.18 (17, a)
Nickel on nickel	1.10 (16)		0.53 (3)	0.12 (3, w)
Brass on mild steel	0.51 (8)		0.44 (6)	
Brass on cast iron			0.30 (6)	
Zinc on cast iron	0.85 (16)		0.21 (7)	
Magnesium on cast iron			0.25 (7)	
Copper on cast iron	1.05 (16)		0.29 (7)	
Tin on cast iron			0.32 (7)	
Lead on cast iron			0.43 (7)	
Aluminum on aluminum	1.05 (16)		1.4 (3)	
Glass on glass	0.94 (8)	0.01 (10, p) 0.005 (10, q)	0.40 (3)	0.09 (3, a) 0.116 (3, v)
Carbon on glass			0.18 (3)	
Garnet on mild steel			0.39 (3)	
Glass on nickel	0.78 (8)		0.56 (3)	

ANEXO 5:
DIFERENTES SIMULACIONES REALIZADAS EN
EL PROGRAMA ADAMSVIEW®.





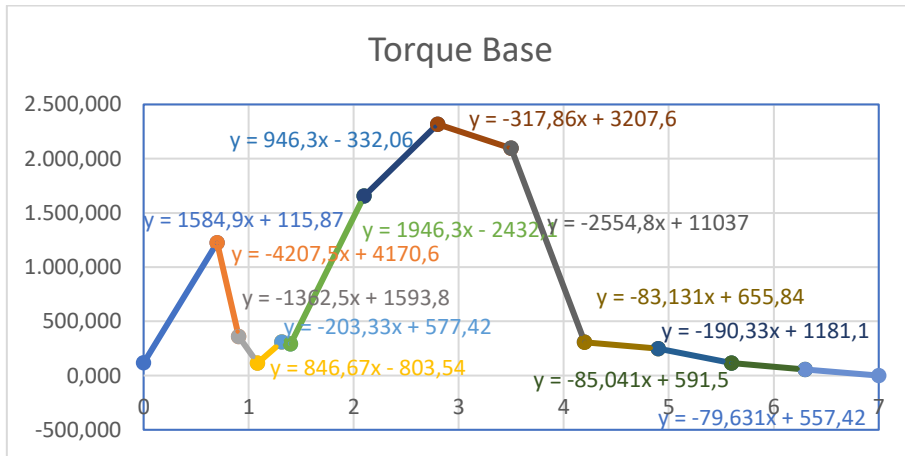
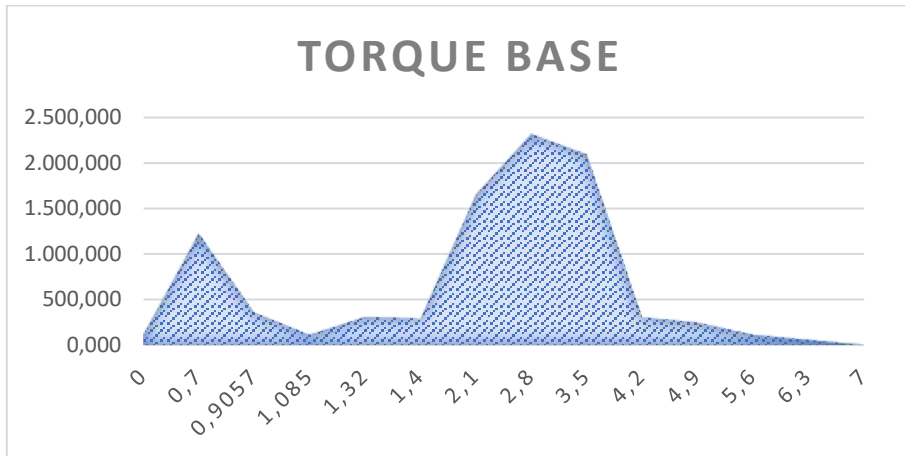


ANEXO 6:

