



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado
para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento
Polimérico”**

TITULACIÓN INTEGRAL
TESIS

Para Obtener el Grado de:
Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Juan Carlos Delgado Flores

TUTORES:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Pabellón de Arteaga, Ags., Julio del 2020



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO®
de Pabellón de Arteaga

ITEC

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

Tesis:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO
AUTOMATIZADO PARA UN SISTEMA DE HILATURA:
TRANSPORTE DE UN FILAMENTO POLIMÉRICO”**

Presenta:

Juan Carlos Delgado Flores

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Asesor:

Ing. Fernando García Vargas

Pabellón de Arteaga, Ags., Julio del 2020.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas y colegas me han prestado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres que incondicionalmente me han ayudado y apoyado en todo mi producto, a mi padre, Carlos Delgado, por haberme orientado con valores en todos los momentos que necesité sus consejos.

Por el esfuerzo, dedicación, paciencia, por su confianza y por todo lo que me ha dado a lo largo de mi carrera y de mi vida, este trabajo de tesis va dedicado a mi madre, Silvia Flores.

A mis amigos y compañeros Juan Manuel Aguiñaga Martínez y Dalí Esaú Ramírez Muñoz que gracias a su apoyo moral e intelectual fue posible el desarrollo de este proyecto y me permitieron permanecer con empeño, dedicación y cariño.

Así mismo, deseo expresar mi reconocimiento al instituto tecnológico pabellón de Arteaga, al Dr. José Alonso Dena Aguilar como asesor interno y tutor, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de tesis, sino a lo largo de estos dos años de desde que decidimos desarrollar el proyecto y haberme brindado el gran apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

Agradezco a todos los docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional en el Instituto Tecnológico pabellón de Arteaga.

A Yatzaray por su apoyo y amor siendo una excelente pareja, amiga y compañera.



Pabellón de Arteaga, Ags., 3/junio/2020

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Licenciatura titulada "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO AUTOMATIZADO PARA UN SISTEMA DE HILATURA: TRANSPORTE DE UN FILAMENTO POLIMÉRICO" del estudiante JUAN CARLOS DELGADO FLORES con numero de control 151050127 de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizo los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO
GALLARDO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

ING. FERNANDO GARCÍA VARGAS
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



Pabellón de Arteaga, Ags., 10/junio/2020

JUAN CARLOS DELGADO FLORES
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL 151050127

PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO AUTOMATIZADO PARA UN SISTEMA DE HILATURA: TRANSPORTE DE UN FILAMENTO POLIMÉRICO", hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su acto protocolario de titulación integral por Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®



M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

RESUMEN

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO AUTOMATIZADO PARA UN SISTEMA DE HILATURA: TRANSPORTE DE UN FILAMENTO POLIMÉRICO”

Por: **JUAN CARLOS DELGADO FLORES**

El proceso de hilatura en húmedo emplea un solvente no volátil para transformar la materia prima en un fluido de hilatura que se hace pasar por una boca extrusora para producir filamentos poliméricos, los cuales se introducen en un medio (baño) de coagulación para precipitar (solidificar) el material y eliminar trazas de solvente presente en el material extruido. Generalmente, los baños de coagulación son soluciones acuosas de un solvente orgánico capaz de provocar daños en la salud del ser humano si se tiene un contacto directo por tiempos prolongados.

En el laboratorio de Conversión de la Energía adscrito al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga se desarrollan proyectos relativos a la producción de fibras poliméricas de poliacrilonitrilo para sus posibles aplicaciones en sistemas de energías renovables como estructuras de soporte flexibles. Dentro de este contexto, se contempla el transporte de un filamento polimérico de poliacrilonitrilo dentro de un baño de coagulación de una solución acuosa de dimetilformamida.

Considerando lo anterior, se requiere de un sistema de transporte automatizado que realice la función de trasladar el filamento por el baño y así evitar el uso de sujeción manual por parte del operador y poder suprimir o minimizar las probabilidades de consecuencias y daños a su salud. Para este estudio se empleó un equipo extrusor en frío de bajo volumen para un filamento polimérico construido por Dena-Aguilar *et al.* en trabajos anteriores como punto de partida del movimiento del robot cartesiano y el brazo robótico.

En este trabajo, se desarrolló una metodología para diseñar y construir un sistema mecatrónico para el transporte de un filamento polimérico de poliacrilonitrilo por medio de un robot cartesiano con terminación de un brazo robótico desde la boca extrusora (entrada al baño) hasta el sistema de estiramientos (salida). Se emplearon más de 400 piezas entre materiales de acero al carbón, electrónica modular compatible con hardware y software Arduino, comunicación serial y CNC robótica además de fabricar unidades de soporte mediante impresión 3D con material de poliláctico. Por mencionar algunos, se usó acero al carbón comercial (perfil tubular de 1 in), microcontrolador Arduino ATmega2560, motor DC con reductor JGA25-370, motor de engranajes de impresora convencional, servomotores MG996R y MG90S, controlador puente HL298N, módulo bluetooth HC-06 y diversos relevadores, *switchs*, banda y polea dentadas, varilla roscada, cableado general de red Ethernet, coples, *gripper* de agarre, entre otros. Todos los componentes modulares están controlados por un lenguaje programable en Arduino

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

y una interfaz en software LabVIEW y MIT App Inventor. Se obtuvieron los diagramas electrónicos del sistema embebido empleando software de acceso libre *Proteus* y *Fritzing*.

La propuesta de solución consistió en eliminar la manipulación manual de la conducción del filamento polimérico a través del baño de coagulación por medio de un elemento de sujeción de robot (*grripper*) que describa una trayectoria en el eje de abscisas y posteriormente una elevación por el eje de las ordenadas para lograr conducir el filamento desde la salida de la boca extrusora (dado extrusor) hasta la puesta en los rodillos de estiramientos

Se logró el diseño y construcción de (i) un robot cartesiano en los ejes x e y , (ii) de un brazo robótico, ambos elementos integrado uno con el otro. Se desarrolló un programa de control en la plataforma electrónica de código abierto Arduino para la interacción con el sistema. Se elaboró un entorno de desarrollo integrado en software LabVIEW para facilidad de operación de movimientos del sistema. Se construyó una interfaz gráfica móvil mediante la aplicación MIT App Inventor para teléfonos inteligentes.

El presente estudio tiene como antecedentes la continuidad de un trabajo previo de desarrollo de un extrusor para hilatura en húmedo por lo que se requería establecer el módulo de proceso de precipitación y conducción hacia un sistema de estiramiento y bobinado de filamento sin poner en riesgo la salud del operador.

Esta Tesis es una secuencia más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue realizado de manera grupal. Por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis.

Este trabajo es parte de un proyecto global de un sistema de hilatura integral que comprende etapas de síntesis, extrusión y estiramiento y bobinado de un filamento polimérico. Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto proponente. Por tanto, los productos entregables de los participantes comparten las mismas secciones básicas del documento de Tesis con la diferencia de los resultados logrados en módulos de proceso diferentes.

Este estudio presenta los logros alcanzados de la etapa de extrusión enfocado al proceso de coagulación con el diseño, construcción, automatización y control de un robot cartesiano con terminación en brazo robótico bajo diseño propio. Lo anterior bajo autorización y aprobación de la Academia de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

M. C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	5
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
 II. MARCO TEÓRICO	 6
2.1 POLÍMEROS.....	6
2.1.1 Características generales de un polímero.....	6
2.1.2 Mecanismos simples de polimerización, poliacrilonitrilo (PAN) y dimetilformamida (DMF).....	6
2.2 EXTRUSIÓN.....	7
2.2.1 Extrusión de polímeros.....	7
2.3 HILATURA EN HÚMEDO.....	9
2.3.1 Baño de coagulación.....	12
2.4 EQUIPO DE EXTRUSIÓN HECHO A LA MEDIDA	12
2.5 ROBOT CARTESIANO.....	14
2.5.1 Lenguaje de programación de un robot cartesiano.....	15
2.5.2. Tipos de robots cartesianos.....	16
2.6 BRAZO ROBOT.....	18
2.6.1 Componentes de un brazo robótico.....	19
2.7 CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO....	21
2.7.1 Microcontroladores.....	21
2.7.2 Servomotores, driver de control de motores y potenciómetros.....	21
2.7.3 Componentes CNC Robótica.....	23
2.7.4 Entorno de desarrollo integrado (IDE).....	26
2.7.4.1 Arduino.....	26
2.7.4.2 LabVIEW.....	26
2.7.4.3 Proteus.....	28

	Pág.
2.7.4.4 MIT App Inventor para aplicaciones móviles APK.....	28
2.7.4.5 Fritzing.....	29
2.8. ANATOMÍA HUMANA DEL BRAZO.....	30
III. METODOLOGÍA.....	31
3.1 DISEÑOS DEL ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO.....	31
3.1.1 Diseños mecánicos.....	31
3.1.2 Diseños electrónicos.....	31
3.2 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO.....	31
3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÓDIGO E INTERFAZ DE CONTROL.....	41
3.3.1 Cableado y terminales de conexión para protocolo de comunicación serial	42
3.3.2 Interfaz gráfica LabVIEW y MIT App Inventor.....	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1 DISEÑOS DEL ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO.....	44
4.1.1 Diseños mecánicos.....	44
4.1.2 Diseños electrónicos.....	67
4.2 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO.....	70
4.2.1 Fabricación de piezas en PLA.....	70
4.2.2 Fabricación de estructura de soporte de robot cartesiano y sliders.....	73
4.3 SISTEMA DE CONTROL.....	91
4.3.1 Comunicación serial y cableado.....	91
4.3.2 Código Arduino.....	91
4.3.3 Interfaz gráfica LabVIEW.....	91
4.3.4 Interfaz gráfica MIT App Inventor.....	94
V. CONCLUSIONES.....	98
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXO 1. Diseños acotados de piezas de Robot Arm y bases de componentes del robot cartesiano.....	102
ANEXO 2. Diseños con medidas de alcances entre el robot cartesiano y el Robot Arm.....	112

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

	Pág.
ANEXO 3. Código Arduino del sistema embebido de control y automatización del robot cartesiano & Robot Arm.....	116
ANEXO 4. Código MIT App Inventor de control y automatización del robot cartesiano & Robot Arm.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pág.
1	Estructura en cadena del poliacrilonitrilo (copyright 123RF, autor Lebedev, A.).....	7
2	Representación de la polimerización por radicales libres del PAN.....	7
3	Principio básico de un proceso de extrusión simple.....	8
4	Máquina de extrusión simple.....	8
5	Vista esquemática de procesos alternos de hilatura en húmedo después del baño de coagulación.....	9
6	Hilatura en húmedo.....	10
7	Máquina para hilar textiles con hilatura en húmedo (copyright Lanhua Co.).....	11
8	Máquina de hilado en húmedo (copyright Lanhua Co.).....	12
9	Vista esquemática de un laboratorio a escala de hilatura en húmedo.....	13
10	Vista frontal extrusor simple de bajo volumen.....	13
11	Vista de la boquilla y punta extrusora del extrusor empleado para validar robot cartesiano.....	14
12	Robot cartesiano versión estándar: vista esquemática (izq.) y caso práctico (der.).....	16
13	Robot cartesiano versión compacto: vista esquemática (izq.) y caso práctico (der.).....	17
14	Robot cartesiano lineal: vista esquemática.....	17
15	Robot cartesiano de pórtico: vista esquemática (izq.) y caso práctico (der.).....	18
16	Esquema comparativo de un brazo humano vs un brazo robótico: articulaciones y movimientos.....	18
17	Diseño tridimensional de un brazo robótico académico con articulaciones simples.....	20
18	Esquema de un brazo robótico articulado.....	20
19	Arduino UNO R3: microcontrolador ATmega328 (fuente: electrocrea.com).....	21
20	Servo motor MG996R (fuente: electrocrea.com).....	22
21	Driver L298N puente H (fuente: electrocrea.com).....	22
22	Potenciómetro KY-040 Encoder Rotatorio (fuente: electrocrea.com).....	23
23	Varilla roscada 8mm x 500mm (husillo).....	23
24	Gripper aluminio para brazo robótico.....	24
25	Tuerca husillo trapecoidal 8mm.....	24
26	Micro switch con palanca mouse touch.....	24
27	Cople rígido 5mm-8mm.....	25
28	Chumacera de pared 8mm.....	25
29	2GT 5mm 20 dientes polea dentada.....	25
30	Motorreductor 6v 130 RPM JGA25-370.....	26

Figura	Pág.
31 IDE software Arduino.....	27
32 IDE software LabVIEW.....	27
33 IDE software Proteus: motor de simulación de circuitos electrónicos.....	28
34 IDE MIT App Inventor: diagrama de bloques.....	29
35 IDE Fritzing: diagrama electrónico para encendido de un led.....	29
36 Anatomía del brazo humano (secciones): hombro (Waist), brazo (Arm 01), antebrazo (Arm 02), muñeca (Arm 03) y dedos (Gripper).....	30
37 Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la base circular (vista previa): 38.12 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 1h 58 min.....	35
38 Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la base circular (vista previa): 38.12 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 1h 58 min.....	36
39 Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la sección Arm 01 (vista previa): 38.02 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 2h 16 min.....	37
40 Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la sección Arm 02 (vista previa): 26.92 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 1h 43 min.....	38
41 Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la sección Arm 03 (vista previa): 10.96 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 50 min.....	39
42 Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la pinza angular para el gripper (vista previa): 37.10 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 2h 27 min.....	40
43 Identificación de las piezas del Robot Arm y sus 5 DOF (3 x-y + rotación de la pinza + pinza)....	41
44 Robot cartesiano & Robot Arm: ensamble completo.....	44
45 Robot cartesiano & Robot Arm: acercamiento de ensamble completo.....	45
46 Robot cartesiano: sección del eje y.....	46
47 Robot cartesiano: sección del eje x.....	47
48 Robot cartesiano: vista 1 de la slider del eje x.....	48
49 Robot cartesiano: vista 1 de la slider del eje x.....	48
50 Robot cartesiano: vista trasera de la slider del eje y.....	49
51 Robot cartesiano: vista trasera de la slider del eje y.....	49
52 Robot cartesiano: sección de soporte derecho en el eje x.....	50
53 Robot cartesiano: sección de soporte izquierdo en el eje x.....	50
54 Robot Arm: vista 2 de rotulación de piezas de soporte.....	51
55 Robot Arm: ensamble completo vista frontal (vista del brazo integrado a la slider del eje y).....	52
56 Robot Arm: ensamble completo vista posterior (vista del brazo integrado a la slider del eje y)...	53
57 Robot cartesiano: ensamble completo en ejes x e y.....	54

Figura	Pág.
58 Robot cartesiano: vista frontal de ensamble completo de los ejes x e y con acercamiento al sistema de rodamientos de la slider del eje x en escala 2:5.....	55
59 Robot cartesiano: vista posterior de ensamble completo de los ejes x e y	56
60 Robot cartesiano: vista lateral de ensamble completo de los ejes x e y	57
61 Robot cartesiano: acercamientos de (i) polea dentada escala 1:5 (abajo), (ii) rodamiento 624-RS escala 2:5 (centro) y (iii) base para switch escala 1:5 (arriba).....	58
62 Robot cartesiano & Robot Arm: vista lateral.....	59
63 Robot Arm: vista explosiva & rotulación componentes.....	60
64 Robot Arm: vista lateral con ampliación de gripper.....	61
65 Ensamblaje del Robot Arm en el eje y del robot cartesiano: vista lateral.....	62
66 Ensamble del Robot Arm en el eje y del robot cartesiano: vista frontal.....	63
67 Robot Arm: base circular.....	64
68 Robot Arm: Waist.....	64
69 Robot Arm: Arm 01.....	65
70 Robot Arm: Arm 02.....	65
71 Robot Arm: Arm 03.....	66
72 Robot Arm: Gripper.....	66
73 Diagrama electrónico del sistema embebido de control y automatización en vista esquema Proteus.....	69
74 Diagrama electrónico del sistema embebido de control y automatización en vista protoboard Fritzing.....	71
75 Robot Arm: base fabricada en PLA.....	72
76 Robot Arm: Waist fabricada en PLA.....	72
77 Robot Arm: Arm 01 fabricada en PLA.....	72
78 Robot Arm: Arm 02 fabricada en PLA.....	73
79 Robot Arm: pinza angular fabricada en PLA y gripper de aluminio.....	73
80 Operaciones de manufactura de estructuras de soporte metálicas de robot cartesiano y sliders: corte, soldadura, perforación, esmeril.....	74
81 Robot cartesiano & Robot Arm: vista frontal completa.....	75
82 Robot cartesiano & Robot Arm: vista lateral completa.....	76
83 Gabinete de control de sistema embebido.....	77
84 Robot cartesiano en el eje x	78
85 Robot cartesiano en el eje y	78
86 Soporte derecho del robot cartesiano.....	79

Figura	Pág.
87 Interfaz puertos serie D37 y D25 en soporte derecho del robot cartesiano.....	79
88 Slider del eje <i>x</i> vista frontal.....	89
89 Slider del eje <i>x</i> vista trasera y soporte izquierdo del robot cartesiano.	89
90 Interfaz puertos serie D25 en slider del eje <i>x</i> del robot cartesiano.....	81
91 Slider del eje <i>y</i> vista lateral.....	81
92 Slider del eje <i>y</i> vista posterior.....	82
93 Interfaz puertos serie D15 en slider del eje <i>y</i> del robot cartesiano.....	82
94 Switch de fin de carrera en el eje <i>y</i> para desplazamiento de Robot Arm.....	83
95 Vista de Robot Arm con servomotores MG90S integrados.....	83
96 Robot Arm montado sobre eje <i>y</i> del robot cartesiano: vista lateral.....	84
97 Vista frontal del Robot Arm sobre el eje <i>y</i>	84
98 Vista 1 del Robot Arm sobre el eje <i>y</i>	85
99 Vista 2 del Robot Arm sobre el eje <i>y</i>	85
100 Vista superior del Robot Arm sobre el eje <i>y</i>	86
101 Encoder KY-040 rotatorio.....	86
102 Sistema de extrusión completo: extrusor + robot cartesiano + Robot Arm: vista 1.....	87
103 Sistema de extrusión completo: extrusor + robot cartesiano + Robot Arm: vista 2.....	88
104 Sistema de extrusión completo: extrusor + robot cartesiano + Robot Arm: vista 3.....	89
105 Sistema de extrusión completo: extrusor + robot cartesiano + Robot Arm: vista 4.....	90
106 Secuencia de programación en LabVIEW para el control del sistema.....	92
107 Interfaz visual desarrollada en LabVIEW para el control del sistema.....	93
108 Interfaz visual desarrollada en MIT App Inventor para el robot cartesiano.....	95
109 Interfaz visual desarrollada en MIT App Inventor para el Robot Arm.....	96
110 Interfaz visual desarrollada en MIT App Inventor de teléfono inteligente: Robot Arm (izq.) y robot cartesiano (der.).....	97
111 Robot Arm: base circular.....	102
112 Robot Arm: ancla de sujeción (Waist).	102
113 Robot Arm: Arm 01.	103
114 Robot Arm: Arm 02.	103
115 Robot Arm: Arm 03.	104
116 Robot Arm: Gripper donde van sujetas las partes de la pinza.	104
117 Robot Arm: primer eslabón de la pinza lado derecho, donde se sujeta el servomotor.	105
118 Robot Arm: primer eslabón de la pinza lado izquierdo.	105
119 Robot Arm: conector del primer y segundo eslabón del gripper.	106

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

Figura		Pág.
120	Robot Arm: segundo eslabón de la pinza del gripper.	106
121	Robot cartesiano: base inferior para sujeción de limit switch.	107
122	Robot cartesiano: base superior para sujeción de limit switch.	107
123	Robot cartesiano: base para sujeción de varilla roscada (husillo) de 8 mm.....	108
124	Robot cartesiano: base para sujeción de motor-reductor eje y.....	108
125	Base para rodamiento 626-RS.	109
126	Robot cartesiano: base tipo prensa para sujeción de banda dentada.	109
127	Robot cartesiano: base para sujeción de puertos serie 15 y 25 pines hembra.	110
128	Robot cartesiano: base para sujeción de puertos serie 15 pines hembra.	110
129	Robot cartesiano: base para sujeción de puertos serie 25 y 37 pines hembra.	111
130	Robot Arm: vista lateral con medidas de gripper.....	112
131	Robot Arm: medidas de alcance del Robot Arm desde su base hasta la punta del gripper.....	113
132	Vista lateral con medidas de alcance desde la base del robot cartesiano hasta el gripper.....	114
133	Vista lateral con medidas de alcance desde la base del robot cartesiano hasta el gripper en posición de sujeción.....	115
134	Sección del IDE MIT App Inventor para el módulo bluetooth.	122
135	Sección del IDE MIT App Inventor para comunicación de los servomotores con modulo bluetooth.	123
136	Sección del IDE MIT App Inventor para operación del robot cartesiano.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Categorías tarifarias eléctricas en la Industria en México.....	7
2	Visualización de magnitudes medidas en función del tipo de conexión.....	18
3	Identificación y acción realizada por los registros.....	27
4	Código de rotulación de instalación eléctrica para el SP3100.....	55
5	Lecturas comparativas de tensión (voltajes).....	56
6	Lecturas comparativas de corriente (amperajes).....	56
7	Promedio de datos de las lecturas obtenidas.....	66

NOMENCLATURA

PAN	Poliacrilonitrilo.
DMF	Dimetilformamida.
Baño	Medio de coagulación.
IDE	Entorno de desarrollo integrado.
PLA	Poliácido láctico (material de impresión 3D).