PUNTO MEDIO DEL TORQUE DEL

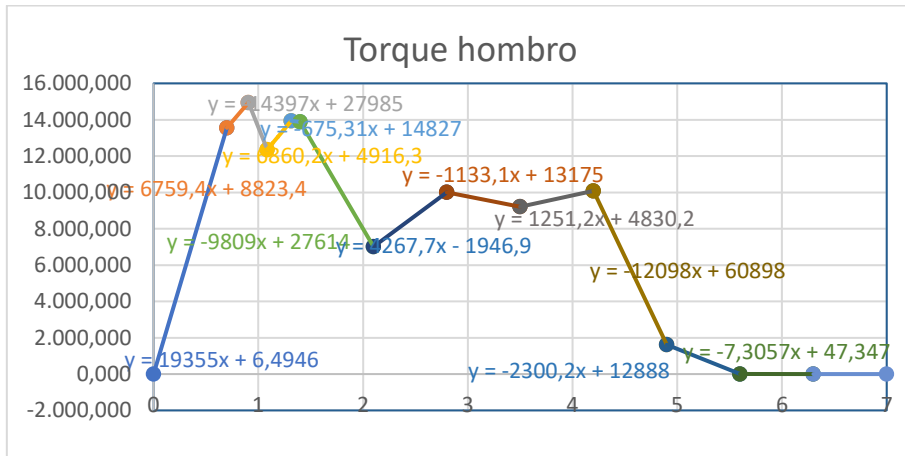
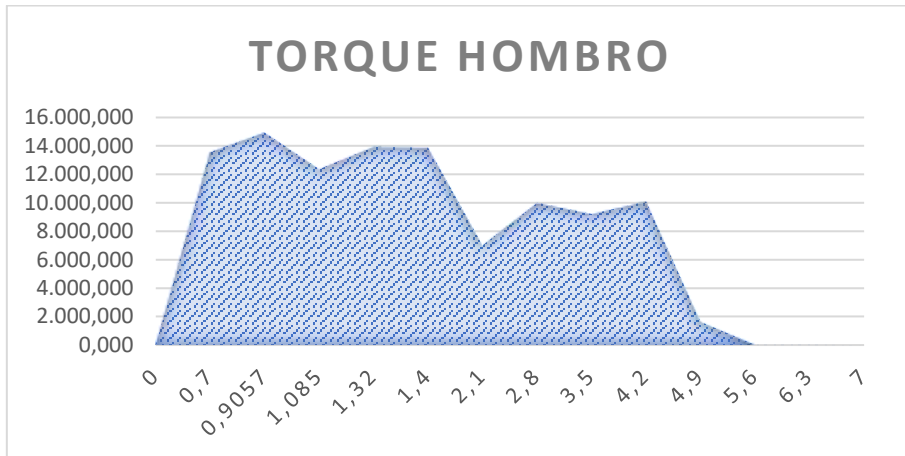
MOVIMIENTO DE LAS ARTICULACIONES.