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de hilatura integral considera una serie de procesos de fácil o mediana complejidad. Entre estos procesos podemos mencionar la síntesis polimérica, la extrusión y el estiramiento y bobinado de las fibras de trabajo.¹ En particular, el proceso de extrusión se puede llevar a cabo bajo una metodología de hilatura en húmedo donde una solución coloidal de hilatura es obtenida empleando solventes orgánicos según el material de trabajo. La solución de hilatura se hace pasar por una boca extrusora para adoptar una forma geométrica de filamento polimérico y posteriormente se sumerge en un medio (baño) de coagulación de una solución acuosa de un solvente orgánico específico del polímero de composición específica para solidificarlo y eliminar trazas en exceso de solvente.² Enseguida el filamento sale del baño y se canaliza al sistema de estiramiento y bobinado contemplado.

En el laboratorio de Conversión de la Energía adscrito al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga se desarrollan proyectos de investigación, tecnológicos o de innovación relativos a la línea de generación y aplicación del conocimiento conversión de la energía. Uno de estos proyectos se refiere al transporte de un filamento polimérico de poliacrilonitrilo dentro de un baño de coagulación de una solución acuosa de dimetilformamida contenida en un recipiente de media caña de policloruro de vinilo.

Uno de estos proyectos se refiere al transporte de un filamento polimérico de poliacrilonitrilo (PAN) dentro de un baño de coagulación de una solución acuosa de dimetilformamida (DMF). Se estudia la producción de fibras poliméricas de PAN para su estudio en aplicaciones en sistemas de energías renovables.

La función del baño de coagulación es la de solidificar el filamento de PAN y retirar las trazas de solvente DMF adheridas al filamento para incrementar su resistencia mecánica. El DMF es un solvente orgánico específico del PAN^{3,4} y que presenta un grado de nivel bajo de toxicidad aguda y causa irritaciones de leves a moderadas en ojos y piel.⁵ Por lo que no se recomienda el contacto directo con esta sustancia en tiempos prolongados. Aunado a lo anterior, el uso de guantes flexibles de látex o silicón no es viable por la rápida degradación de su resistencia mecánica al contacto con el solvente DMF (pruebas propias). El uso de guantes de mayor resistencia de nitrilo o de caucho tampoco son recomendables por su rigidez de manipulación (pruebas propias). Debido a que el filamento de PAN debe ser transportado por toda la longitud del baño de coagulación, para asegurar la eliminación de la mayor presencia de trazas de DMF, se requiere de un sistema de transporte automatizado que realice la función de trasladar el filamento de PAN por el baño y así evitar el uso de sujeción manual por el operador y sus consecuencias a la salud.

Derivado de lo anterior, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

1.- Seguridad en el control de transporte de filamento

- Eliminar el manejo manual de la toma de filamento y conducción a través de la longitud del baño de coagulación.
- Suprimir cualquier daño a la salud al operador por el contacto directo en la piel con el DMF.

2. - Automatización y control

- Disponer de un equipo mecatrónico que mecánicamente sujete y conduzca el filamento polimérico dentro del baño de coagulación a velocidades y tiempos de residencia controlados.
- Adicionalmente, se tenga de manera automatizada el control del filamento del baño hasta la etapa subsecuente del proceso.

Adicionalmente, el control automatizado de la sujeción, transporte y manipulación del filamento polimérico mediante un dispositivo mecatrónico asegura que no se tengan rupturas ni taponaduras del sistema que provoquen pérdidas de material siendo lo deseable que el filamento sea continuo desde la primera toma hasta agotamiento de la materia prima.

Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue eliminar la manipulación manual de la conducción del filamento polimérico de PAN a través del baño de coagulación por medio de un brazo robótico que describa una trayectoria lineal y posteriormente vertical para conducir el filamento desde la salida de la boca extrusora hasta la puesta en los rodillos de estiramientos. Se empleó un equipo extrusor construido en trabajos anteriores como punto de partida del movimiento del robot cartesiano y el brazo robótico.

En particular se diseñó y construyó un robot cartesiano con terminación de brazo robótico automatizado y controlado por medio de un sistema embebido integrado por (i) sistema de traslación del robot a través de un riel de tubular de acero al carbón comercial de 1 in, con longitud lineal de 2m, previsto de rodamientos, bandas y poleas dentadas, motor DC con reductor 6v 130 RPM JGA25-370, motor de engranajes de impresora convencional y tornillería y piezas plásticas diversas de sujeción; (ii) sistema embebido de control consistente en una caja de control (carcasa de CPU convencional) prevista de una fuente de alimentación para proveer al sistema con energía de 5 y 12v, un microcontrolador de tipo Arduino ATmega2560, potenciómetro Encoder rotatorio KY-040, un módulo puente H L298N, un módulo bluetooth HC-06, placa protoboard 830p y cables de Ethernet y jumper dupont diversos para la comunicación serial; y, (iii) brazo robótico angular diseñado y construido en impresora 3D con material de poliláctico (PLA) equipado con servomotores MG996R y MG90S con punta en forma de *gripper* aluminio MG995. Todos los elementos mecatrónicos fueron controlados por un lenguaje programable para microcontroladores Arduino junto una interfaz en software LabVIEW y MIT App Inventor para mantener trayectorias lineales y formar ángulos rectos. Se obtuvieron los diagramas electrónicos del sistema embebido empleando software de acceso libre *Proteus* y *Fritzing*.

La presente propuesta de eliminar la manipulación manual de la conducción del filamento polimérico de PAN a través del baño de coagulación permitió minimizar las pérdidas de material por cortes en su conducción dentro del baño coadyuvando a que se mantenga cierta resistencia mecánica del filamento (valor no cuantificado en este trabajo) y pueda ser empleado en etapas subsecuentes.

El presente trabajo tiene como antecedentes la continuidad de un desarrollo tecnológico con madurez tecnológica TRL 4 – reporte técnico – de los autores Dena-Aguilar *et al.* (2018) bajo el proyecto “diseño y construcción de un sistema de extrusión en frío de bajo volumen para la obtención de fibras poliméricas” – donde se desarrolla un equipo extrusor capaz de producir filamentos poliméricos mediante hilatura en húmedo: transferencia de tecnología con la empresa MICRO REFINERÍA S DE RL DE CV y donde se cuentan con los derechos intelectuales para su aprovechamiento con fines académicos.

Esta Tesis es una continuidad más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue realizado de manera grupal. Por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis.

Este trabajo es parte de un proyecto global de un sistema de hilatura integral que comprende etapas de síntesis, extrusión y estiramiento y bobinado de un filamento polimérico. Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto proponente. Por tanto, los productos entregables de los participantes comparten las mismas secciones básicas del documento de Tesis con la diferencia de los resultados logrados en módulos de proceso diferentes.

Este estudio presenta los logros alcanzados de la etapa de extrusión enfocado al proceso de coagulación con el diseño, construcción, automatización y control de un robot cartesiano con terminación en brazo robótico bajo diseño propio. Lo anterior bajo autorización y aprobación de la Academia de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un robot de coordenadas cartesianas con brazo robótico mediante la integración de elementos mecánicos, eléctricos y de control y automatización para el transporte de un filamento polimérico de un sistema de hilatura.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar mecánicamente el robot cartesiano y brazo robótico mediante software de diseño para definir dimensiones, componentes y funcionamiento del sistema.

- Construir el robot cartesiano y brazo robótico mediante el uso de materiales de fácil adquisición para la integración de componentes de control y automatización del sistema de transporte.
- Diseñar los diagramas electrónicos mediante software de automatización de acceso libre *Proteus* y *Fritzing* para validar el funcionamiento del sistema embebido previo a su construcción.
- Construir el sistema embebido de *open source* en Arduino mediante la integración de elementos de hardware y electrónica modular para desarrollar el sistema de control (código de programación) del robot cartesiano y del brazo robótico.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la industria textil las fibras acrílicas, como las de PAN, son fibras sintéticas que en forma de hilo son empleadas en un gran número de productos textiles como colchas, tapetes, guantes, entre otros. Por lo que se considera que estas fibras tienen posibilidades de aplicación en sistemas de fuentes alternas de energía debido a que su aspecto es similar a la lana natural, pero son de mayor suavidad y de mantenimiento más simple.

La fabricación de fibras de PAN puede realizarse empleando una técnica denominada hilatura en húmedo que se caracteriza por el uso de disolventes para disolver el polímero y obtener un fluido de hilatura. El fluido de hilatura mediante un proceso de extrusión se transforma en filamentos cuando se hace pasar el fluido por una boca extrusora (también llamada hilera), la cual se encuentra sumergida en un baño de coagulación. El baño de coagulación contiene un fluido específico en función del tipo de polímero y disolvente utilizado. En este caso para fibras de PAN la solución del baño de coagulación puede ser una solución agua:dimetilformamida en una relación 10:1 volumen/volumen. La función del baño de coagulación es la de solidificar el filamento y retirar las trazas de solvente adheridas al filamento. El DMF es un solvente orgánico que presenta un nivel bajo de toxicidad aguda y causa irritaciones de leves a moderadas en ojos y piel. Por lo que no se recomienda el contacto directo con esta sustancia en tiempos prolongados.

Debido a que el filamento debe ser transportado por toda la longitud del baño de coagulación, para asegurar una adecuada precipitación y la eliminación de la mayor presencia de trazas de disolvente, se requiere de un sistema de transporte automatizado que realice la función de trasladar el filamento por el baño y así evitar el uso de sujeción manual por el operador y sus consecuencias a la salud de él.

Por lo que resulta necesario el poder implementar acciones de control a través de mecanismos automatizados mecatrónicos para realizar la sujeción y transporte del filamento polimérico a través del baño de coagulación para evitar daños a la salud del operador. En este proyecto se contempla como una de estas acciones el diseño y construcción de un robot cartesiano con brazo robótico controlado por medio de un sistema embebido integrado por sistema de traslación, área de control y brazo robótico con servomecanismos. Todos los elementos controlados por software y hardware de acceso libre Arduino. El estudio se enfocó a una extrusión de polimérica de fibras de PAN.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible diseñar y construir un robot cartesiano automatizado para el transporte de un filamento polimérico por medio de un brazo robótico a través de un baño de coagulación.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

El alcance del proyecto solo abarca el diseño y construcción del robot cartesiano previsto con un brazo de sujeción para el transporte de un filamento polimérico por una cámara de coagulación polimérica.

El robot de coordenadas cartesianas tendrá un sistema de control a base de software embebido Arduino para definir la trayectoria lineal de transporte de un punto A hacia un punto B.

Esta fuera de alcance del proyecto la validación del equipo construido con respecto a la cantidad de polímero obtenido de un proceso previo (extrusor polimérico).

Esta fuera de alcance desarrollar pruebas experimentales robustas con procesamiento y traslación de un filamento polimérico desde un equipo extrusor prefabricado.

Las pruebas de funcionalidad solo se basaron en la respuesta del robot cartesiano y del brazo robótico para moverse en los ejes x , y e z desde la interfaz desarrollada.

Ninguna transferencia de tecnología es promovida.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 POLÍMEROS

Los polímeros son considerados macromoléculas debido a que son de gran tamaño y están constituidos por grandes cadenas de moléculas enlazados como eslabones. Los polímeros se obtienen de moléculas más sencillas llamadas monómeros, los cuales están unidos mediante enlaces covalentes. Los polímeros tienen una matriz formada por átomos de carbono y pueden contener enlazados a ellos grupos funcionales laterales o radicales con uno o más átomos de otros elementos. Los polímeros constituyen los materiales plásticos de uso habitual.⁶

2.1.1 Características generales de un polímero

Entre otras características, podemos mencionar su capacidad de poder ser procesados en diferentes formas por su bajo punto de fusión, son ligeros por su baja densidad, permiten ser empleados como aislantes por su pobre conductividad eléctrica, algunos son termoestables o termoplásticos por sus respuestas diferentes a la acción de la temperatura y tienen poca reactividad una vez en su estado final.⁷

2.1.2 Mecanismos simples de polimerización, poliacrilonitrilo (PAN) y dimetilformamida (DMF)

Los métodos de polimerización más comunes pueden ser por adición, condensación o por radicales libres en solución.^{6, 8} La polimerización por adición se presenta cuando el monómero forma parte de la cadena del polímero sin pérdida de átomos donde no se generan subproductos. La polimerización por condensación ocurre cuando el monómero pierde átomos al formar parte de la cadena principal del polímero y por tanto se generan subproductos. La polimerización por radicales libre se presenta cuando un radical obtiene una actividad iniciadora que permite que moléculas de monómeros se vayan adicionando a la cadena principal. Al momento de perder esta actividad radical se detiene el crecimiento de la cadena.

En particular, el poliacrilonitrilo (PAN), ha sido sintetizado por métodos de polimerización por radicales libres.³ Siendo el PAN de especial interés dentro de la industria textil por sus capacidades de conformarse en fibras textiles o ser componente de varios copolímeros de importancia como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) que es ampliamente en la industria de la impresión en 3D. El PAN durante su síntesis, se conforma por la unión de varias cadenas de su monómero de acrilonitrilo.⁹ En la Figura 1, se presenta un esquema del PAN donde las moléculas más pequeñas representan los átomos de hidrógeno (H), las de tamaño mediano con ligadura sencilla (color gris) representan los átomos de carbono (C) y las moléculas con triple ligadura (color azul) los átomos de nitrógeno (N). En la Figura 2, se muestra el proceso de polimerización del PAN donde el monómero se polimeriza por radicales libres para dar paso a la formación del polímero.

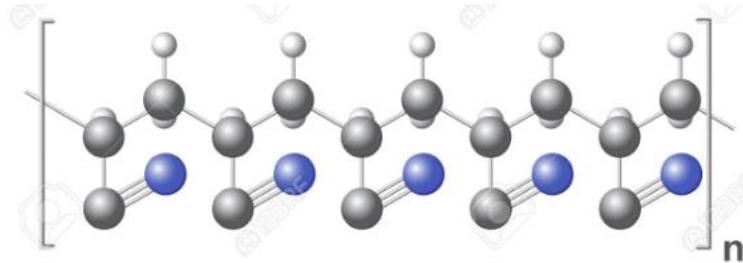


Figura 1. Estructura en cadena del poliacrilonitrilo (copyright 123RF, autor Lebedev, A.).

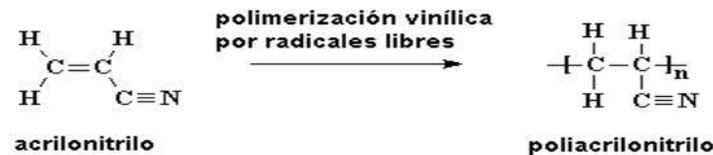


Figura 2. Representación de la polimerización por radicales libres del PAN.⁷

Por otro lado, el dimetilformamida (DMF) es empleado usualmente como disolvente por sus propiedades químicas de miscibilidad en agua y en la mayoría de los componentes orgánicos. Típicamente es usado en la elaboración de fibras acrílicas como el PAN y en plásticos, entre otros usos.¹⁰ Sin embargo, el contacto directo por tiempos prolongados puede provocar daños a la salud dado que presenta un grado de nivel bajo de toxicidad aguda y causa irritaciones de leves a moderadas en ojos y piel.⁵

2.2 EXTRUSIÓN

La extrusión es un proceso comúnmente empleado para fabricar plásticos. Consiste de hacer pasar un material fundido a través de un dado de extrusión para darle una forma geométrica de sección transversal diferente a su origen. Mediante este método se pueden fabricar diversos objetos de metal como marcos de puertas y ventanas, tubos de diferentes secciones transversales, entre otros.¹¹

2.2.1 Extrusión de polímeros

Una máquina extrusora es un equipo que permite llevar a cabo un proceso de extrusión. Primeramente, el material de trabajo se reduce de tamaño para ser suministrado a la máquina mediante una tolva de alimentación. Mediante un tornillo denominado husillo se va transportando el material fundido a través de resistencias eléctricas. El husillo hace que el material sea forzado a pasar por una boca extrusora (troquel) para convertirse en un producto de polímero continuo y nuevo. El ablandamiento y fundición del polímero se logra por dispositivos calefactores,

que se encuentran colocados sobre el cañón donde la temperatura del material es controlada por termopares. Una vez que el material extruido sale del dado extrusor, es enfriado por aire soplado o en baño de agua o solución acuosa de un solvente específico.¹²

En la Figura 3, se muestra el principio básico de extrusión en un contenedor simple (*container*). Mediante una fuerza mecánica, proporcionada por ejemplo por un pistón (*ram*), se fuerza el paso de una solución de moldura (*billet*) por un dado extrusor (*die*). El producto extruido adopta la geometría de sección transversal del dado como por ejemplo un filamento polimérico (*extruded product*).¹¹

En la Figura 4, se presenta una vista general de una maquina extrusora. Las partículas del material a extrudir, en forma de pellets, se alimentan a la maquina extrusora mediante una tolva de alimentación (*hopper*). Mediante el tornillo husillo (*screw*) el material que comienza a fundirse en conducido a lo largo del cañón o barril (*barrel*) hasta hacerlo pasar por un dado extrusor colocado en la boquilla (*nozzle*) del barril que le da forma determinada al polímero extruido (*polymer*). Se observan los dispositivos de calefacción (*heaters*) colocados sobre el área del barril y la localización de termocoples para control de la temperatura del sistema.¹²

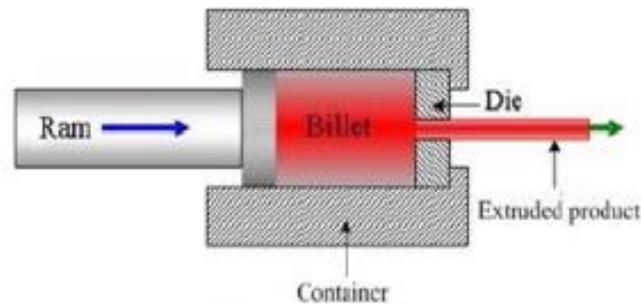


Figura 3. Principio básico de un proceso de extrusión simple.¹¹

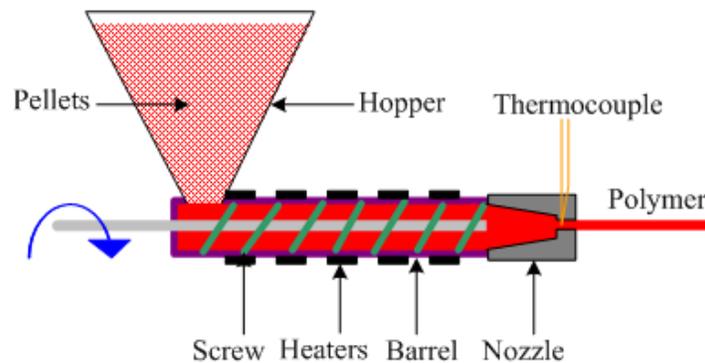


Figura 4. Máquina de extrusión simple.

2.3 HILATURA EN HÚMEDO

Es un proceso donde se utiliza un solvente no volátil para convertir la materia prima en una solución coloidal de hilado (fluido de hilatura). Obtenido el fluido de hilatura se somete a un proceso convencional de extrusión haciéndolo pasar a través de una boca extrusora (hilera). Después de la extrusión, el disolvente adherido al material se elimina en un medio de coagulación líquido. Finalmente, el hilo de filamento se enrolla inmediatamente en bobinas o se trata adicionalmente para ciertas características deseadas o uso final. Una de las ventajas de este proceso que se pueden manejar grandes volúmenes de producción. Algunas de las desventajas es que es un proceso lento, requiere de un proceso adicional de lavado para eliminar impurezas y comúnmente no se logran recuperar los solventes y químicos empleados.¹³ La hilatura en húmedo funciona como un intercambiador de calor pues mantiene la solución polimérica con una temperatura por debajo o encima de la temperatura ambiente. Para lograr esto el proceso de hilatura en húmedo se fundamenta en una precipitación sin ninguna regeneración química. La velocidad de coagulación (aproximadas a 150 m/min) tiene una gran influencia en las propiedades finales de la fibra (propiedades de tensión) por lo que se deben cuidar las variables de operación como concentración y temperatura de la solución de hilatura, concentración, temperatura y composición del baño de coagulación y la fuerza de estiramiento aplicado durante el hilado. Una vez que los filamentos coagulados salen del baño se canalizan a un sistema de rodillos para un estiramiento o bobinado. Adicionalmente y antes del estiramiento las fibras pueden hacerse pasar por un proceso de lavado o secado.¹⁴ En la Figura 5, se muestra una vista esquemática de los procesos de estirado (*stretching*), lavado (*washing*), secado (*drying*) y bobinado (*winding*) que se puede dar a un filamento una vez que sale del baño de coagulación. En la Figura 6, se presenta un arreglo general de un proceso de hilatura en húmedo. En el baño de coagulación (*spin bath*) se tiene la hilera (*spinneret*) sumergida donde los filamentos al entrar en contacto con la solución coagulante se solidifican y se desprenden del exceso de solvente. Los hilos del filamento obtenido se conducen a un proceso posterior de lavado o estirado.

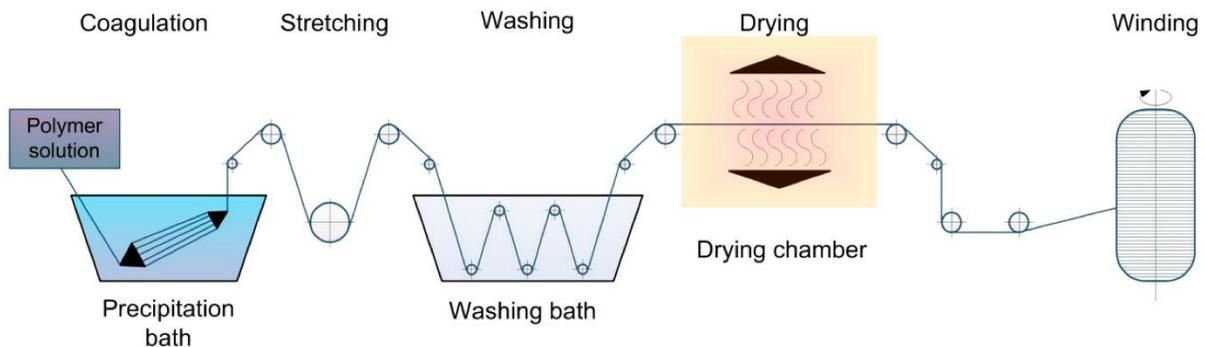


Figura 5. Vista esquemática de procesos alternos de hilatura en húmedo después del baño de coagulación.¹⁵

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

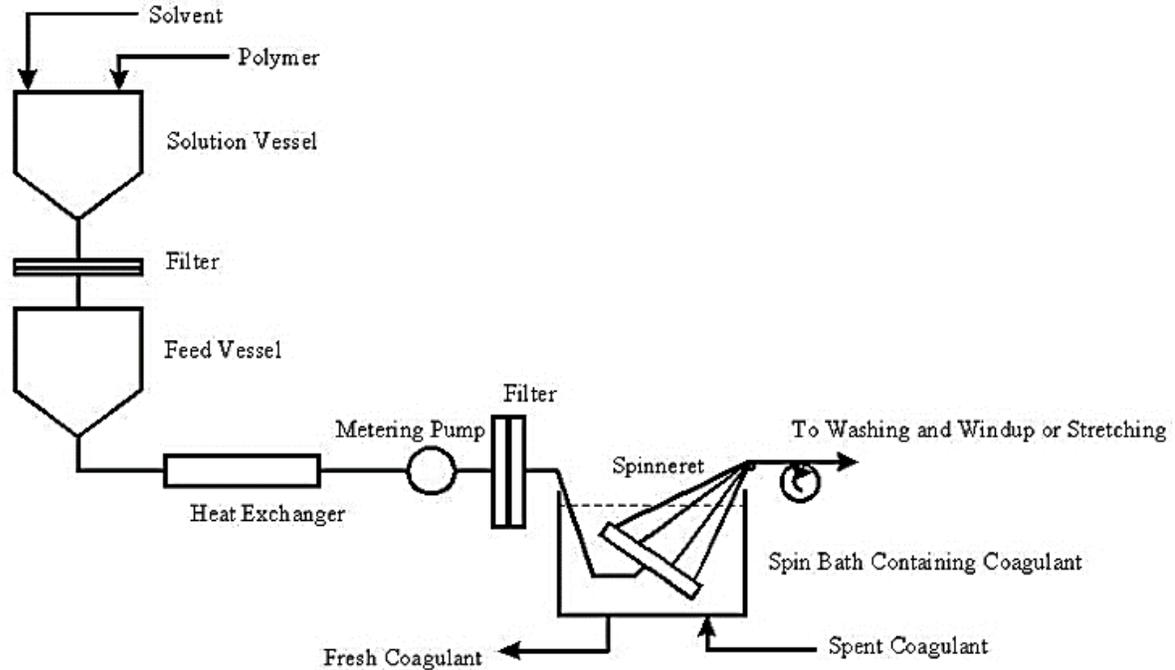


Figura 6. Hilatura en húmedo.¹⁴

En la Tabla 1 se presentan un comparativo entre el proceso de hilatura en húmedo contra otros mecanismos como hilatura por fusión (extrusión) e hilatura en seco. Datos traducidos del trabajo reportado por Rahman-S. (2015).¹³

Tabla 1. Cuadro comparativo de procesos de hilatura.

CARACTERÍSTICA	HILATURA POR FUSIÓN	HILATURA EN SECO	HILATURA EN HÚMEDO
Tipo de fibra producida	Filamento y fibra cortada	Solo filamento	Filamento y fibra cortada
Productividad	Alto	Alto	Bajo
Costo de inversión	Bajo	Alto	Bajo
Solvente	No requiere	Solo solventes orgánicos volátiles	solventes orgánicos o inorgánicos
Daño al medio ambiente	No toxico	Toxico	Toxico
Calor para el hilado	Alto	Muy alto	Bajo
Velocidad de hilatura	2500-3000 ft/min	2500-3000 ft/min	150-300 ft/min
Agujeros de la hilera	2000	300-900	20000-75000
Aplicaciones	Producción de poliéster, nylon, olefinas, y fibras de vidrio.	Producción de acetato, triacetato y algunos acrílicos, acrílicos modificados y fibras vinílicas (PVC, PVA)	Produccion de PVC, PVA, rayon, fibras acrílicas y acrílicas modificadas

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

En la Figura 7, se muestra una máquina industrial de hilar textiles de Wuxi City Lanhua Textile Equipment Co. Se aprecia un depósito que hace la función de un baño de coagulación por lo que se considera que aplica el principio de hilatura en húmedo para su operación previo a su paso por el sistema de rodillos adjuntos.¹⁶ Es de resaltar que por ser secretos industriales es muy escasa la información disponible sobre este tipo de máquinas, sin embargo, en https://www.youtube.com/watch?time_continue=70&v=PRRl4kVyabc&feature=emb_logo se puede observar el interior del diseño de una máquina de la misma empresa donde el diseño contempla también el principio de hilatura en húmedo, ver Figura 8 (la flecha señala el baño de coagulación).



Figura 7. Máquina para hilar textiles con hilatura en húmedo (copyright Lanhua Co.).



Figura 8. Máquina de hilado en húmedo (copyright Lanhua Co.).

2.3.1 Baño de coagulación

El baño de coagulación según Galiano (2016) se puede llamar medio de coagulación, baño no solvente, medio de precipitación o medio de inversión de fase (líquido a sólido). Se trata de un baño líquido que proporciona la precipitación correcta y el aspecto sólido a un fluido de hilatura de polímero extruido o fundido. Generalmente está compuesto por agua o algunos solventes orgánicos como el DMF. El baño resulta de suma importancia para lograr una correcta solidificación del polímero de estudio.¹⁷ La importancia del medio de coagulación radica en que le otorga las primeras propiedades mecánicas a la fibra obtenida. Un medio no adecuado provocaría un filamento altamente quebradizo que no permitiría pasara a etapas de tratamiento posteriores.

En la Figura 9, se observa la vista esquemática de un laboratorio a escala para hilatura en húmedo donde se dispone de un baño de coagulación de inmersión (*coagulation bath*).¹⁸

2.4 EQUIPO DE EXTRUSIÓN HECHO A LA MEDIDA

Dena-Aguilar *et al.* (2018) presentaron un informe técnico de un desarrollo tecnológico de nivel de madurez TRL 4 consistente en el diseño y construcción de un sistema de extrusión en frío de bajo volumen para la obtención de fibras poliméricas. Siendo un equipo funcional bajo modalidad de transferencia de tecnología. En la Figura 10, se presenta el equipo diseñado. El dispositivo se alimenta de una solución coloidal de hilatura y mediante aire a presión (efecto pistón) se fuerza hacer pasar el fluido por una boca extrusora (diámetro de orificio 0.4mm). Al momento de hacer contacto la solución de hilatura con el medio de coagulación se observa un cambio de fase (precipitación) por lo que se forman filamentos poliméricos. Es de resaltar que los autores reportan pruebas con el equipo empleado un bañode coagulación de 3L de volumen con una solución acuosa al 10% de dimetilsulfoxido.¹⁹

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

Los autores emplearon copolímeros injertados de poliacrilonitrilo con algodón para obtener la solución de hilatura de concentración peso-peso 10:90 % polímero-solvente.

El equipo presentado permite abarcar la etapa de extrusión previa al transporte del filamento por el baño de coagulación. El filamento del extrusor hecho a la medida sería el objeto de prueba para validar (trabajo a futuro) del presente trabajo.

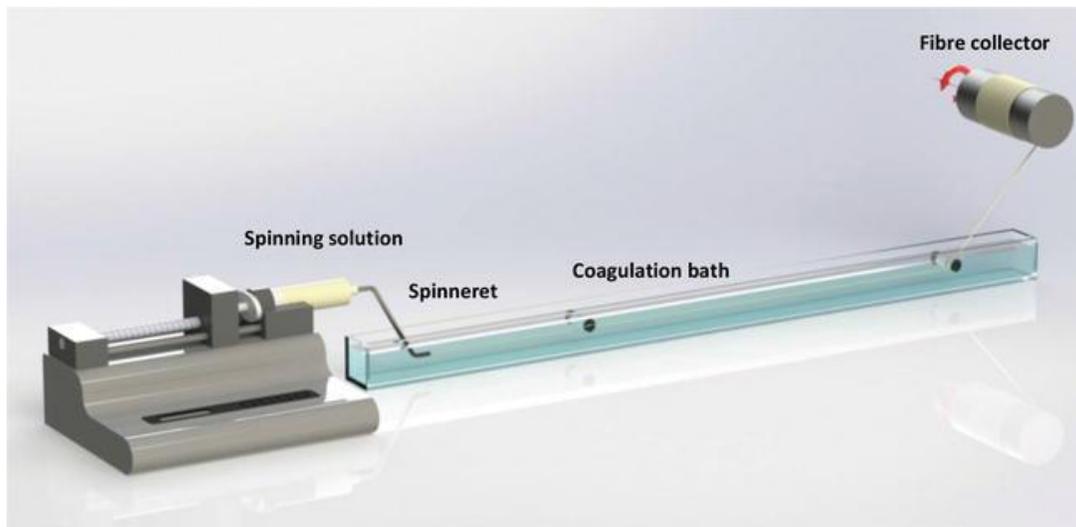


Figura 9. Vista esquemática de un laboratorio a escala de hilatura en húmedo.



Figura 10. Vista frontal extrusor simple de bajo volumen.

En la Figura 11, se presenta un acercamiento de la punta extrusora del extrusor reportado por Dena-Aguilar *et al.* (2018).



Figura 11. Vista de la boquilla y punta extrusora del extrusor empleado para validar robot cartesiano.

2.5 ROBOT CARTESIANO

La característica principal de un dispositivo tipo robot cartesiano es que presenta movilidad conforme las coordenadas cartesianas en los tres ejes ortogonales, x , y e z . Donde el eje axial, x , generalmente esta soportado por un elemento de longitud completa y los ejes y e z se encuentran generalmente voladizos. Adicional a lo anterior, un robot cartesiano se caracteriza por realizar movimientos coordinador mediante un controlador de movimiento común.²⁰

Típicamente se confunde que un robot es una simple máquina, sin embargo, se distinguen grandes diferencias según su concepto. Una maquina convencional ejecuta repetidamente y con precisión un conjunto de instrucciones de movimientos coordinados con la característica que no actúa por sí mismo ni responde a cambios en su entorno. Caso contrario, un robot, además de realizar las mismas funciones de una maquina puede tener conciencia de su entorno y ejecutar actividades de respuesta lo que le permite realizar más actividades que una maquina convencional.²¹

2.5.1 Lenguaje de programación de un robot cartesiano

En el ambiente de la robótica se emplean comúnmente los lenguajes de programación C y C++ debido a que estos permiten la ejecución de altos algoritmos dentro del desarrollo integrado y con programación en tiempo real para la toma de decisiones de control, percepción y movimiento robótico, respectivamente. La programación se realiza punto a punto a base de los comandos propios del lenguaje ya sea de manera remota o in situ. Para guiar al robot por los puntos requeridos se emplean distintas soluciones de guiado:²²

- a) **Guiado Pasivo:** Cuando el programador suministra de manera directa la energía para mover al robot mientras los actuadores están fuera de línea. Se pueden distinguir dos tipos de guiado pasivo:
- **Guiado Pasivo Directo:** El programador conduce las extremidades del robot hacia los puntos deseados mediante trayectorias establecidas.
 - **Guiado Pasivo por Maniquí:** Se emplea un robot “maniquí” que es programado igual que el robot real. El robot maniquí es programado de la mano con el robot real con las funciones requeridas para validar que las instrucciones se siguen por ambos adecuadamente.
- b) **Guiado activo:** El propio sistema de accionamiento del robot es controlado por un centro de mando (*joystick*) que hacer mover las articulaciones. Según la potencia del sistema, se habla de guiado básico y guiado extendido:
- **Guiado Básico:** El robot es guiado por puntos de recorridos secuenciales bajo el mismo orden en el que se programan las trayectorias.
 - **Guiado Extendido:** Además de especificar los puntos de la trayectoria se logra aumentar la potencia del sistema de programación determinando bases de datos relativos a la velocidad, tipo de trayectoria, precisión con la que se quiere alcanzar los puntos, control del flujo del programa, atención a entradas/salidas binarias, entre otras.

Otro método de programación de un robot cartesiano es a través de programación textual donde el programa se constituye de una serie de instrucciones en forma de texto que se programan fuera de línea son tener el robot conectado. Se caracteriza este modelo de programación porque las acciones del brazo se calculan dentro del programa. Las instrucciones textuales pueden ser del tipo:²²

- **Articular,** cuando los movimientos programados se centran en las articulaciones de movimiento del brazo.
- **Cartesiano,** cuando los movimientos programados se centran en el plano cartesiano relacionados con el sistema de manufactura final del trabajo.

2.5.2. Tipos de robots cartesianos

Se pueden distinguir de tipo estándar o compacto, lineal o de tipo pórtico:^{23,24}

1. **Robot estándar:** se puede habilitar con cualquier combinación de ejes (horizontal, vertical, profundidad). Por ejemplo, el eje y puede ser el eje vertical y el eje z ser el horizontal. Puede tener integrados servomotores o actuadores neumáticos para controlar las rotaciones u , w , y j . En la Figura 12, se presenta una vista esquemática de un robot cartesiano en la versión estándar.
2. **Robot compacto:** es básicamente un robot versión estándar con la diferencia que la combinación de ejes se diseña para rotaciones específicas, ver Figura 13.
3. **Robot lineal:** el robot permite describir movimiento de traslación de trayectos generalmente descritos por rieles de conducción, ver Figura 14.
4. **Robot pórtico:** es básicamente un robot versión compacto donde un eje puede tener recorridos en altura por medio de una transmisión dual se soporte, ver Figura 15.

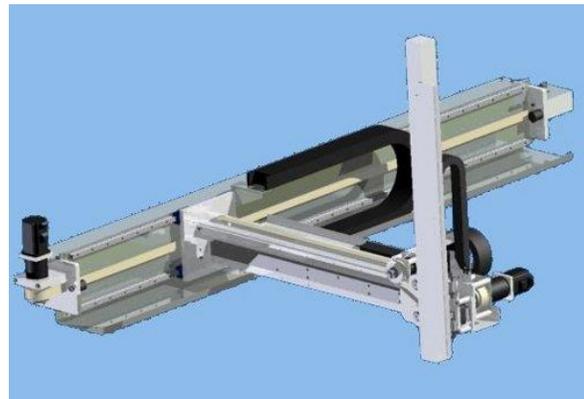
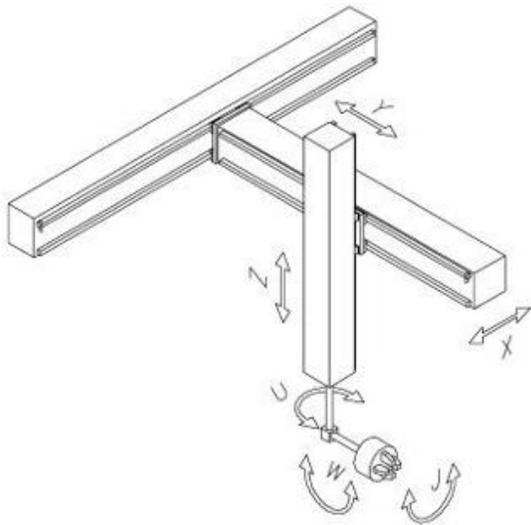


Figura 12. Robot cartesiano versión estándar: vista esquemática (izq.) y caso práctico (der.).

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

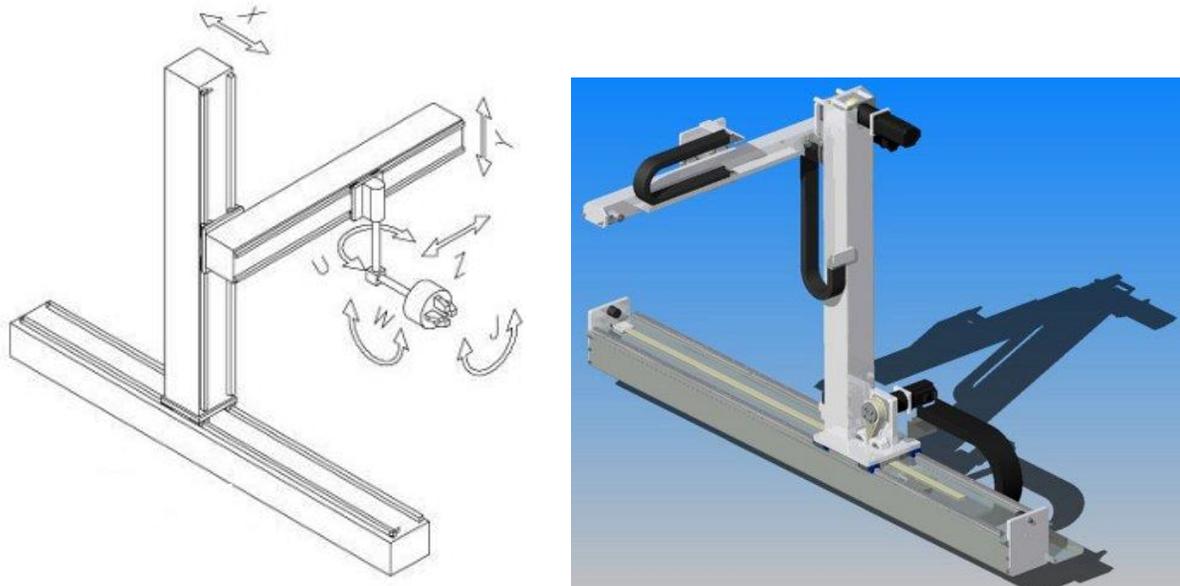


Figura 13. Robot cartesiano versión compacto: vista esquemática (izq.) y caso práctico (der.).



Figura 14. Robot cartesiano lineal: vista esquemática.

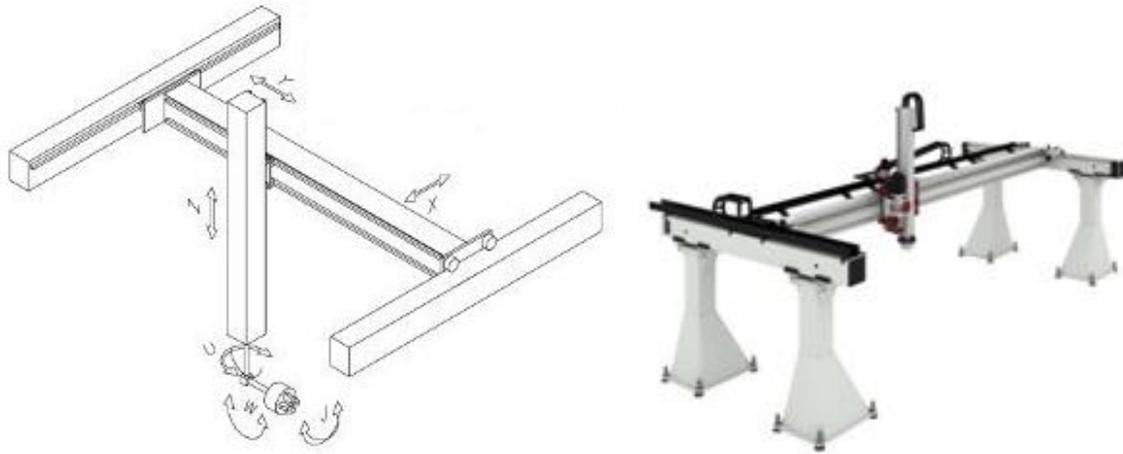


Figura 15. Robot cartesiano de pórtico: vista esquemática (izq.) y caso práctico (der.).

2.6 BRAZO ROBOT

Un brazo robótico también conocido como brazo mecánico trata de emular el movimiento natural de un brazo del ser humano a través de instrucciones y funciones programables. En la Figura 16, se presenta un esquema análogo entre el brazo del ser humano y un brazo robótico. Las articulaciones naturales del brazo humano (hombro, codo, muñeca y dedos) se logran en el brazo robótico a través de sensores, actuadores y piezas de soporte a la medida.^{25,26}

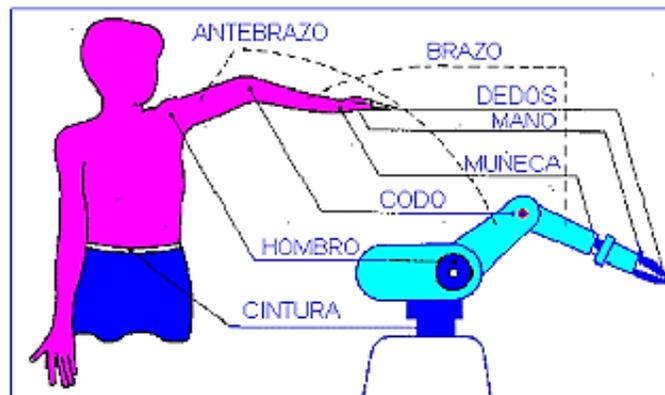


Figura 16. Esquema comparativo de un brazo humano vs un brazo robótico: articulaciones y movimientos.

Los brazos robóticos se pueden clasificar en diferentes tipos de brazos conforme los movimientos de sus articulaciones:²⁶

- **Robot cartesiano:** sus articulaciones coinciden con los tres ejes cartesianos.
- **Robot cilíndrico:** sus articulaciones se desplazan bajo un sistema de coordenadas de círculos concéntricos.
- **Brazo esférico o polar:** sus articulaciones se mueven conforme un sistema polar de coordenadas que le permiten una rotación completa a lo largo de un rango esférico.
- **Robot SCARA:** sus movimientos de basan en recoger y colocar dado que sus dos articulaciones son rotatorias paralelas.
- **Robots articulados:** cuenta con tres articulaciones que giran sobre si mismas logrando una mayor rotación de trabajo para movimientos angulares. Son los más empleados para tareas complejas.