Punto medio de la base



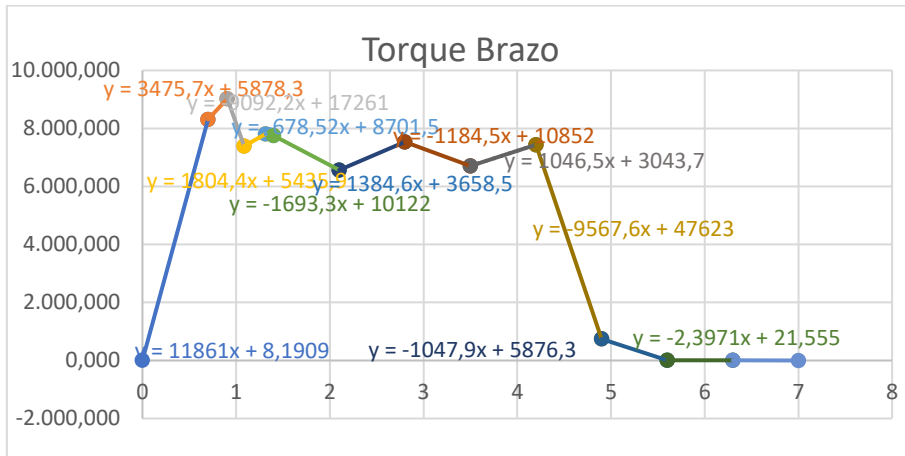
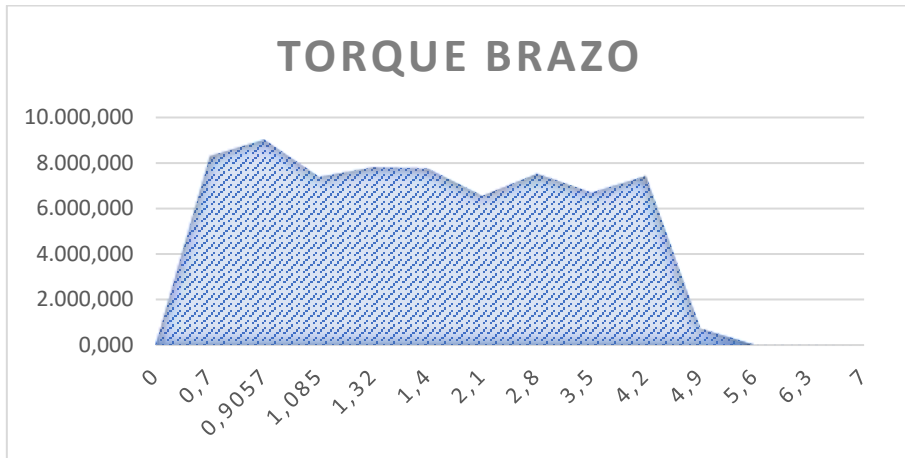
TIEMPO (S)	TORQUE(Nmm)	INTEGRAL
0	115,867	469,4137
0,7	1.225,315	163,0325
0,9057	359,833	42,64031
1,085	115,268	48,90617
1,32	310,003	25,55719
1,4	292,761	681,7755
2,1	1.655,169	1390,462
2,8	2.317,579	1544,43
3,5	2.095,077	840,6188
4,2	306,691	194,3165
4,9	248,499	127,3195
5,6	115,271	59,85455
6,3	55,742	19,5097
7	0,000	-
Punto medio (Nmm)		801,1194

Punto Medio del Hombro.



TIEMPO (S)	TORQUE(Nmm)	INTEGRAL
0	6,495	4746,48776
0,7	13.554,899	2931,245189
0,9057	14.945,297	2450,737948
1,085	12.360,975	3024,476138
1,32	13.938,817	1179,583616
1,4	13.881,551	7313,88518
2,1	7.015,264	5956,26745
2,8	10.002,643	6724,24312
3,5	9.209,480	6753,188085
4,2	10.085,343	4095,6818
4,9	1.616,605	568,064
5,6	6,435	2,7146
6,3	1,321	0,46235
7	0,000	-
Punto medio (Nmm)		6535,291034

Punto Medio del Brazo.

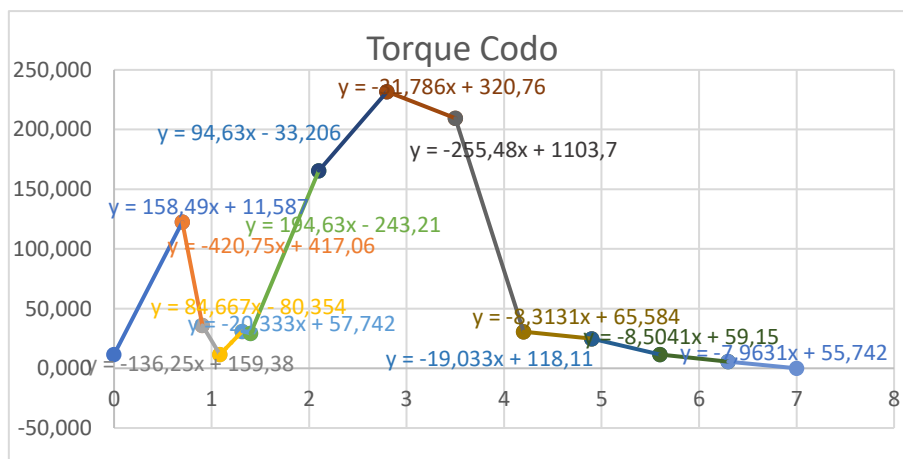
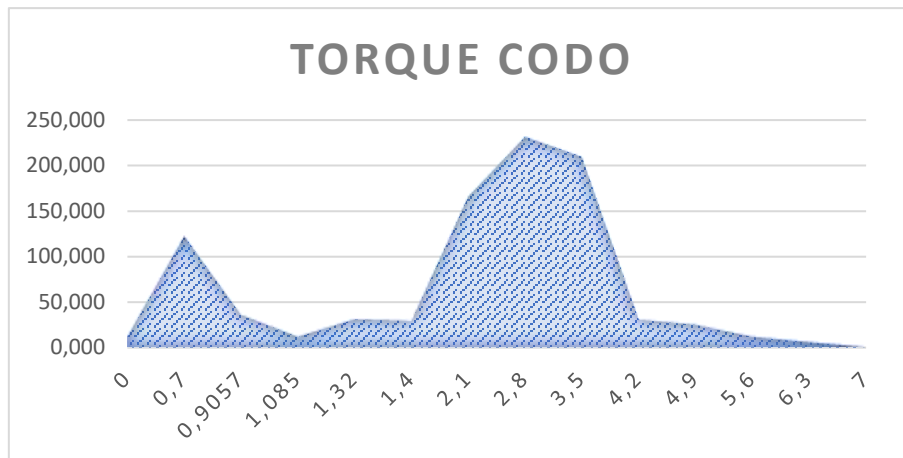