2.6.1 Componentes de un brazo robótico

Los brazos robóticos están compuestos de una gran variedad de piezas y partes integrados de tal forma que le brindan la movilidad articular deseada. Se pueden distinguir las siguientes partes de un brazo robotico:²⁷

- a) **Controladores:** Los controladores son dispositivos que permiten controlar los movimientos del brazo ya que actúan como sus cerebros. Bajo un programa poder actuar de manera automática (p.e. microcontrolador) o en su caso ser operados manualmente conforme indicaciones alimentadas por el usuario (p.e. joysticks).
- b) **Brazos:** El brazo es la sección principal del brazo robótico que da soporte al sistema y se conforma de tres articulaciones: hombro, codo y la muñeca. El hombro se soporta de la base del brazo que permite el movimiento hacia adelante, hacia atrás o girar.
- c) **Efactor final:** Actúa como la mano del brazo robótico y cuenta con terminaciones de dos o tres sujetadores (garras) que abren y cierran por programación.
- d) **Unidades:** Son los motores instalados entre las articulaciones que controlan el movimiento y las maniobras.
- e) **Sensores:** se integran al cuerpo del brazo para detectar su entorno e interactuar conforme las indicaciones descritas.

En la Figura 17, se presenta un diseño tridimensional de un brazo robótico. Las articulaciones de este modelo permiten el transporte de objetos o selección de piezas de una línea de producción.²⁸ En la Figura 18, se muestra un esquema general del movimiento básico de un brazo articulado donde se aprecian las articulaciones fundamentales para este tipo de brazos.²⁹

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

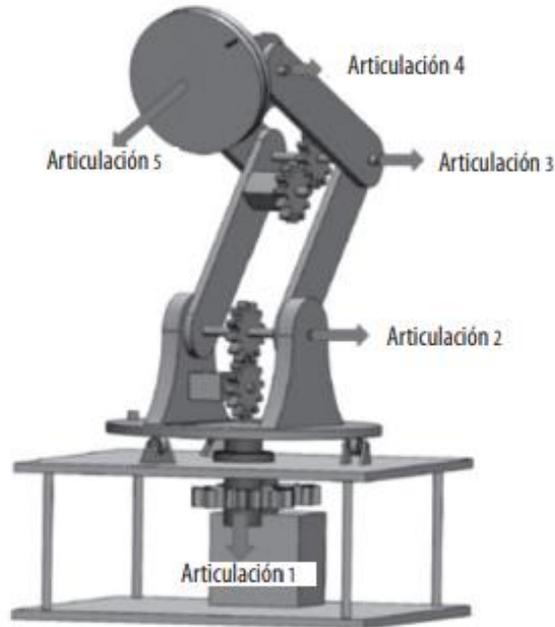


Figura 17. Diseño tridimensional de un brazo robótico académico con articulaciones simples.

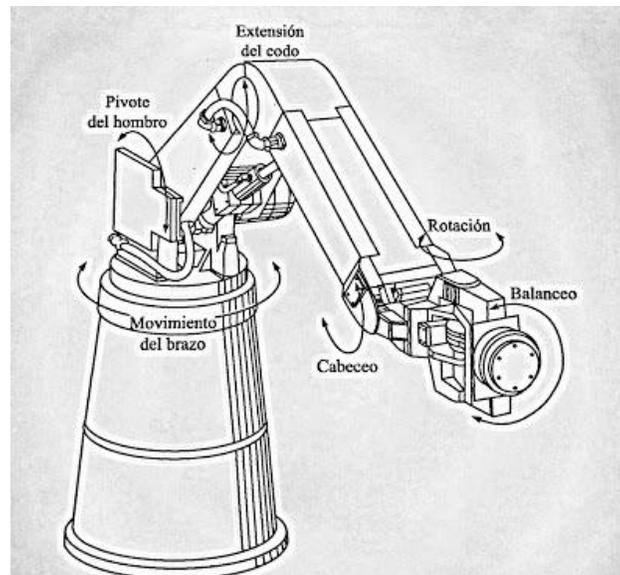


Figura 18. Esquema de un brazo robótico articulado.

2.7 CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO

Diversos elementos de electrónica modular se pueden (i) integrar a un robot cartesiano para lograr su movimiento en los ejes del plano cartesiano y (ii) acoplar en los brazos robóticos para poder dar la movilidad a sus articulaciones. Adicional a lo anterior es importante el desarrollo o uso de una interfaz o un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permita controlar y comunicar los diversos elementos de control y automatización.

2.7.1 Microcontroladores

Son dispositivos controladores que permiten controlar multitudes de elementos periféricos. Entre los más comunes encontramos los microcontroladores Arduino y Raspberry Pi, ambos se distinguen por ser plataformas de código abierto basados en hardware y software modular. De acuerdo al tipo de producto microcontrolador será el IDE que se emplea para poder programar las instrucciones que permitan dar movilidad al sistema robótico. En particular, los microcontroladores pueden controlar los servomotores que dan movimiento a las articulaciones del brazo.³⁰ En la Figura 19, se presenta una vista de una placa Arduino.



Figura 19. Arduino UNO R3: microcontrolador ATmega328 (fuente: electrocrea.com).

2.7.2 Servomotores, driver de control de motores y potenciómetros

Los servomotores son motores eléctricos que permiten controlar las posiciones del eje de giro logrando mantenerlo fijos conforme se desee. Se integran de pequeños componentes mecánicos (engranes), una parte electrónica que le permite dirigir su movimiento y posición y un motor que otorga la fuerza de movimiento conforme la programación definida. Su gran virtud es que permiten giros de 360° por lo que su gama de aplicaciones es extensa. Aunque están limitados a no realizar giros mientras están en moviéndose.³⁰ En la Figura 20, se muestra un esquema de un servomotor MG996R.



Figura 20. Servo motor MG996R (fuente: electrocrea.com).

Los drivers de control de motores permiten controlar la velocidad y sentido de giro de los motores, esto es, girar a en sentido horario o anti horario, así como reducir la velocidad máxima del motor. En la Figura 21, se presenta un driver L298N puente H para dos motores.

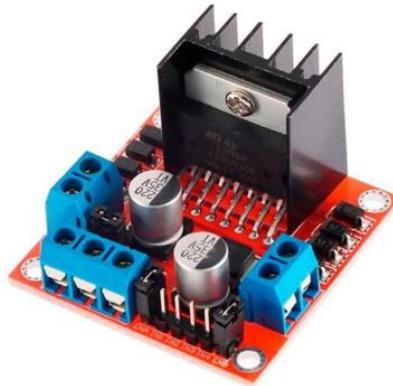


Figura 21. Driver L298N puente H (fuente: electrocrea.com).

Los potenciómetros tienen la función de limitar el paso de una corriente eléctrica creando una caída de tensión que permitirá variar una señal de respuesta. Se caracterizan por ser ajustables manualmente siendo los más comunes los de tipo rotativo que permiten convertir la posición angular del potenciómetro en un valor digital o por pulsos como por ejemplo la velocidad de giro de un motor.³⁰ En la Figura 22, se aprecia un potenciómetro KY-040 Encoder rotatorio.



Figura 22. Potenciómetro KY-040 Encoder Rotatorio (fuente: electrocrea.com).

2.7.3 Componentes CNC Robótica

Para lograr el ensamble y dar movilidad a los múltiples componentes de un robot cartesiano o un brazo robótico se emplean componentes CNC de robótica que permiten otorgar el control de movilidad del sistema. Entre otros elementos podemos mencionar piezas como: varilla roscada que permite convertir movimiento de rotación en movimiento lineal, motores a paso o motoredutores que proporcionan fuerza y control de tracción rotatoria (giro), banda dentada para impulsión sincrónica, poleas dentadas para asegurar una transmisión constante de impulsión, *switch* de interruptor de límite de corriente, *gripper* para brazo robótico para acciones de agarre y sujeción, así como diversos elementos de unión o acople como coples, chumaceras, tuercas husillo, entre otros. De la Figura 23 a la 29 se presentan esquemas de algunos de los componentes antes descrito donde todas las imágenes fueron tomadas de electrocrea.com.



Figura 23. Varilla roscada 8mm x 500mm (husillo).

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico



Figura 24. Gripper aluminio para brazo robotico.



Figura 25. Tuerca husillo trapezoidal 8mm.



Figura 26. Micro switch con palanca mouse touch.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico



Figura 27. Cople rígido 5mm-8mm.



Figura 28. Chumacera de pared 8mm.



Figura 29. 2GT 5mm 20 dientes patea dentada.



Figura 30. Motorreductor 6v 130 RPM JGA25-370.

2.7.4 Entorno de desarrollo integrado (IDE)

Un entorno de desarrollo integrado (IDE) es un entorno (ambiente) de programación de aplicación que consiste en un editor de código (lenguaje) de programación, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica. Los IDE pueden ser compatibles con las ya existentes o trabajar por si sola.³¹

Existen IDE de automatización como las plataformas Arduino y LabVIEW

2.7.4.1 Arduino

Arduino es una compañía que cuenta con su propia plataforma de código abierto para emplear hardware y software de electrónica modular de manera simple. Arduino es capaz de gobernar dispositivos mediante instrucciones a través de placas de microcontroladores. Arduino crea y utiliza su propio lenguaje de programación basado en lenguaje Wiring.³² En la Figura 31, se observa una captura de pantalla propia al abrir el IDE de Arduino.

2.7.4.2 LabVIEW

Es un software de programación de interfaz gráfica que permite al usuario visualizar las aplicaciones propuestas mediante la configuración de hardware, valores de medidas y limpieza. LabVIEW permite incorporar hardware de cualquier empresa y diseñar interfaces para los operadores. Es un software que tiene la capacidad de poder crear interfaces para aplicaciones con otras plataformas como Arduino.³³ En la Figura 32, se observa una captura de pantalla propia al abrir el IDE de LabVIEW.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

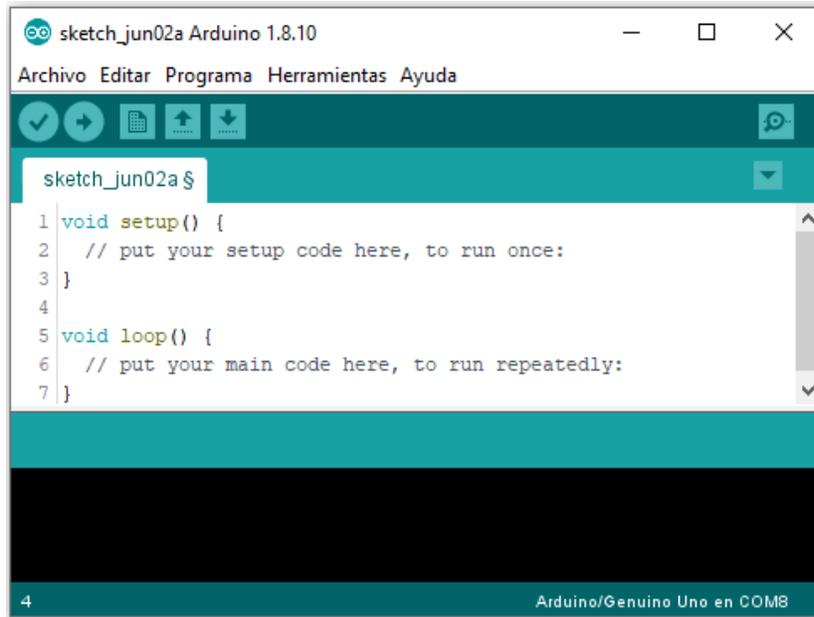


Figura 31. IDE software Arduino.

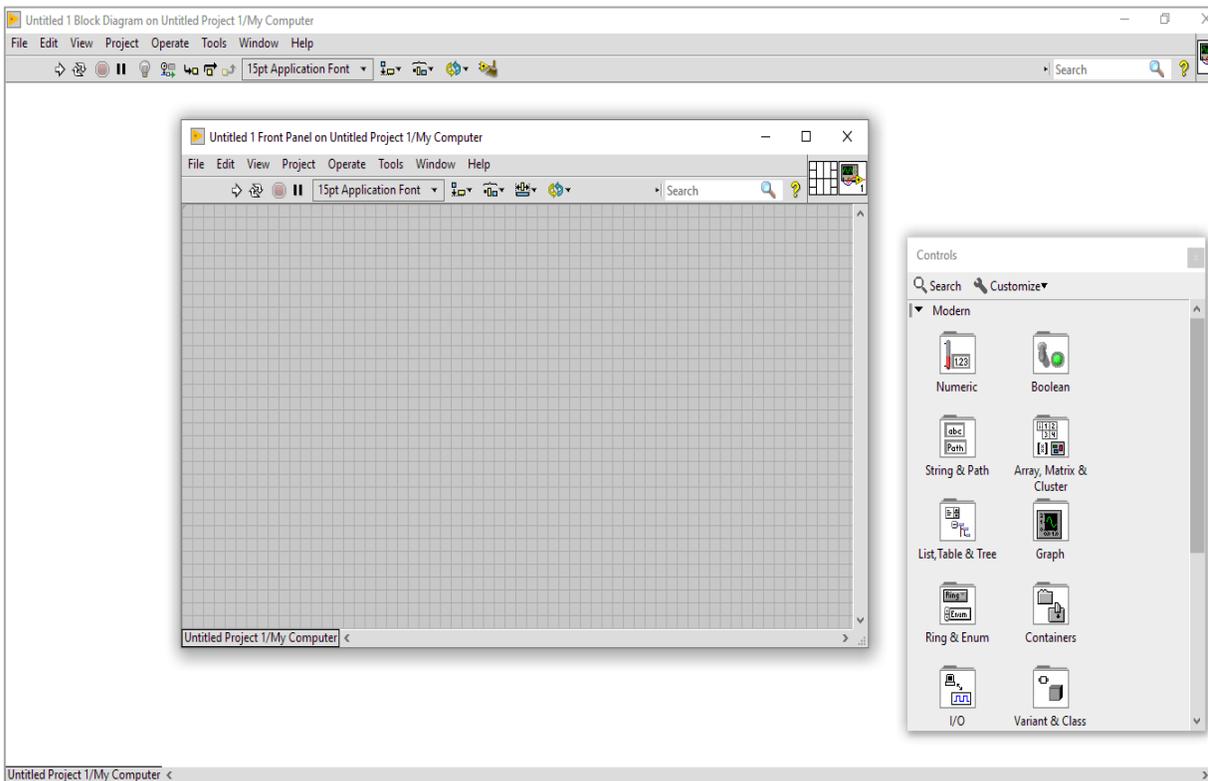


Figura 32. IDE software LabVIEW.

2.7.4.3 Proteus

Proteus es un IDE que libre acceso empleado para el desarrollo de esquemas electrónicos, construcción de la placa de circuito impreso, simulación de todo el conjunto, depuración de errores, documentación y construcción. Adicionalmente y, a la par de la realización de los diseños y esquemas electrónicos, se pueden realizar simulaciones para validar el correcto funcionamiento del sistema creado.³⁴ En la Figura 33, se muestra una captura de pantalla propia del IDE de *Proteus* con un esquema eléctrico y una simulación cargada para observar el comportamiento del circuito y cómo reaccionarían las señales digitales por medio de un osciloscopio.

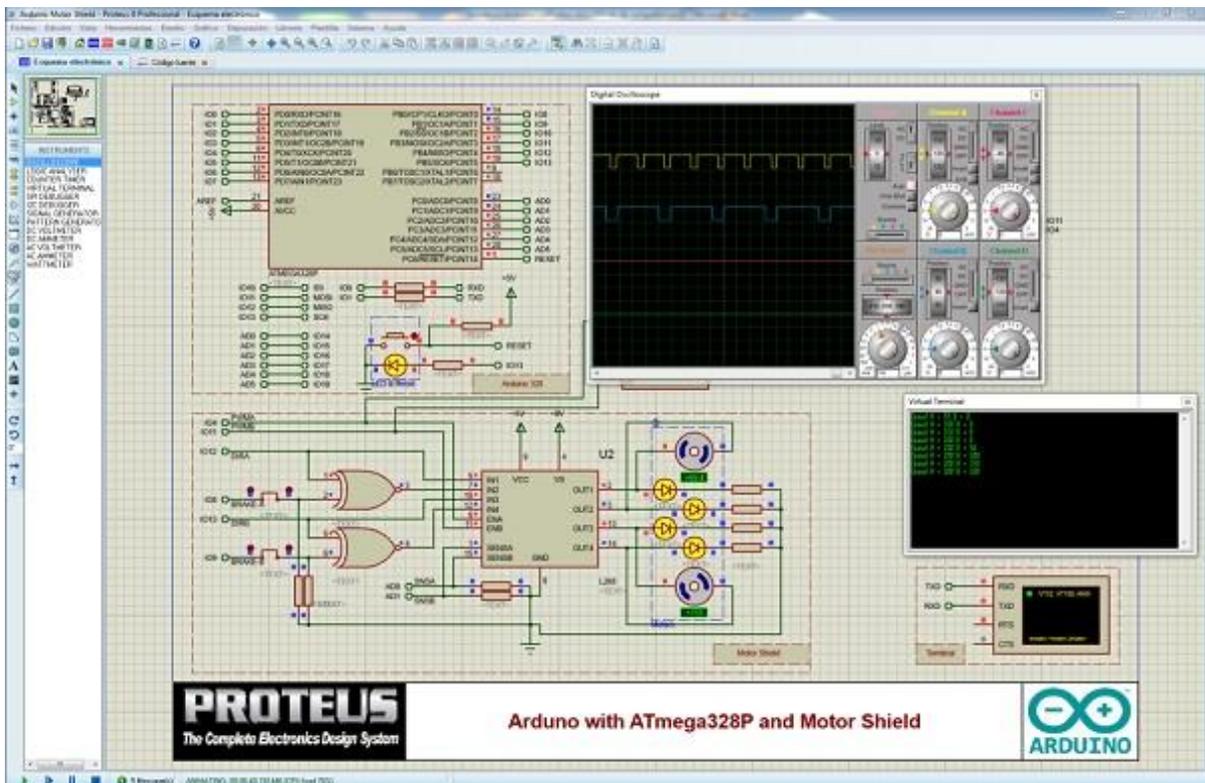


Figura 33. IDE software Proteus: motor de simulación de circuitos electrónicos.

2.7.4.4 MIT App Inventor para aplicaciones móviles APK

Es un IDE creado por la empresa desarrolladora de servicios de internet, software y dispositivos electrónicos *Google*. App Inventor permite satisfacer la demanda para la elaboración de aplicaciones destinadas a sistema operativo Android, con un lenguaje gratuito y de fácil empleo que pueda ser conectado a la red por medio de un dispositivo móvil.³⁵ En la Figura 34, se muestra el IDE de App Inventor donde la programación tipo bloques es de fácil uso lógico.

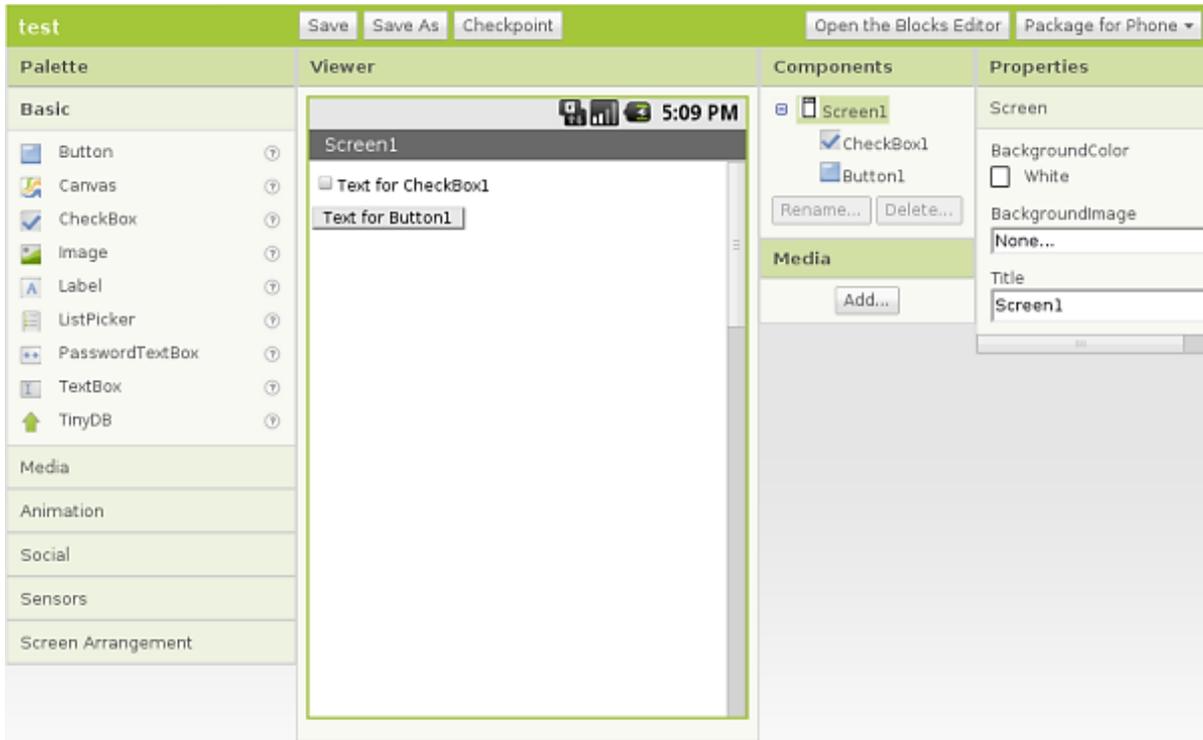


Figura 34. IDE MIT App Inventor: diagrama de bloques.

2.7.4.5 Fritzing

Es un IDE de libre acceso de automatización para diseño electrónico. Puede configurarse con la plataforma Arduino o Raspberry Pi para crear entornos electrónicos y validar su funcionamiento previo a su ensamble real.³⁶ En la Figura 35, se muestra un diagrama electrónico de encendido de un Led obtenido por Fritzing.

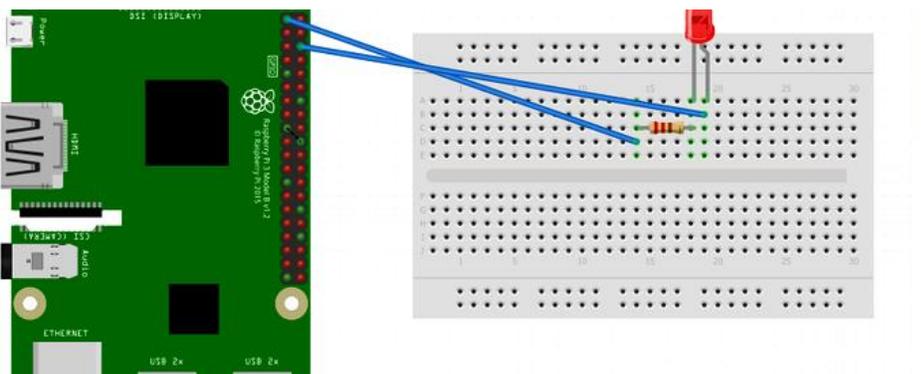


Figura 35. IDE Fritzing: diagrama electrónico para encendido de un led.

2.8. ANATOMÍA HUMANA DEL BRAZO

El hombro es la parte del cuerpo humano que une el tronco con la extremidad del brazo. El brazo es la sección localizada entre el hombro y la articulación del codo. El antebrazo es la sección localizada entre el codo y la muñeca. Finalmente, la muñeca es la parte donde se encuentran los dedos.

En anatomía una articulación permite la unión entre huesos del cuerpo humano cuya función es permitir que exista movimiento entre huesos sin problema alguno ayudando a que no rocen directamente entre sí.³⁷

El hombro, el codo, la muñeca y los dedos son articulaciones con funciones específicas. El hombro une el brazo con el tronco y se encarga de dar soporte y estabilidad al brazo. El brazo es una extremidad superior cuya función principal es la de ser un extensor. El codo se encarga de unir el brazo y el antebrazo y permitir cierto grado de movilidad entre ellos. El antebrazo también es un extensor y se encarga de ser un flexor principal de la muñeca. La muñeca une el antebrazo y la mano y se funge como soporte de los dedos. Los dedos son los que permiten realizar agarres.

En la Figura 36, se presenta un esquema simple de las secciones de un brazo humano. Secciones que son replicadas en los brazos robóticos mediante piezas manufacturadas. En la imagen se hace referencia de la sección del brazo y la sintaxis (con traducción al inglés) de referencia empleada en este trabajo.

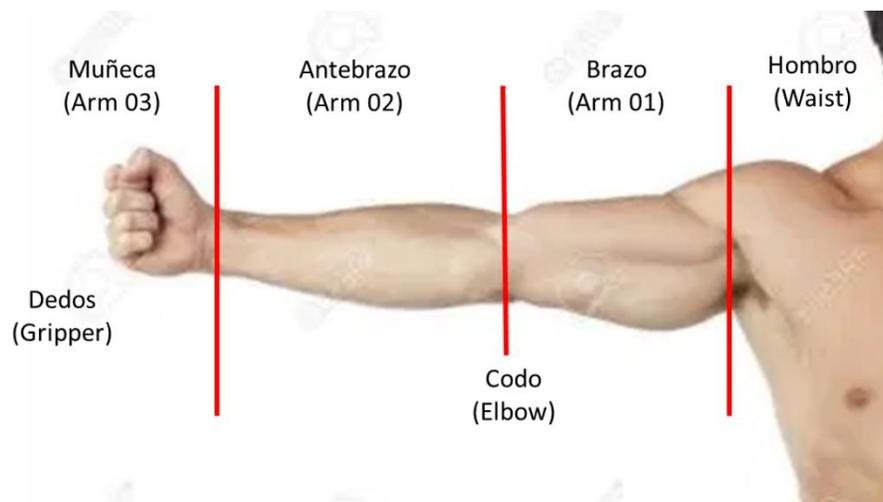


Figura 36. Anatomía del brazo humano (secciones): hombro (Waist), brazo (Arm 01), antebrazo (Arm 02), muñeca (Arm 03) y dedos (Gripper).

III. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑOS DEL ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO

3.1.1 Diseños mecánicos

Todos los diseños elaborados para el robot cartesiano y el brazo robótico fueron elaborados empleando el software de diseño CAD 3D SolidWorks versión 2018.

El robot cartesiano se diseñó del tipo robot estándar con 5 grados de libertad (DOF – *degree of freedom*) (3 x -y + rotación de la pinza + pinza). El brazo robótico fue diseñado como un robot articulado o robot de movimiento angular, del tipo Robot Arm bajo diseños de autoría propia. El brazo robot posee 3 articulaciones más una pinza de agarre. Los diseños incluyen el ensamblaje del Robot Arm y el ensamblaje del robot cartesiano en sus estructuras de soporte de montaje y ensamble para el desplazamiento de los componentes. Los diseños permitieron validar dimensiones, materiales y el funcionamiento a través de sensores, actuadores y piezas de soporte a la medida.

3.1.2 Diseños electrónicos

Para el desarrollo del sistema embebido y de los esquemas electrónicos, previo a su construcción, se elaboraron los diseños electrónicos empleando los softwares de automatización de diseño electrónico *Proteus* y *Fritzing* en su versión libre. Con estas herramientas se generaron vistas de simulación de los sistemas embebidos para validar su funcionamiento.

3.2 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO

El sistema completo comprende de tres secciones primarias:

- **Robot cartesiano estándar.** Se compone de (i) un ensamblaje en el eje x con 200 cm de largo y donde se integra un sistema de traslación (carro – *slider*) en el eje x utilizando rodamientos y placas de soporte y (ii) un ensamblaje en el eje y con dimensiones de 51.5 cm de alto donde se integra el brazo robótico y una *slider* de traslación en el eje y por medio de rodamientos y placas de soporte.
- **Brazo robótico (Robot Arm).** Se compone de 6 macropiezas: (a) una base circular que hace la representación del tronco y donde se fijara el Robot Arm, (b) un eslabón 1 tipo ancla de sujeción etiquetada como Waist, que simula la función del hombro humano, (c) un eslabón 2 denominado Arm 01 que hace la función del brazo, (d) un eslabón 3 llamado Arm 02 que representa el antebrazo – la unión de Arm 01

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

y Arm 02 representan la articulación del codo (*elbow*) –, (e) una pieza de ensamble nombrada Arm 03 que funge como la muñeca y (f) un mecanismo de una pinza angular para el *Gripper* que hace la función de los dedos, es decir, es la pieza que permite realizar la acción de agarre.

- **Gabinete de control del sistema embebido.** Esta sección contiene el sistema embebido diseñado y construido para automatizar y controlar el movimiento del brazo robótico. Básicamente se compone de diversas piezas de electrónica modular.

Para facilidad de comprensión en la Tabla 2 se presentan los componentes empleados para la construcción de cada sección del sistema. El sistema completo se integra de poco más de 400 componentes de electrónica modular, elementos CNC de soportería y movimiento, estructura de soporte, *slider* de traslado y cableado para dar operatividad al equipo completo. Se especifica en que sección se localiza cada componente empleado para la construcción del sistema.

Tabla 2. Descripción completa de los elementos que integran el robot cartesiano, Robot Arm y sistema embebido (caja de control).

Posición	No.	Descripción	Cantidad	Material
Robot Cartesiano	1	Tornillería de sujeción 1/2" comercial, para bases eje <i>x</i>	4	Acero inoxidable (inox)
	2	Perfil tubular de 1" x 515 mm de largo unido a placa <i>slider</i> eje <i>x</i>	1	Acero al carbón (carb)
	3	Tornillería de sujeción 8mm x 64mm comercial	8	inox
	4	Rondana plana 8mm comercial	16	inox
	5	Tuerca para tornillo 8mm comercial	24	inox
	6	Rodamiento 624-RS comercial	16	inox
	7	Lamina para motor eje <i>x</i>	1	carb
	8	Tornillería para sujeción 4mm x 8mm comercial	15	inox
	9	Tuerca para tornillo 4mm comercial	9	inox
	10	Placa <i>slider</i> eje <i>y</i> 100 x 80 mm	1	carb
	11	Base impresa para husillo de 8 mm	1	PLA
	12	Husillo (varilla roscada) de 8mm	2	Aleación de cobre
	13	Tornillería para sujeción 3.5 x 8mm comercial	8	inox
	14	Base impresa para puerto serie 15 pines hembra	1	PLA
	15	Base impresa para motor-reductor eje <i>y</i>	1	PLA
	16	Motor-reductor eje <i>y</i>	1	Aleación de aluminio
	17	Cople rígido 5-8mm	1	Aluminio (AL)

Tabla 2. Continuación...

Posición	No.	Descripción	Cantidad	Material
Robot Cartesiano	18	KFL08 chumacera de pared 8mm	1	AL
	19	Varilla roscada 8mm x 445mm	1	inox
	20	Motor-reductor eje x	1	Plástico y Aluminio
	21	Base impresa para puertos serie 25 y 37 pines hembra	1	PLA
	22	Base impresa para rodamiento 626-RS	2	PLA
	23	Rodamiento 626-RS comercial	2	inox
	24	Tornillería para sujeción 5mm x 40mm comercial	3	inox
	25	Tuerca para tornillo 5mm comercial	23	inox
	26	Polea dentada comercial 2GT	1	AL
	27	Base inferior impresa para limit switch	4	PLA
	28	Base superior impresa para limit switch	4	PLA
	29	Tornillería para sujeción 5mm x 10mm comercial	24	inox
	30	Base impresa de tipo prensa para banda dentada 2GT	1	PLA
	31	Rondana plana 4mm comercial	3	inox
	32	Base impresa para puertos 15 y 25 pines macho	1	PLA
	33	Perfil tubular 1" x 2 m de largo unido a placas de 115x75 mm	1	carb
	34	KW10-Z1P Micro switch tipo palanca	4	Plástico y aluminio
	35	Tramos de 400 mm de cable para red Ethernet	16	Cobre
	36	Tramos de 2 m de cable para red Ethernet	25	Cobre
	37	Puerto serie 15 pines tipo hembra	1	Metal
	38	Puerto serie 15 pines tipo macho	1	Metal
	39	Puerto serie 25 pines tipo macho	2	Metal
	40	Puertos serie 25 pines tipo hembra	2	Metal
	41	Banda dentada comercial 2GT de 2.10 m de largo	1	Goma de neopreno
Robot Arm	42	Waist	1	PLA
	43	Servo Motor MG996R	2	Plástico y metal
	44	Arm 01	1	PLA
	45	Servo Motor Micro MG90S	3	Pastico y metal
	46	Arm 02 v3	1	PLA
	47	Arm 03	1	PLA
	48	Gear1	1	PLA
	49	Gear2	1	PLA

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

Tabla 2. Continuación...

Posición	No.	Descripción	Cantidad	Material
Robot Arm	50	Grip link 1	4	AL
	51	Gripper base	1	PLA
	52	Gripper 1	2	AL
	53	Base para robot angular	1	PLA
	54	Tramos de 120 mm de cable para protoboard calibre 18	15	Cobre
Gabinete de control	55	Modulo bluetooth HC-06	1	Mixto
	56	Resistencias 1 kohm	5	Cerámico
	57	Resistencias 2 kohm	1	Cerámico
	58	Arduino ATmega2560	1	Mixto
	59	Cable USB para Arduino mega	1	Cobre
	60	Drivers puente H L298N	2	Mixto
	61	Relevadores	2	Plástico
	62	Cables jumper tipo macho	30	Cobre
	63	Cables jumper tipo hembra	10	Cobre
	64	Tramos de 120 mm de cable para red	37	Cobre
	65	Tramos de 500 mm de cable para red	37	Cobre
	66	Puertos serie 37 pines tipo hembra	2	Metal
	67	Puertos serie 37 pines tipo macho	2	Metal
	68	Protoboard grande estándar 830p	1	Plástico
	69	Fuente de alimentación lineal de 5 y 12 V	1	Mixto
70	Potenciómetro KY-040 Encoder Rotatorio	1	Mixto	
TOTAL DE PIEZAS			403	

La geometría de las piezas es de diseño propio donde las dimensiones se definieron a partir de los componentes modulares a utilizar. Se empleó una impresora 3D *MakerBot Replicator Z18*. Se seleccionó material de PLA por sus características de buena dureza y ligereza. De la Figura 37 a la 42 se presentan las simulaciones de las piezas del Robot Arm en el software propio de la impresora 3D empleada donde se permite cuantificar la cantidad de material a emplear, el tiempo de producción y las posibles modificaciones de posición o ajuste de soportes a colocar en la pieza para dar mejor calidad a la misma. Este software se empleó también para todas las piezas de bases para varilla roscada (husillo), motores, switches, rodamientos, *slider*, puertos y poleas del robot cartesiano elaboradas en PLA (simulaciones no presentadas). En la Figura 43, se presenta una vista isométrica del Robot Arm con rotulación de las piezas manufacturadas en PLA para su ensamble: base, Waist, Arm 01, Arm 02, Arm 03 y mecanismo de pinza angular para el *Gripper*.

Los diseños específicos – y sus dimensiones – de todas las piezas elaboradas en PLA, tanto para el robot cartesiano como el Robot Arm, se presentan en el Anexo 1. Los esquemas se presentan en vistas de dibujo técnico con cotas en unidades de milímetros.

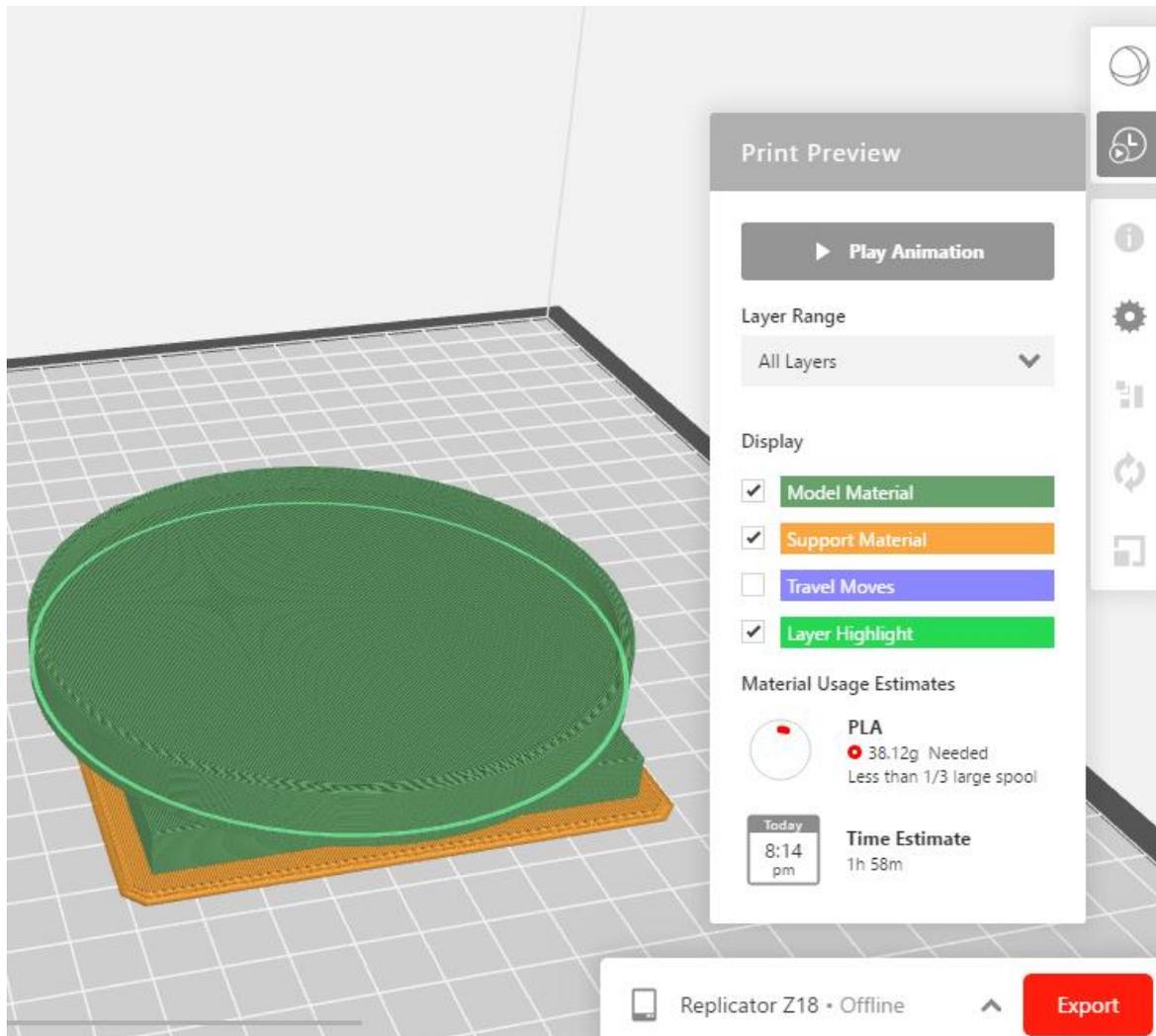


Figura 37. Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la base circular (vista previa): 38.12 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 1h 58 min.

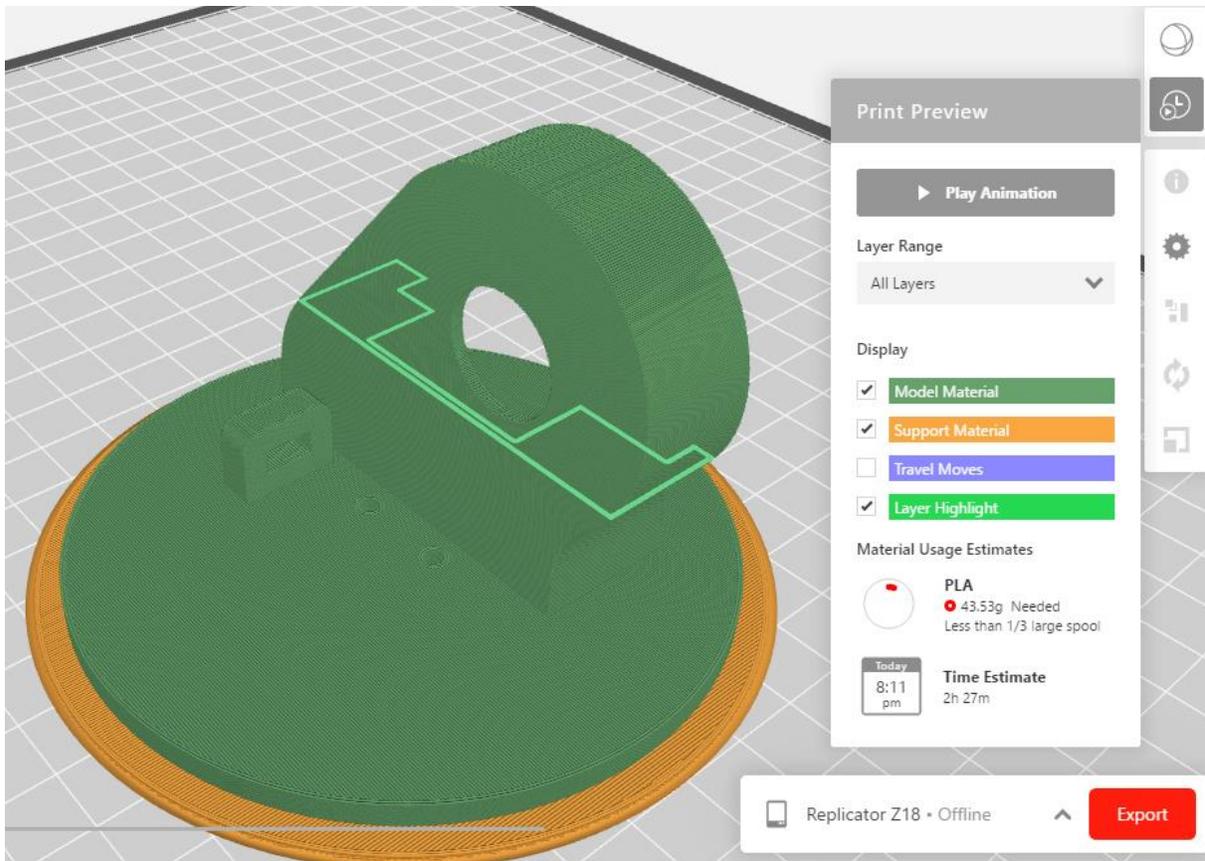


Figura 38. Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la sección Waist (vista previa): 43.53 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 2h 27 min.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

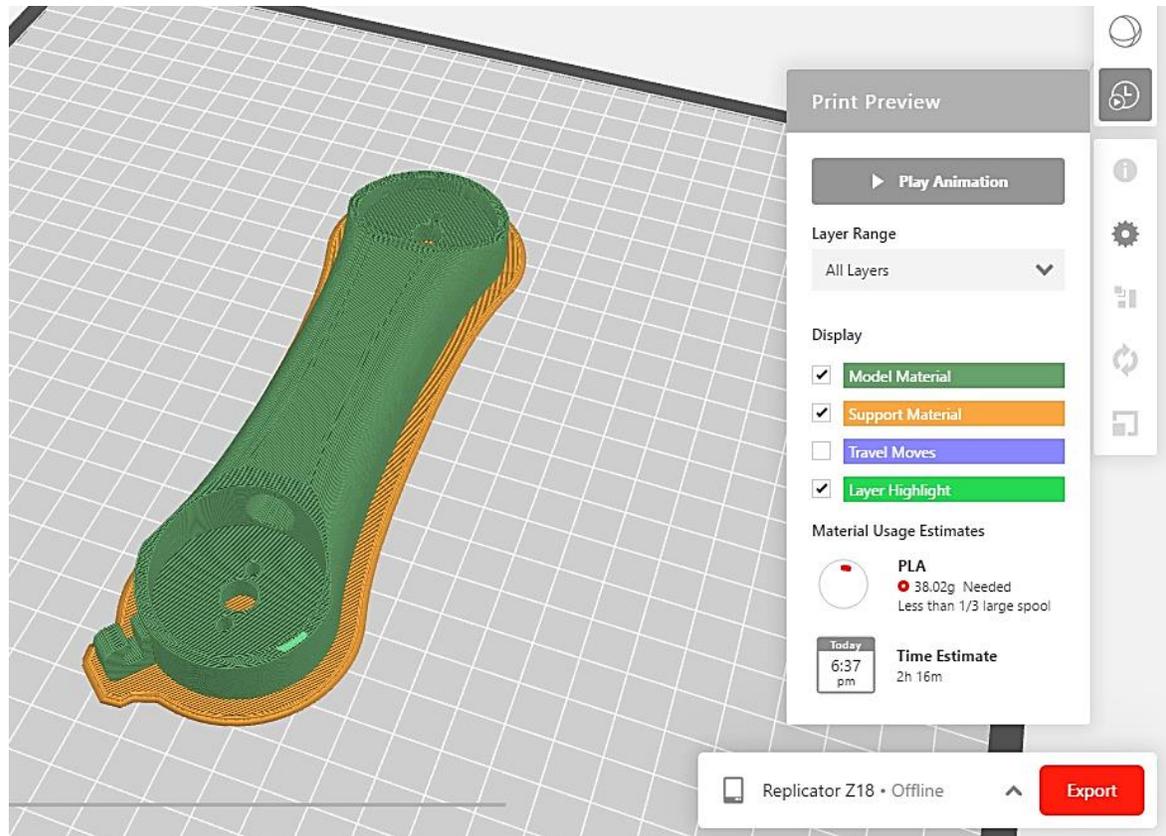


Figura 39. Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la sección Arm 01 (vista previa): 38.02 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 2h 16 min.