TIEMPO (s)	TORQUE(Nmm)	INTEGRAL
0	8,191	2911,79763
0,7	8.311,231	1783,152156
0,9057	9.026,175	1473,72127
1,085	7.394,118	1748,374682
1,32	7.809,140	659,7754311
1,4	7.751,601	5011,259365
2,1	6.566,283	4935,63399
2,8	7.535,529	4984,679525
3,5	6.706,413	4950,87922
4,2	7.438,957	2863,21154
4,9	741,648	262,42272
5,6	8,131	5,10461
6,3	6,453	2,258655
7	0,000	-

Punto medio (Nmm)

4513,181542

Punto Medio del Codo.

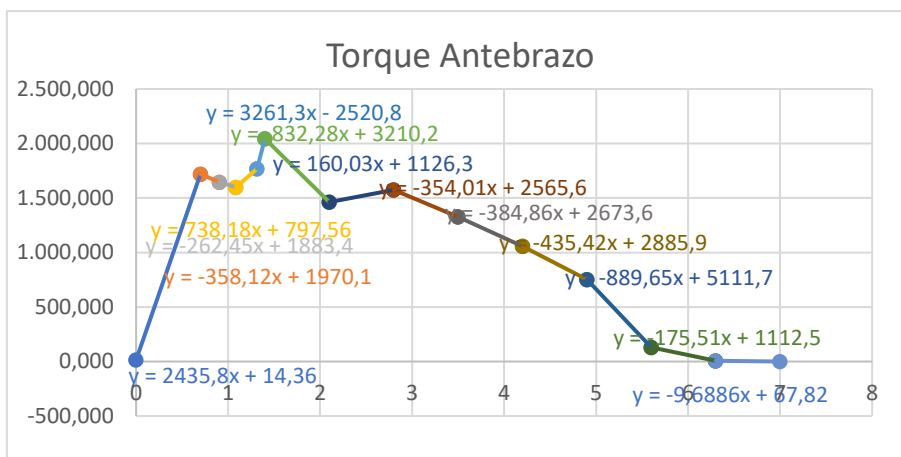
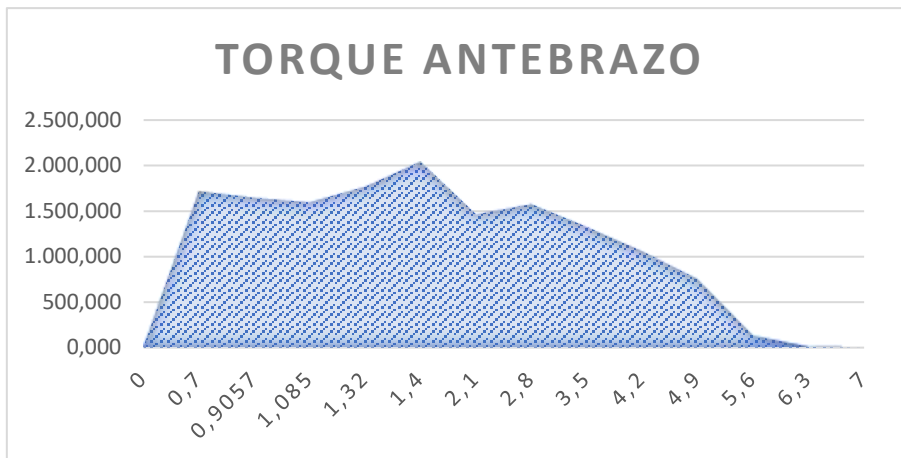