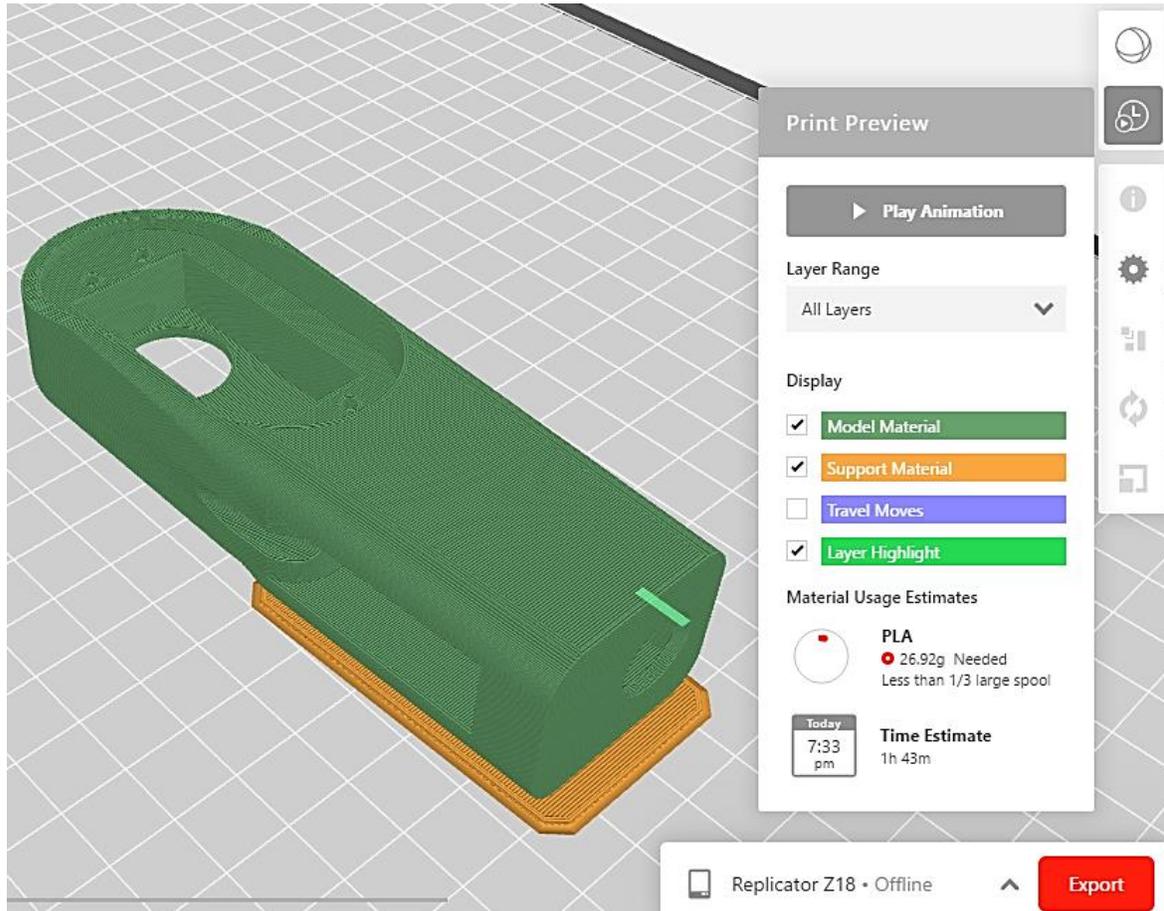


Figura 40. Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la sección Arm 02 (vista previa): 26.92 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 1h 43 min.

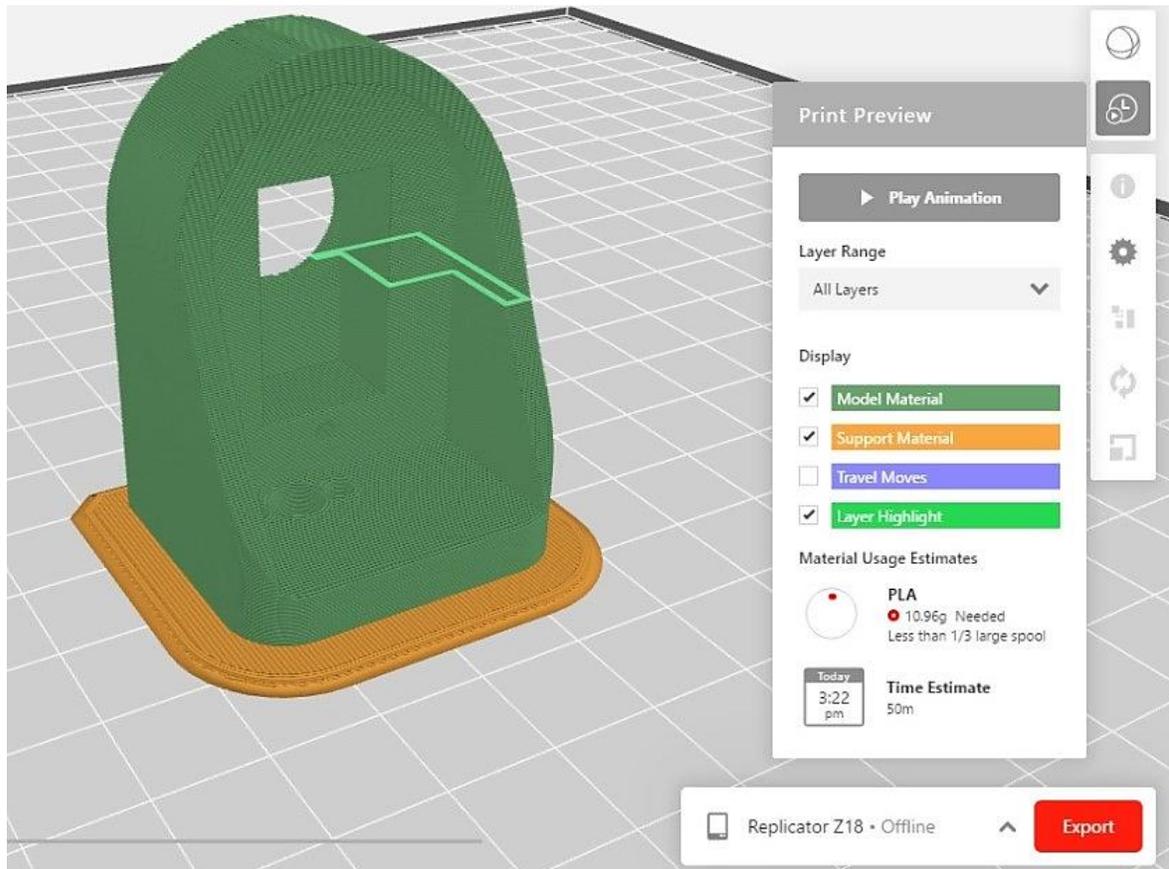


Figura 41. Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la sección Arm 03 (vista previa): 10.96 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 50 min.

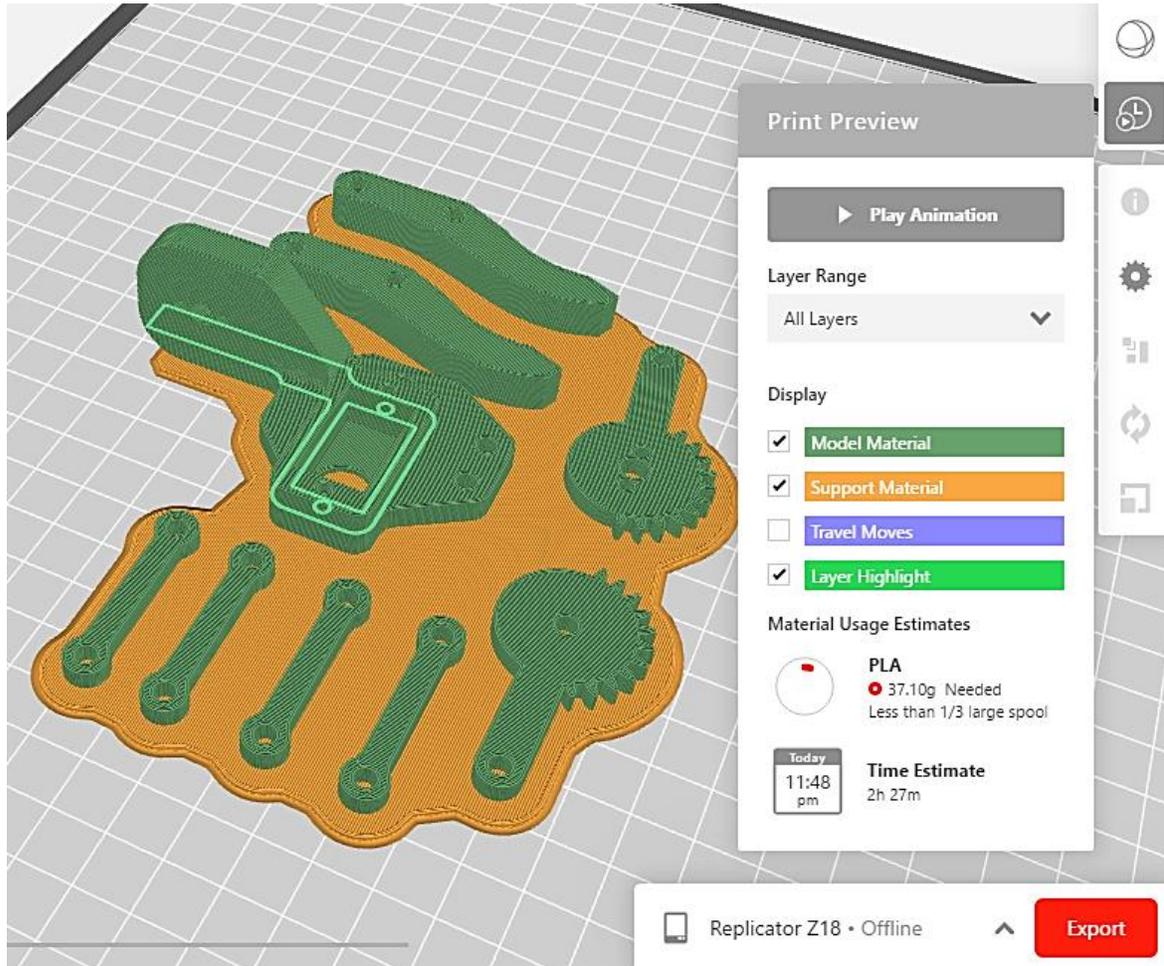


Figura 42. Simulación de la impresión 3D en Replicator Z18 para la pinza angular para el gripper (vista previa): 37.10 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 2h 27 min.

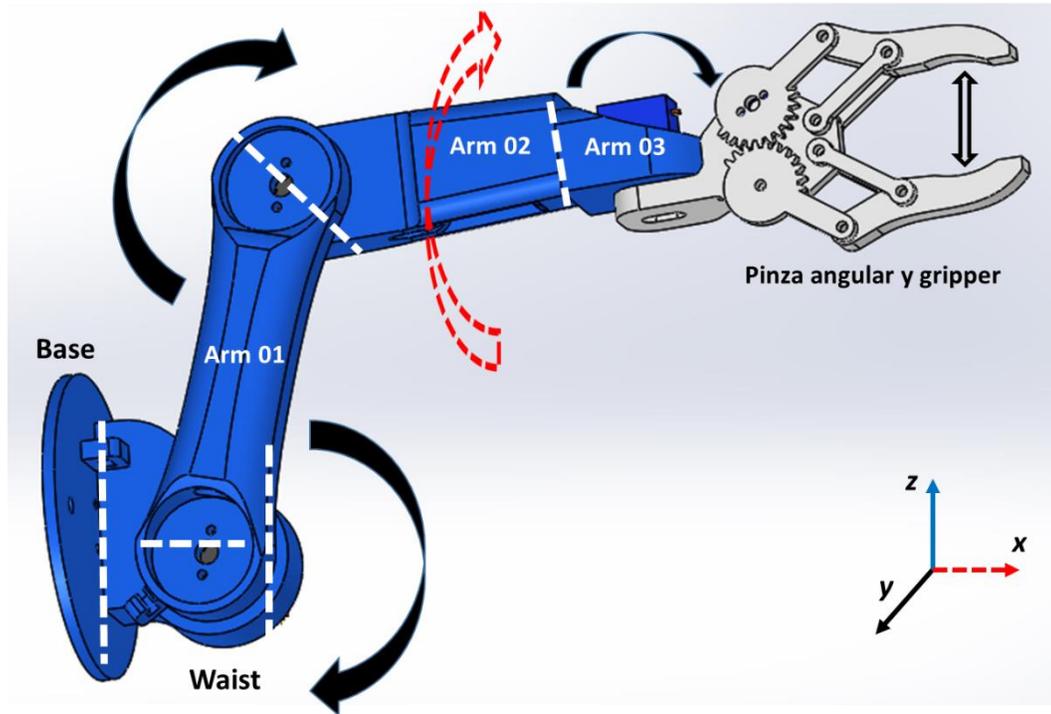


Figura 43. Identificación de las piezas del Robot Arm y sus 5 DOF (3 x-y + rotación de la pinza + pinza).

3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÓDIGO E INTERFAZ DE CONTROL

El diseño del sistema de control se realizó con los softwares *Proteus* y *Fritzing* en su versión libre. Ambos softwares y junto a la librería de Arduino permitieron simular como funcionaria el circuito y la reacción que tendrían los componentes permitiendo analizar el funcionamiento previo a su construcción para un mejor comportamiento de respuesta del robot cartesiano y del Robot Arm.

El sistema embebido se desarrolló empleando la plataforma de *open source* en Arduino por lo que se emplearon como base las librerías de Arduino disponibles libremente en la web, pero adaptándolas bajo una estructura y sintaxis de diseño propio.

El código programado permite registrar las señales de desplazamiento en los tres ejes *x*, *y* e *z* a través de los actuadores, controladores, sensores y unidades modulares. Básicamente el programa ejecuta las instrucciones de desplazamiento alimentadas.

El código de control fue estructurado mediante la consulta de diferentes fuentes de librerías o códigos Arduino de dominio público disponibles en la web y adaptándolo a los elementos y pines disponibles y necesarios. De igual manera se consultó diversos códigos disponibles en la red para programar en aplicaciones app que permitieron la elaboración de la interfaz de comunicación portátil.

Enseguida se enuncian las fuentes de información electrónicas consultadas:

Códigos de control Arduino y/o programación de una app de un brazo robot

- <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/diy-arduino-robot-arm-with-smartphone-control/>
- https://electronicavargascely.blogspot.com/2018/09/brazo-de-robot-arduino-diy-con-control_29.html
- <https://gist.github.com/titoluyo/3d15a0301bda212620c5>
- <https://www.taloselectronics.com/blogs/tutoriales/brazo-robot-de-6-dof-con-arduino-tutorial-codigo-app>

Código para control Arduino con una app de velocidad de un motor DC

- <https://www.electroingenio.com/arduino-en/dc-motor-speed-control-from-mobile-app/>

Código Arduino control carrito con motores DC

- <https://create.arduino.cc/editor/ProfeGarcia/4b1c1b33-a326-4165-a812-d17e00935c61/preview>

Código Arduino control puente H L298N

- <https://create.arduino.cc/editor/ProfeGarcia/c2ccd82d-37f0-4004-b383-69761cd267ba/preview>

Códigos varios de control Arduino

- <http://elprofegarcia.com>

3.3.1 Cableado y terminales de conexión para protocolo de comunicación serial

Se estableció una comunicación serial entre el gabinete de control del sistema embebido con el robot cartesiano y el Robot Arm empleando un sistema de cableado y conectores (terminales de conexión) adaptados para asegurar contar con los pines disponibles y los necesarios para el proyecto.

Se emplearon 3 conectores tipo D37 pines Macho y Hembra (1 localizado a la salida del gabinete de control, y 2 localizados en la caja de adaptación para gobernanza de los pines de la caja de control – reducción de 37 a 25 pines)

Se emplearon 4 conectores tipo D25 pines Macho y Hembra (2 localizados en la cada adaptada para reducción de 37 a 25 pines, y 2 localizados en la *slider* del eje *x* del robot cartesiano).

Se emplearon 2 conectores tipo D15 pines Macho y Hembra (localizados ambos en la *slider* del eje *y* del Robot Arm).

El cableado se fabricó empleando cable par trenzado de red Ethernet LAN Rj45 categoría 6. El cable Ethernet permitió comunicar señales de movimiento y alimentación de corriente del gabinete de control hacia el carro de movimiento en *x* del robot cartesiano y al carro de movimiento en *y* del Robot Arm.

Para el Robot Arm se emplearon extensiones y cables ramificados para servomotores con plug adaptados. Los cables de servomotores permitieron alimentar de corriente e instrucciones a las articulaciones del Robot Arm.

3.3.2 Interfaz gráfica LabVIEW y MIT App Inventor

Para facilidad de control del robot cartesiano y del Robot Arm se desarrolló una interfaz en software LabVIEW con el cual se controla el encendido, velocidades de desplazamiento y se manipula el movimiento de los equipos en los ejes x , y e z según se desee.

Adicionalmente se diseñó una interfaz gráfica remota (vía módulo bluetooth) y móvil empleando la aplicación MIT App Inventor para controlar los desplazamientos del robot cartesiano y del Robot Arm en los ejes x , y e z según se determine.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DISEÑOS DEL ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO

4.1.1 Diseños mecánicos

Para facilidad de comprensión de los diseños creados y observar una mejor nitidez de diseño, se presentan por módulos mediante acercamientos, giros y especificando la pertenencia al robot cartesiano o al Robot Arm según aplique. Los diseños del robot cartesiano y del Robot Arm permitieron su construcción sin contratiempos.

De la Figura 44 a la 56 se presentan vistas isométricas por secciones del robot cartesiano o del Robot Arm. En cada diseño se puede apreciar, de manera general, los componentes empleados para su montaje. En la Tabla 2 se especifica un listado general de las piezas que componen cada sección.

De la Figura 57 a la 66 se muestran los dibujos técnicos de los módulos con medidas en milímetros. De la Figura 67 a la 72 se observan los diseños isométricos de las piezas del Robot Arm.

En el Anexo 2 se presentan diseños con medidas de alcance entre el robot cartesiano y el Robot Arm expresados en unidades de milímetros.