TIEMPO (S)	TORQUE(Nmm)	INTEGRAL
0	11,587	46,94137
0,7	122,532	16,30324718
0,9057	35,983	4,264031475
1,085	11,527	4,8906165
1,32	31,000	2,55571936
1,4	29,276	68,17755
2,1	165,517	139,04618
2,8	231,758	154,44296
3,5	209,508	84,06188
4,2	30,669	19,43165
4,9	24,850	12,73195
5,6	11,527	5,985455
6,3	5,574	1,95097
7	0,000	-

Punto medio (Nmm)

80,11193993

Punto Medio del Antebrazo.

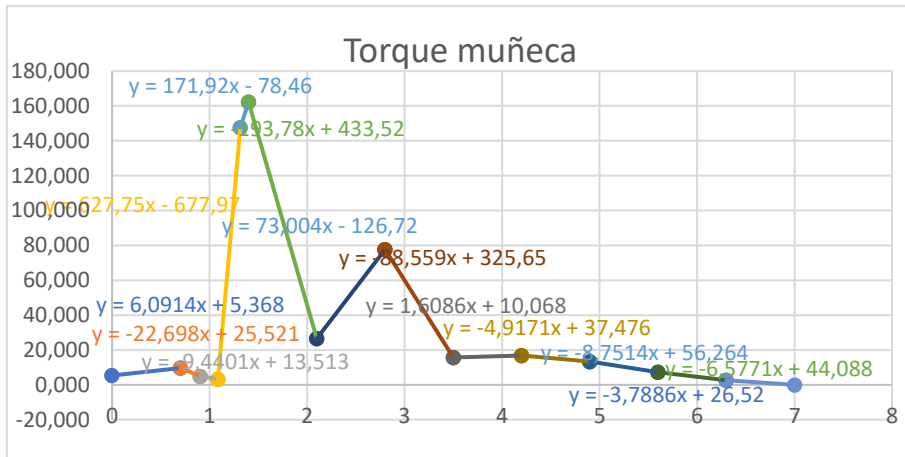
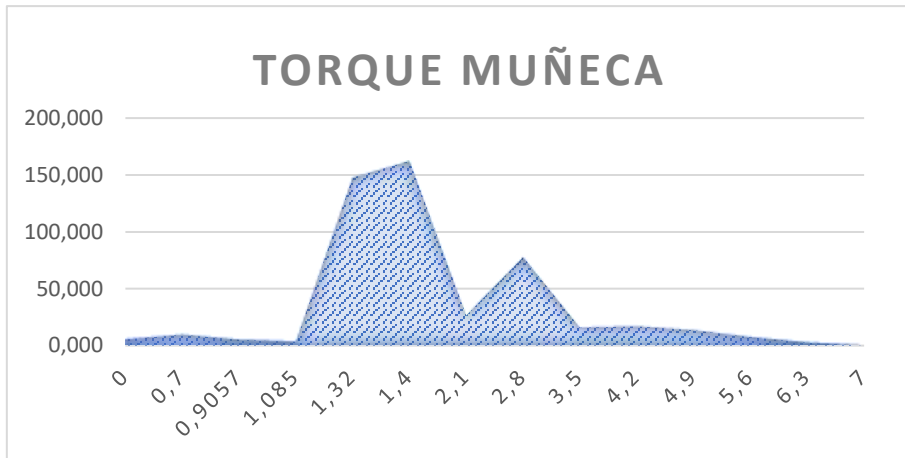


TIEMPO (S)	TORQUE(Nmm)	INTEGRAL
0	14,360	606,8195
0,7	1.719,410	346,1061918
0,9057	1.645,745	291,1831678
1,085	1.598,636	387,2110605
1,32	1.768,417	161,6878208
1,4	2.044,975	1227,57355
2,1	1.462,378	1062,8716
2,8	1.574,398	1015,34545
3,5	1.326,589	834,3223
4,2	1.057,189	633,35475
4,9	752,396	308,7119
5,6	129,638	47,747
6,3	6,782	2,3737
7	0,000	-

Punto medio (Nmm)

989,329713

Punto Medio de la Muñeca.



TIEMPO (S)	TORQUE(Nmm)	INTEGRAL
0	5,368	5,25
0,7	9,632	1,50109575
0,9057	4,963	0,738777125
1,085	3,269	17,3558575
1,32	147,652	13,1390392
1,4	162,231	66,08595
2,1	26,586	36,49625
2,8	77,689	32,68545
3,5	15,698	11,3827
4,2	16,824	10,5721
4,9	13,382	7,2233
5,6	7,256	3,4678
6,3	2,652	0,9282
7	0,000	-

Punto medio (Nmm)

29,54664565

ANEXO 7:
MOTORES SELECCIONADOS PARA CADA
ARTICULACIÓN DEL PROTOTIPO.

Motor base.



Dimensions

Size:	25D x 67L mm ¹
Weight:	101 g
Shaft diameter:	4 mm

General specifications

Gear ratio:	46.85:1
No-load speed @ 12V:	160 rpm
No-load current @ 12V:	200 mA
Stall current @ 12V:	2100 mA
Stall torque @ 12V:	85 oz·in
No-load speed @ 6V:	80 rpm ²
Stall current @ 6V:	1050 mA ²
Stall torque @ 6V:	42 oz·in ²
Motor type:	2.1A stall @ 12V (MP 12V)
Lead length:	8 in ³
Encoders?:	Y

Motor hombro.



Dimensions

Size:	37D x 72.5L mm ¹
Weight:	210 g
Shaft diameter:	6 mm ²

General specifications

Gear ratio:	150:1
No-load speed @ 12V:	67 rpm
No-load current @ 12V:	0.2 A
Stall current @ 12V:	5.5 A ³
Stall torque @ 12V:	49 kg·cm ³
Max output power @ 12V:	6 W ⁴
No-load speed @ 6V:	33 rpm ⁵
No-load current @ 6V:	0.15 A ⁵
Stall current @ 6V:	3.0 A ⁵
Stall torque @ 6V:	30 kg·cm ⁵
Motor type:	12V

Motor brazo.



Dimensions

Size:	25D x 71L mm ¹
Weight:	107 g
Shaft diameter:	4 mm

General specifications

Gear ratio:	226.76:1
No-load speed @ 12V:	33 rpm
No-load current @ 12V:	200 mA
Stall current @ 12V:	2100 mA
Stall torque @ 12V:	360 oz-in ²
No-load speed @ 6V:	16 rpm ²
Stall current @ 6V:	1050 mA ²
Stall torque @ 6V:	160 oz-in ³
Motor type:	2.1A stall @ 12V (MP 12V)
Lead length:	8 in ⁴
Encoders?:	Y

Motor codo.



Dimensions

Size:	25D x 67L mm ¹
Weight:	101 g
Shaft diameter:	4 mm

General specifications

Gear ratio:	34.014:1
No-load speed @ 12V:	220 rpm
No-load current @ 12V:	200 mA
Stall current @ 12V:	2100 mA
Stall torque @ 12V:	63 oz-in
No-load speed @ 6V:	110 rpm ²
Stall current @ 6V:	1050 mA ²
Stall torque @ 6V:	31 oz-in ²
Motor type:	2.1A stall @ 12V (MP 12V)
Lead length:	8 in ³
Encoders?:	Y

Motor Antebrazo.