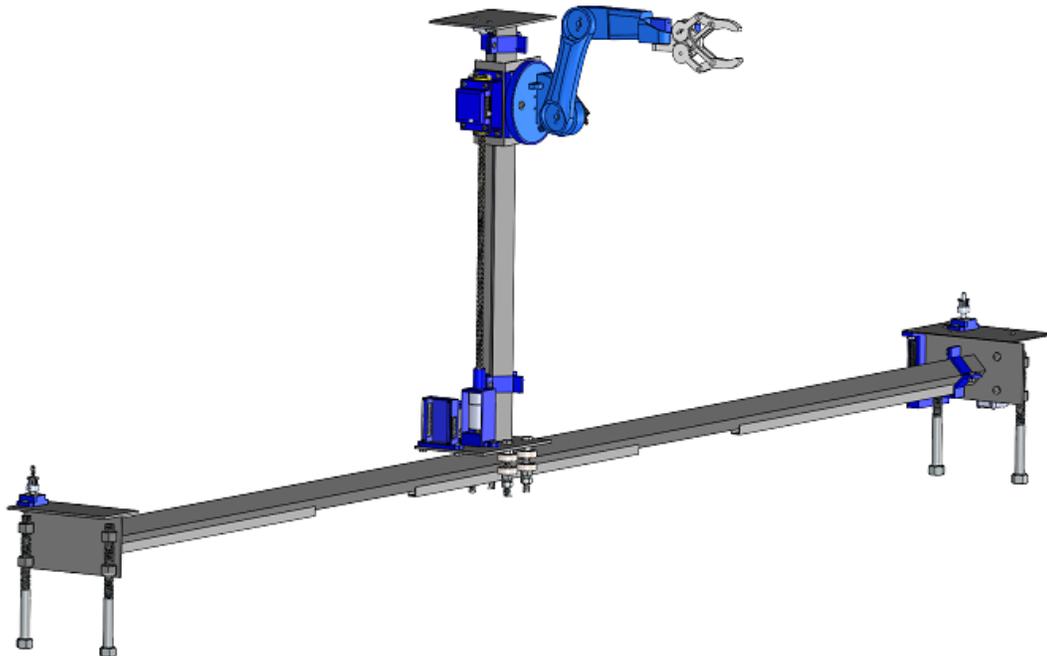


Figura 44. Robot cartesiano & Robot Arm: ensamble completo.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

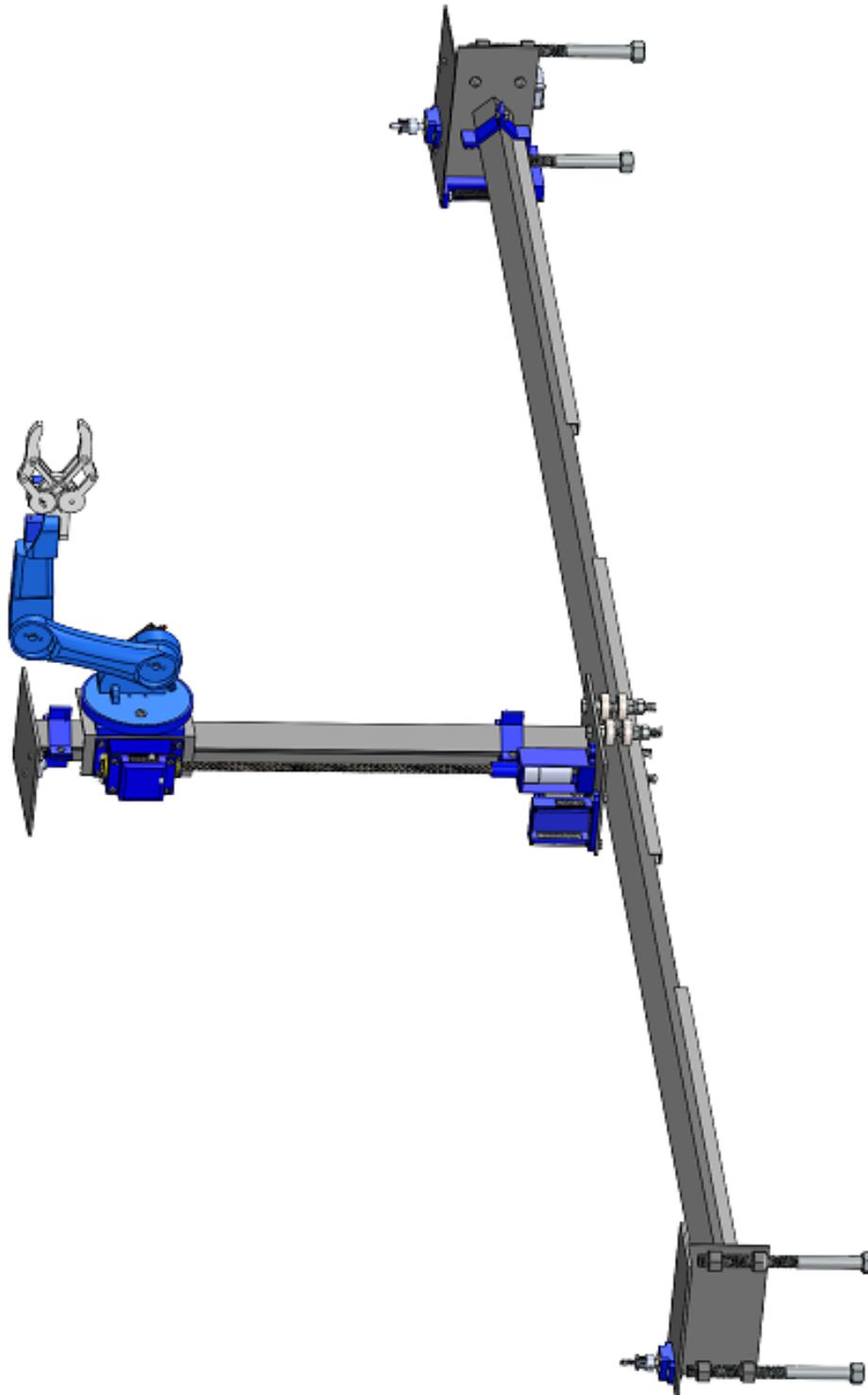


Figura 45. Robot cartesiano & Robot Arm: acercamiento de ensamble completo.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

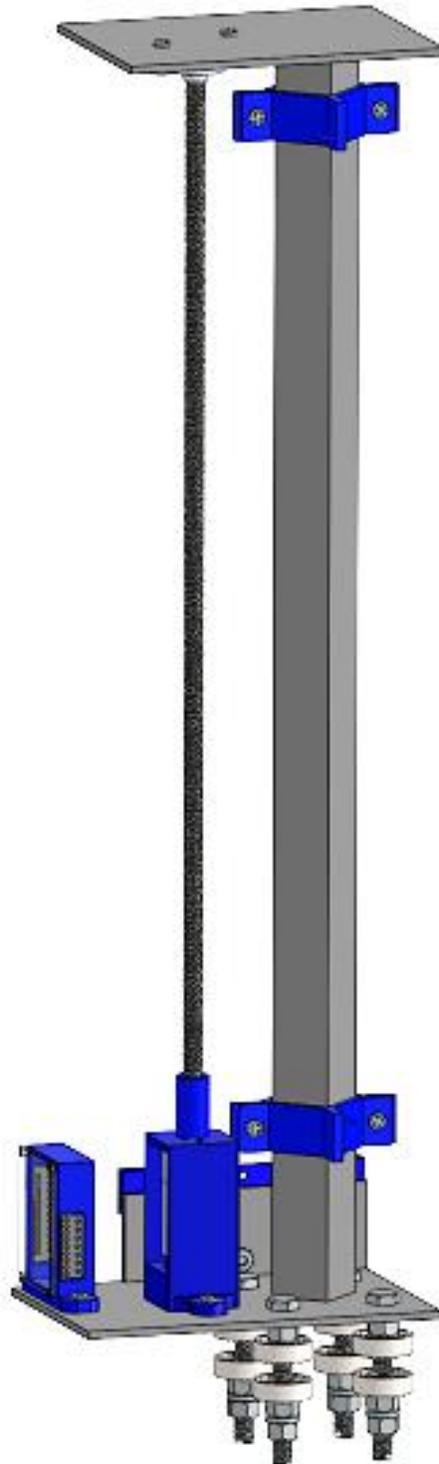


Figura 46. Robot cartesiano: sección del eje y.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

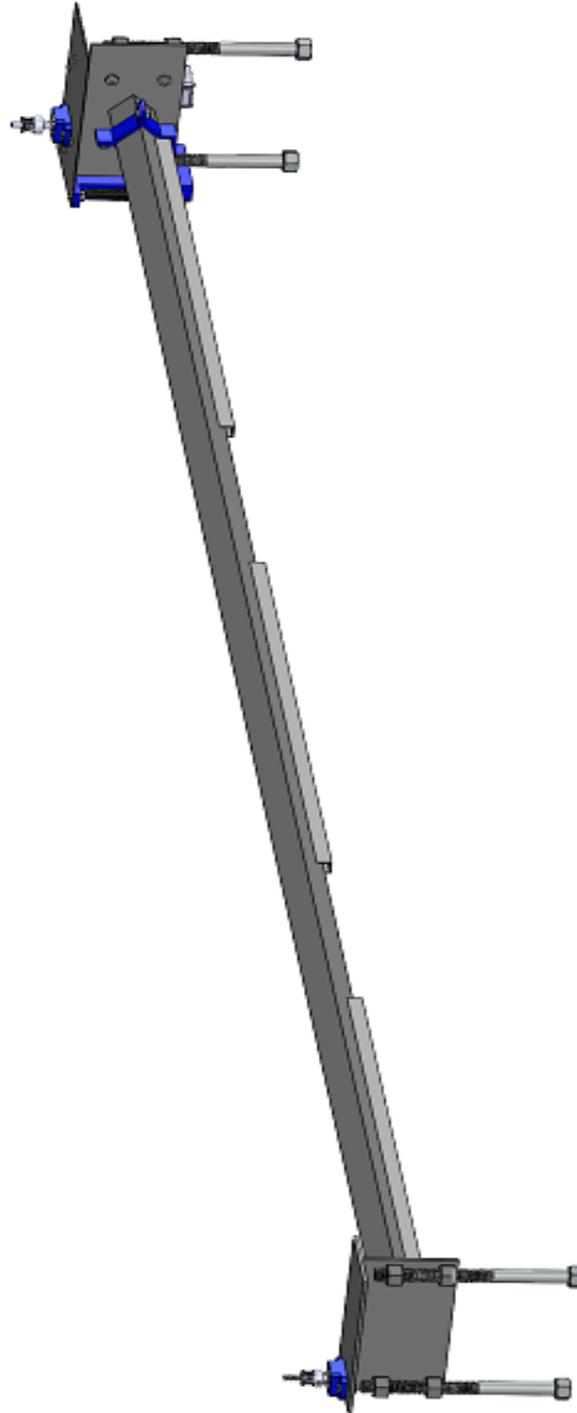


Figura 47. Robot cartesiano: sección del eje x.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

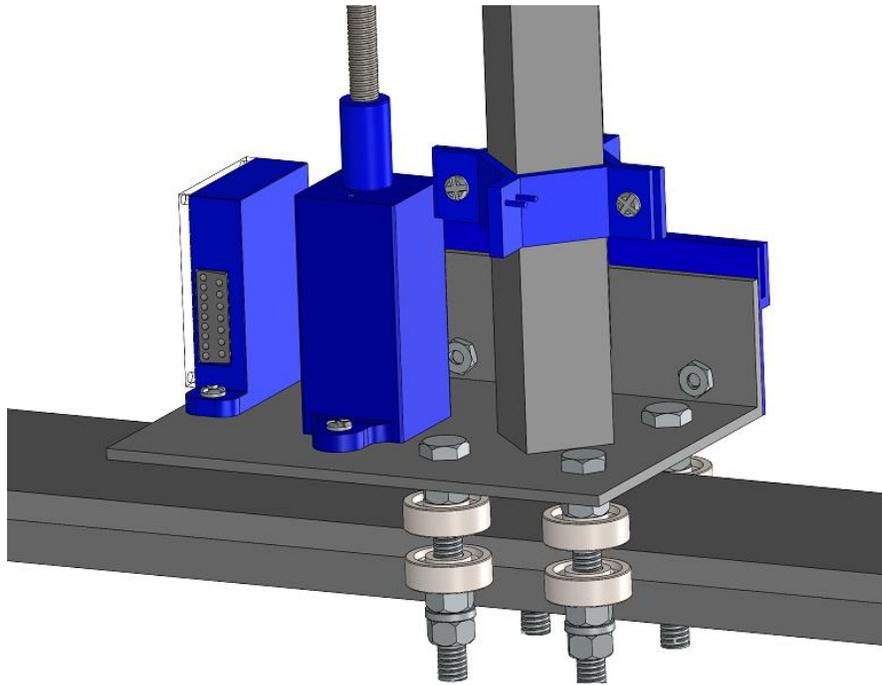


Figura 48. Robot cartesiano: vista 1 de la slider del eje x.

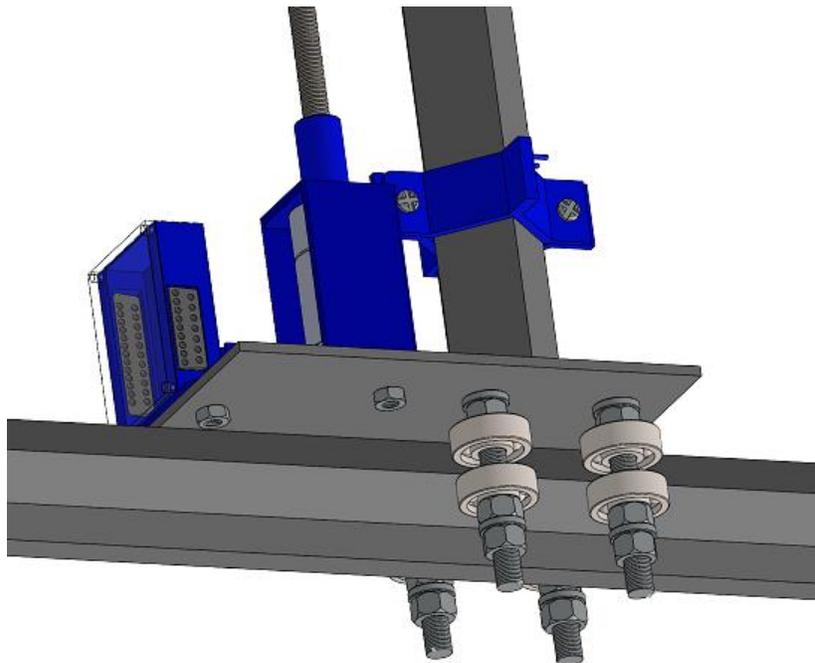


Figura 49. Robot cartesiano: vista 1 de la slider del eje x.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

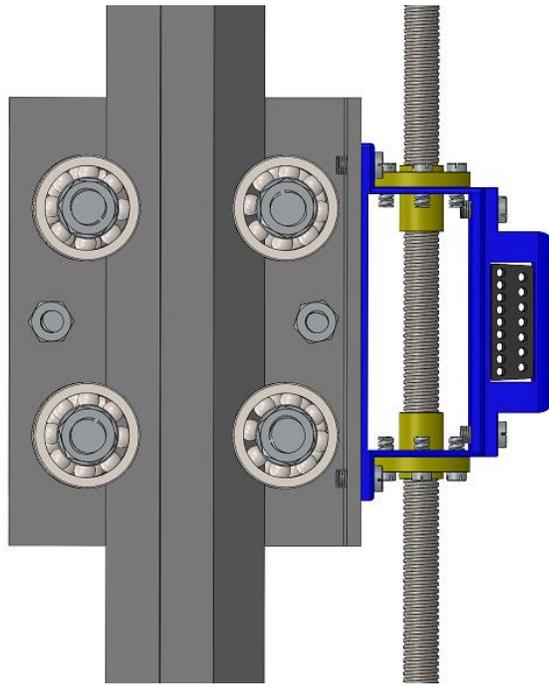


Figura 50. Robot cartesiano: vista trasera de la slider del eje y.

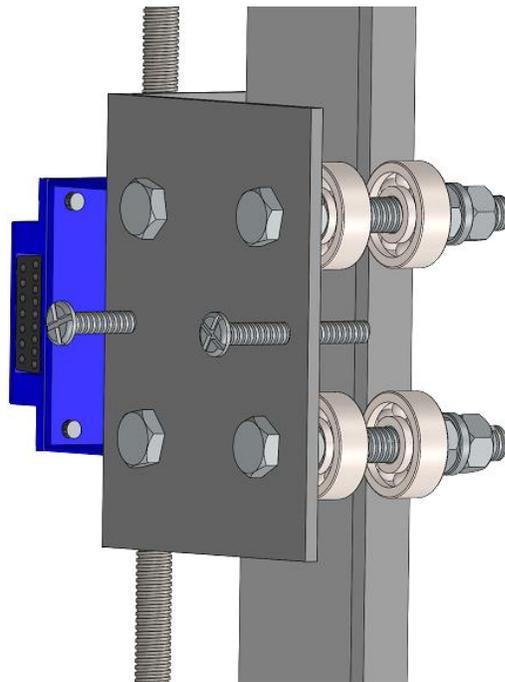


Figura 51. Robot cartesiano: vista trasera de la slider del eje y.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

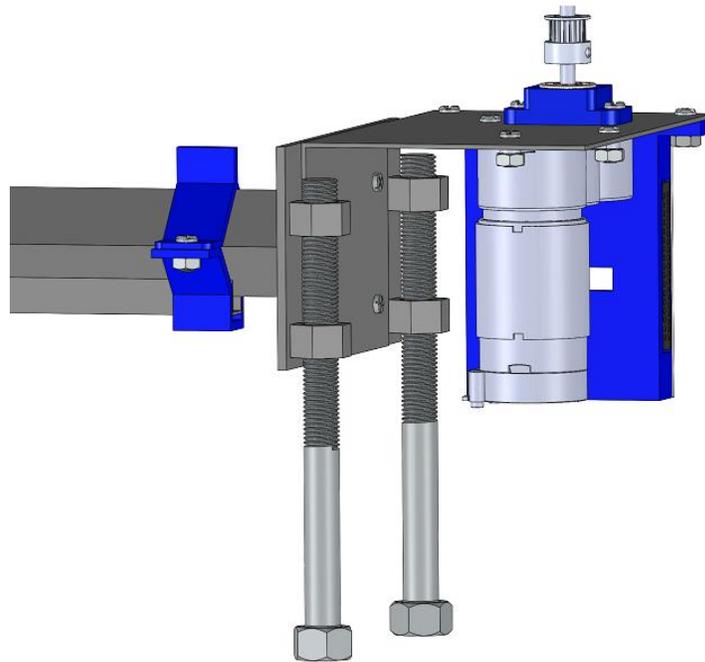


Figura 52. Robot cartesiano: sección de soporte derecho en el eje x.

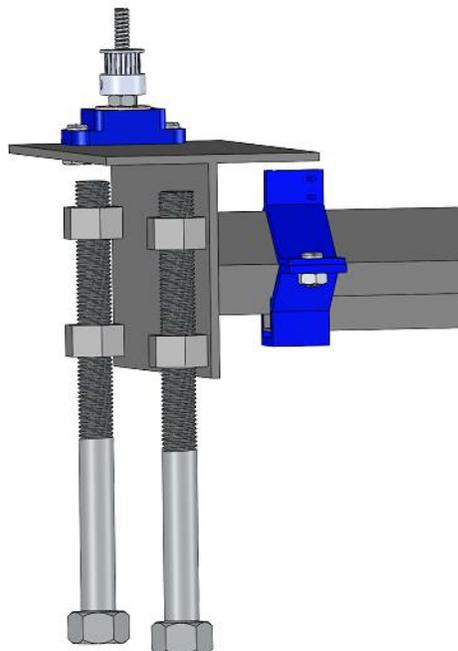


Figura 53. Robot cartesiano: sección de soporte izquierdo en el eje x.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

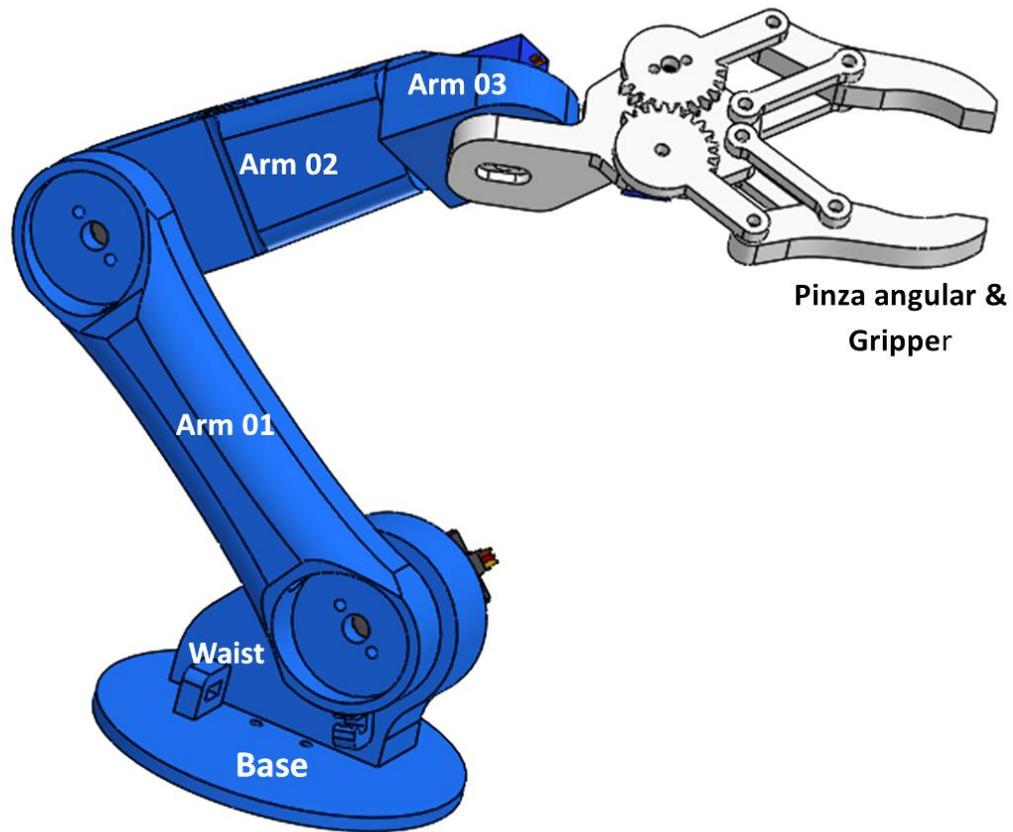


Figura 54. Robot Arm: vista 2 de rotulación de piezas de soporte.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

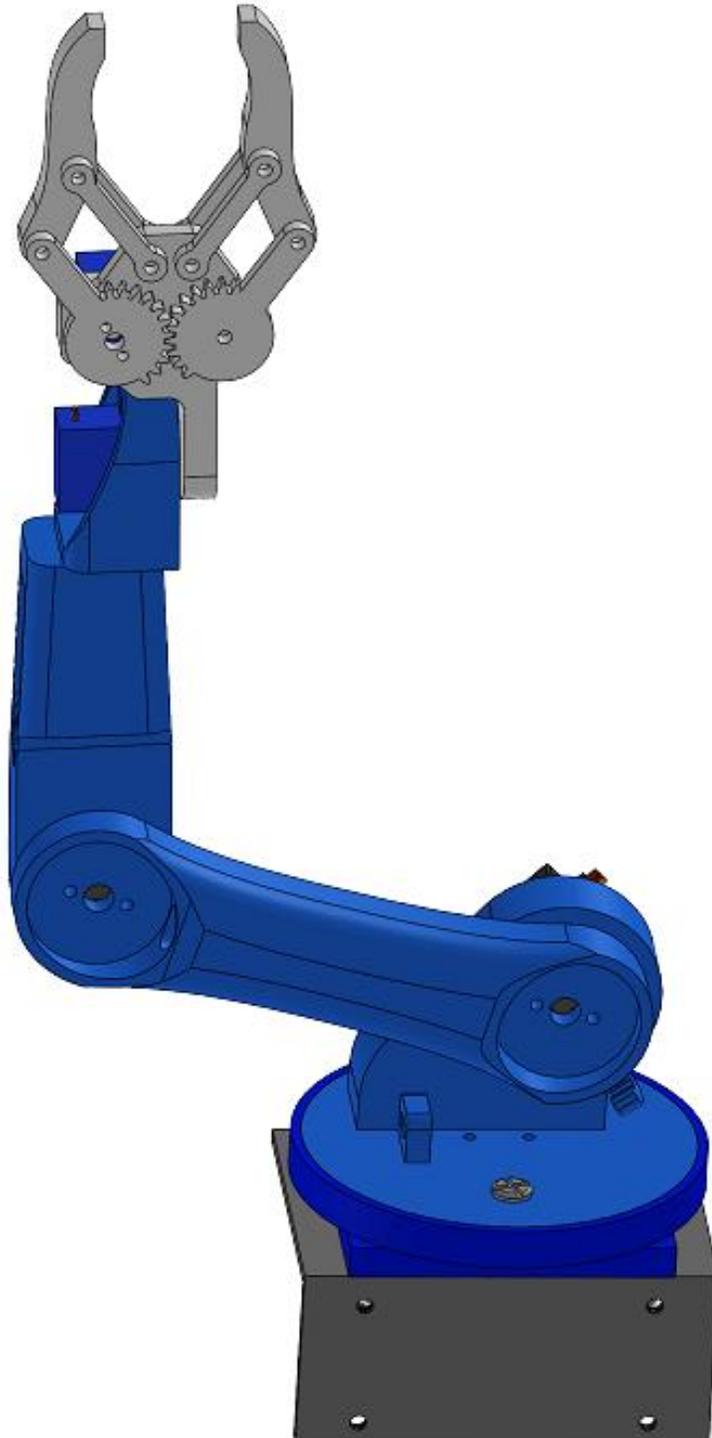


Figura 55. Robot Arm: ensamble completo vista frontal (vista del brazo integrado a la slider del eje y).