Dimensions

Size:	25D x 67L mm ¹
Weight:	101 g
Shaft diameter:	4 mm

General specifications

Gear ratio:	46.85:1
No-load speed @ 12V:	160 rpm
No-load current @ 12V:	200 mA
Stall current @ 12V:	2100 mA
Stall torque @ 12V:	85 oz-in
No-load speed @ 6V:	80 rpm ²
Stall current @ 6V:	1050 mA ²
Stall torque @ 6V:	42 oz-in ²
Motor type:	2.1A stall @ 12V (MP 12V)
Lead length:	8 in ³
Encoders?:	Y

Motor muñeca.



Size:	25D x 65L mm ¹
Weight:	98 g
Shaft diameter:	4 mm

General specifications

Gear ratio:	20.4:1
No-load speed @ 12V:	370 rpm
No-load current @ 12V:	200 mA
Stall current @ 12V:	2100 mA
Stall torque @ 12V:	42 oz-in
No-load speed @ 6V:	185 rpm ²
Stall current @ 6V:	1050 mA ²
Stall torque @ 6V:	21 oz-in ²
Motor type:	2.1A stall @ 12V (MP 12V)
Lead length:	8 in ³
Encoders?:	Y

ANEXO 8:
CATÁLOGO PARA SELECCIÓN DE
RODAMIENTOS FAG.

(Archivo digital)

ANEXO 9:
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA
CORREA DENTADA SELECCIONADA.



PU Linear HTD5M Steel

Article code: TBP000083

General information

Productgroup	Timing belts, PU Linear
Industry segment	General industry; Container & packaging; Paper & print
Main product feature	Positive drive, Wear resistant

Belt construction

Tension member	steel
Material	body Polyurethane
Surface	tooth side Polyurethane back side Polyurethane

Characteristics

Food Grade (FG)	no
Anti-static (AS)	no
Oil & Fat resistance	yes

Technical data

Tooth	profile		HTD5M	
	pitch		5 mm	0.2 in.
Hardness body material	according to ISO 868		92A Shore	
Belt thickness			3.6 mm	0.14 in.
Belt weight			4.8 kg/m ²	0.98 lbs/ft ²
Coefficient of friction	tooth side to steel	dynamic	0.5	
Operating temperature	continuous	from/to	-10 / 80 °C	14 / 176 °F
Minimum pulley diameter	A) without counter flexing	number of teeth, t1	16	
		d1	24.32 mm	0.96 in.
		d2	50 mm	1.97 in.
	B) with counter flexing	number of teeth, t1	20	
		d1	30.69 mm	1.21 in.
		d2	50 mm	1.97 in.
Belt width*	maximum		100 mm	3.94 in.
Endless length	minimum		500 mm	19.69 in.
Manufacturing length	standard		100000 mm	328.08 ft.

* some timing belt types are available in greater belt widths.

ANEXO 10:
CÓDIGO DEL CONTROL EN EL IDE DE
ARDUINO®.

```

#define BRAKE 0
#define CW 1
#define CCW 2
#define CS_THRESHOLD 15

//MOTOR 1
#define MOTOR_A1_PIN 7
#define MOTOR_B1_PIN 8

//MOTOR 2
#define MOTOR_A2_PIN 4
#define MOTOR_B2_PIN 9

#define PWM_MOTOR_1 5
#define PWM_MOTOR_2 6

#define CURRENT_SEN_1 A2
#define CURRENT_SEN_2 A3

#define EN_PIN_1 A0
#define EN_PIN_2 A1

#define MOTOR_1 0
#define MOTOR_2 1

short usSpeed = 50; // Velocidad de motor por defecto
unsigned short usMotor_Status = BRAKE;

void setup()
{
  pinMode(MOTOR_A1_PIN, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR_B1_PIN, OUTPUT);

  pinMode(MOTOR_A2_PIN, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR_B2_PIN, OUTPUT);

  pinMode(PWM_MOTOR_1, OUTPUT);
  pinMode(PWM_MOTOR_2, OUTPUT);

  pinMode(CURRENT_SEN_1, OUTPUT);
  pinMode(CURRENT_SEN_2, OUTPUT);

  pinMode(EN_PIN_1, OUTPUT);
  pinMode(EN_PIN_2, OUTPUT);

  Serial.begin(9600); // Inicia el serial para realizar el monitoreo
  Serial.println("Monitor serie del control del
prototipo");
  Serial.println(); //Lista de funciones
}

```

```

    Serial.println("Introduce una tecla para realizar
el control:");
    Serial.println("1. PARAR");
    Serial.println("2. INICIAR");
    Serial.println("3. REVERSA");
    Serial.println("+. INCREMENTAR LA
VELOCIDAD");
    Serial.println("-. DISMINUIR LA
VELOCIDAD");
    Serial.println();
}

void loop()
{
    char user_input;

    while(Serial.available())
    {
        user_input = Serial.read();
        digitalWrite(EN_PIN_1, HIGH);
        digitalWrite(EN_PIN_2, HIGH);

        //Lee la entrada seleccionada y activa la función
        //apropiada.

        if (user_input == '1')
        {
            Parar();
        }
        else if(user_input == '2')
        {
            Iniciar();
        }
        else if(user_input == '3')
        {
            Reversa();
        }
        else if(user_input == '+')
        {
            IncrementarVelocidad();
        }
        else if(user_input == '-')
        {
            DisminuirVelocidad();
        }
        else
        {
            Serial.println("Opción invalida.");
        }
    }
}

```



```

    }
}

void Parar()
{
    Serial.println("Parar");
    usMotor_Status = BRAKE;
    motorGo(MOTOR_1, usMotor_Status, 0);
    motorGo(MOTOR_2, usMotor_Status, 0);
}

void Iniciar()
{
    Serial.println("Iniciar");
    usMotor_Status = CW;
    motorGo(MOTOR_1, usMotor_Status,
usSpeed);
    motorGo(MOTOR_2, usMotor_Status,
usSpeed);
}

void Reversa()
{
    Serial.println("Reversa");
    usMotor_Status = CCW;
    motorGo(MOTOR_1, usMotor_Status,
usSpeed);
    motorGo(MOTOR_2, usMotor_Status,
usSpeed);
}

void IncrementarVelocidad()
{
    usSpeed = usSpeed + 10;
    if(usSpeed > 255)
    {
        usSpeed = 255;
    }

    Serial.print("Speed +: ");
    Serial.println(usSpeed);

    motorGo(MOTOR_1, usMotor_Status,
usSpeed);
    motorGo(MOTOR_2, usMotor_Status,
usSpeed);
}

void DisminuirVelocidad()
{

```

```

usSpeed = usSpeed - 10;
if(usSpeed < 0)
{
  usSpeed = 0;
}

```

```

Serial.print("Speed -: ");
Serial.println(usSpeed);

```

```

  motorGo(MOTOR_1, usMotor_Status,
usSpeed);
  motorGo(MOTOR_2, usMotor_Status,
usSpeed);
}

```

```

void motorGo(uint8_t motor, uint8_t direct,
uint8_t pwm)
{
  if(motor == MOTOR_1)
  {
    if(direct == CW)
    {
      digitalWrite(MOTOR_A1_PIN, LOW);
      digitalWrite(MOTOR_B1_PIN, HIGH);
    }
    else if(direct == CCW)
    {
      digitalWrite(MOTOR_A1_PIN, HIGH);
      digitalWrite(MOTOR_B1_PIN, LOW);
    }
    else
    {
      digitalWrite(MOTOR_A1_PIN, LOW);
      digitalWrite(MOTOR_B1_PIN, LOW);
    }
  }
}

```

```

  analogWrite(PWM_MOTOR_1, pwm);
}
else if(motor == MOTOR_2)
{
  if(direct == CW)
  {
    digitalWrite(MOTOR_A2_PIN, LOW);
    digitalWrite(MOTOR_B2_PIN, HIGH);
  }
  else if(direct == CCW)
  {
    digitalWrite(MOTOR_A2_PIN, HIGH);
    digitalWrite(MOTOR_B2_PIN, LOW);
  }
  else

```

//Función que controla las variables: motor, dirección y velocidad (pwm).

```
{  
  digitalWrite(MOTOR_A2_PIN, LOW);  
  digitalWrite(MOTOR_B2_PIN, LOW);  
}  
  
analogWrite(PWM_MOTOR_2, pwm);  
}  
}
```