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

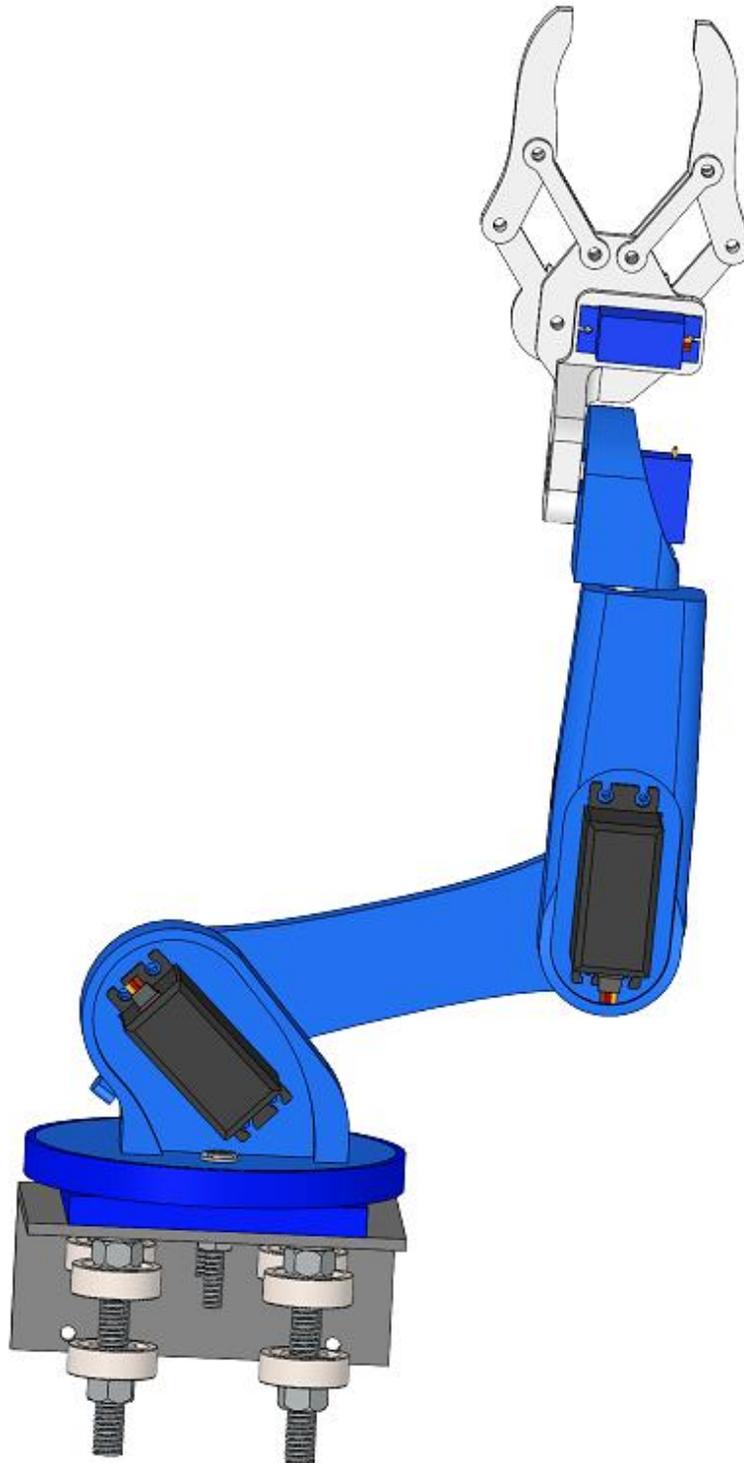


Figura 56. Robot Arm: ensamble completo vista posterior (vista del brazo integrado a la slider del eje y).

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

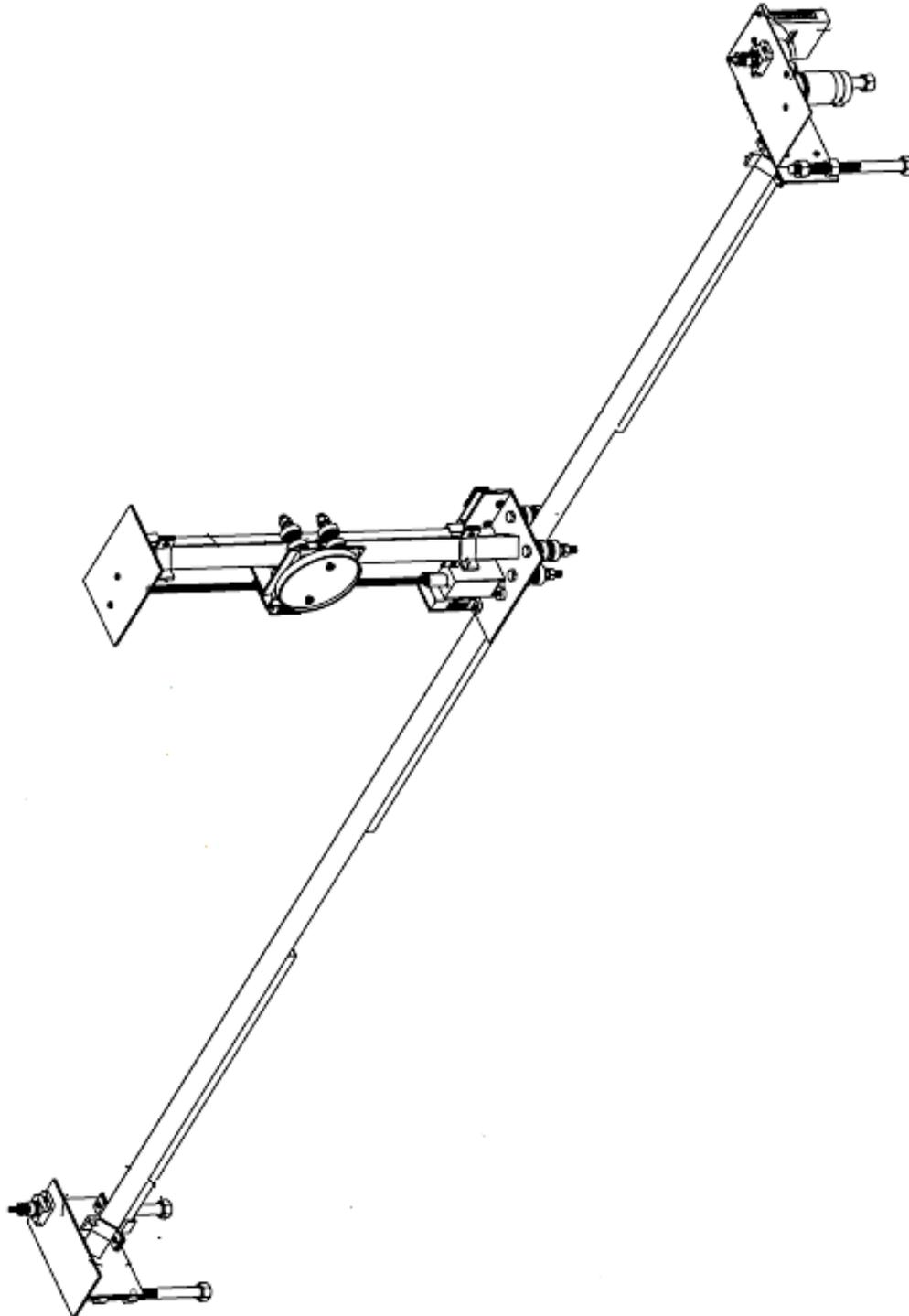


Figura 57. Robot cartesiano: ensamble completo en ejes x e y.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

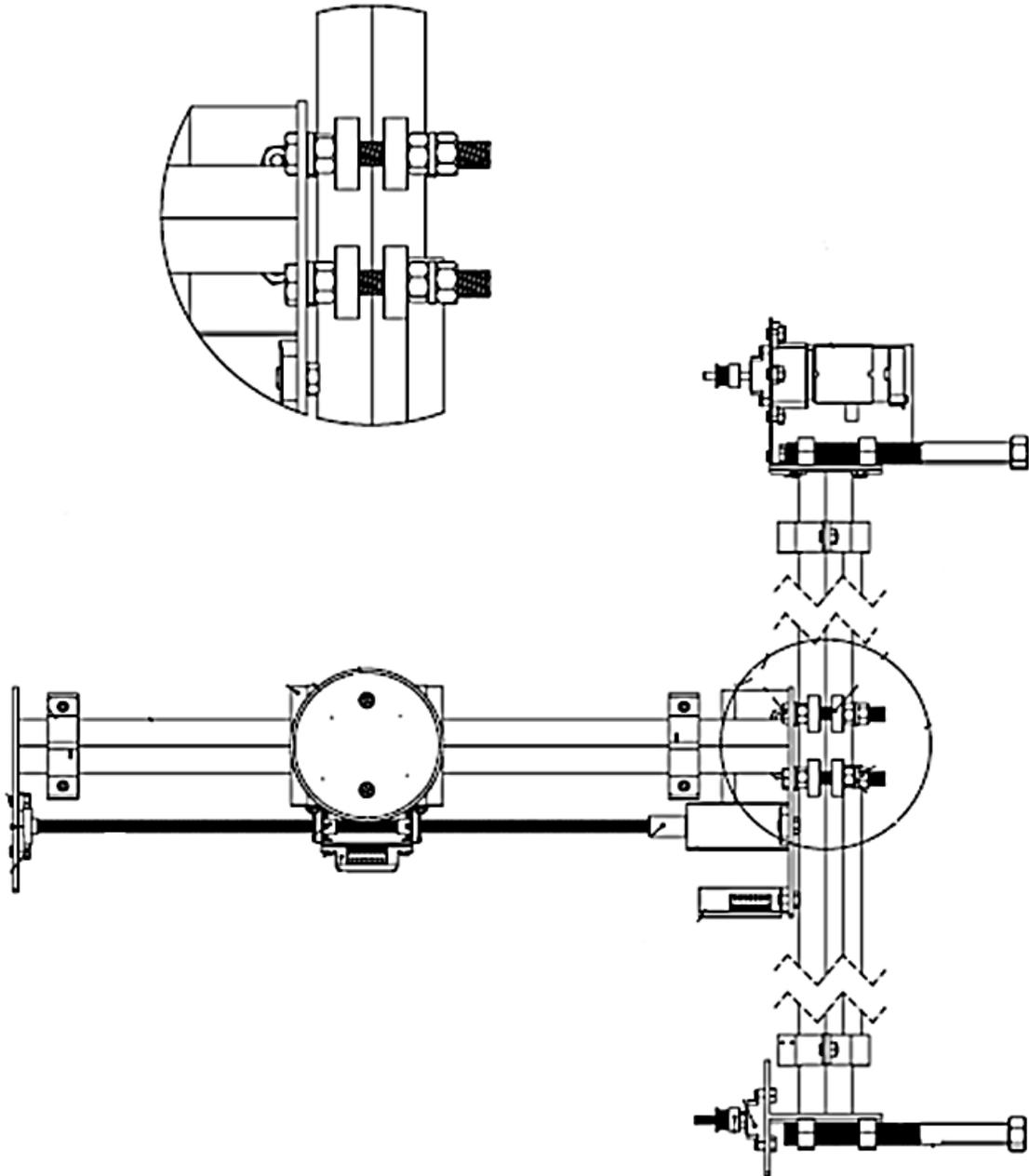


Figura 58. Robot cartesiano: vista frontal de ensamble completo de los ejes x e y con acercamiento al sistema de rodamientos de la slider del eje x en escala 2:5.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

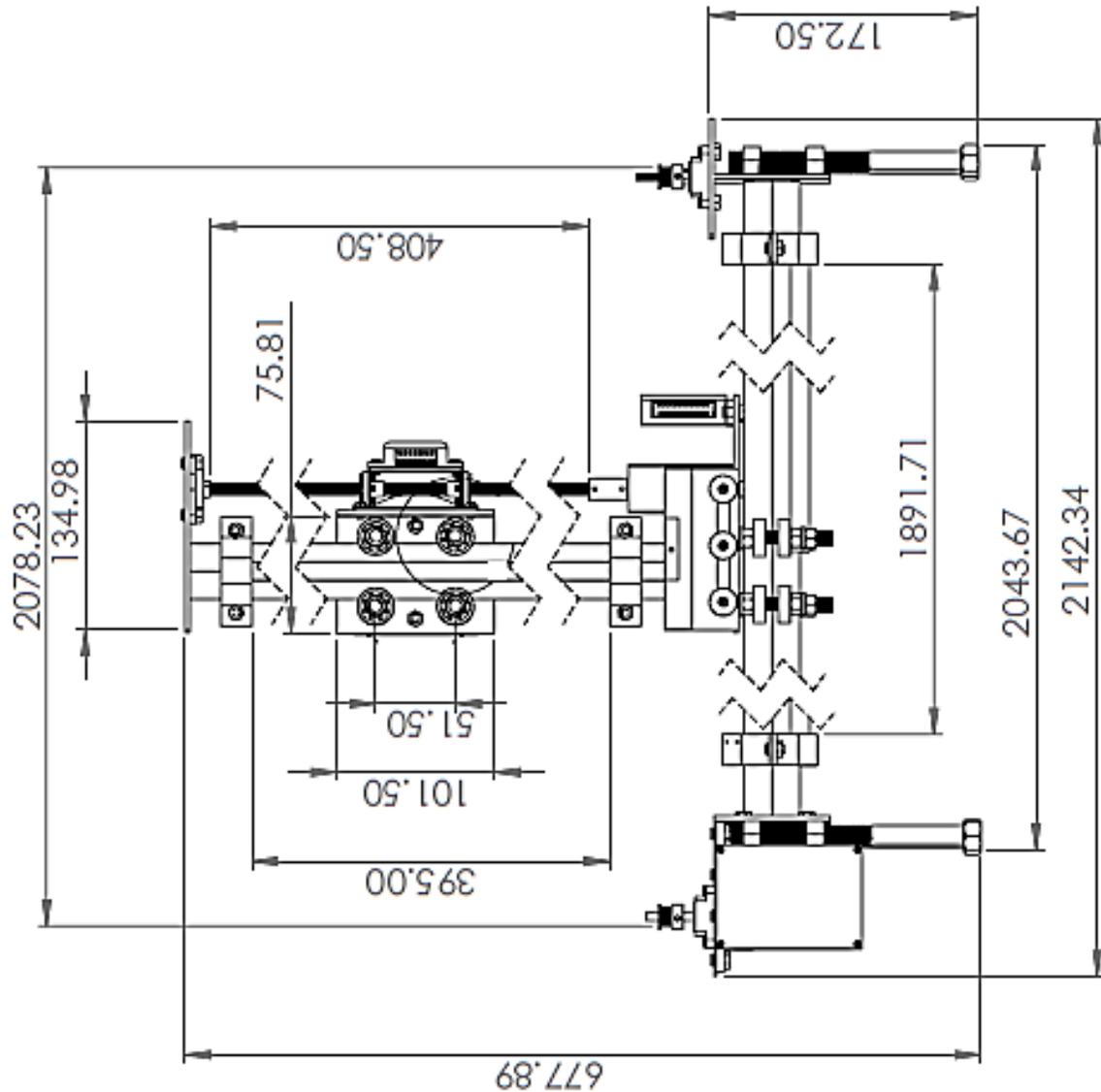


Figura 59. Robot cartesiano: vista posterior de ensamblaje completo de los ejes x e y.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

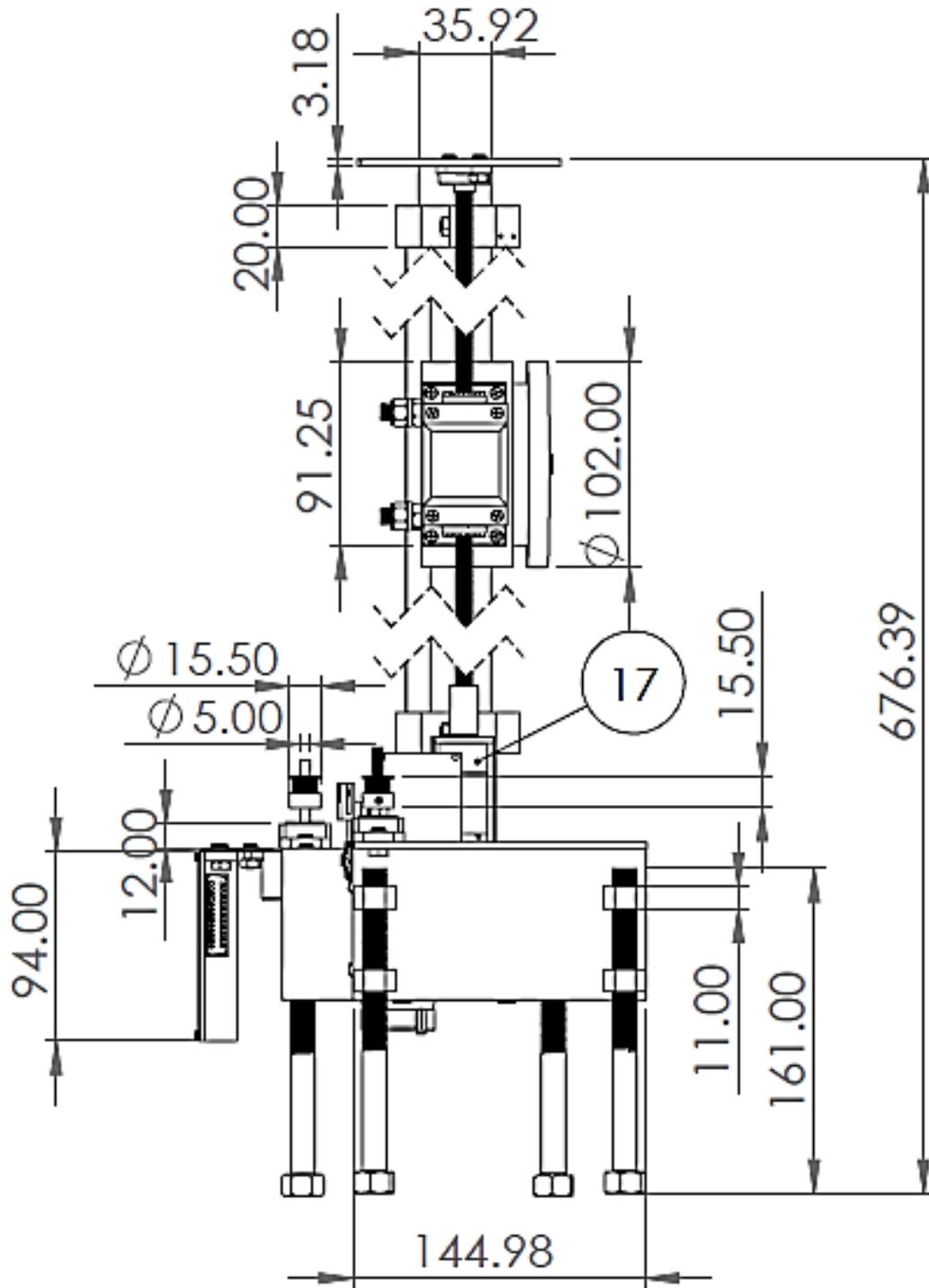


Figura 60. Robot cartesiano: vista lateral de ensamble completo de los ejes x e y

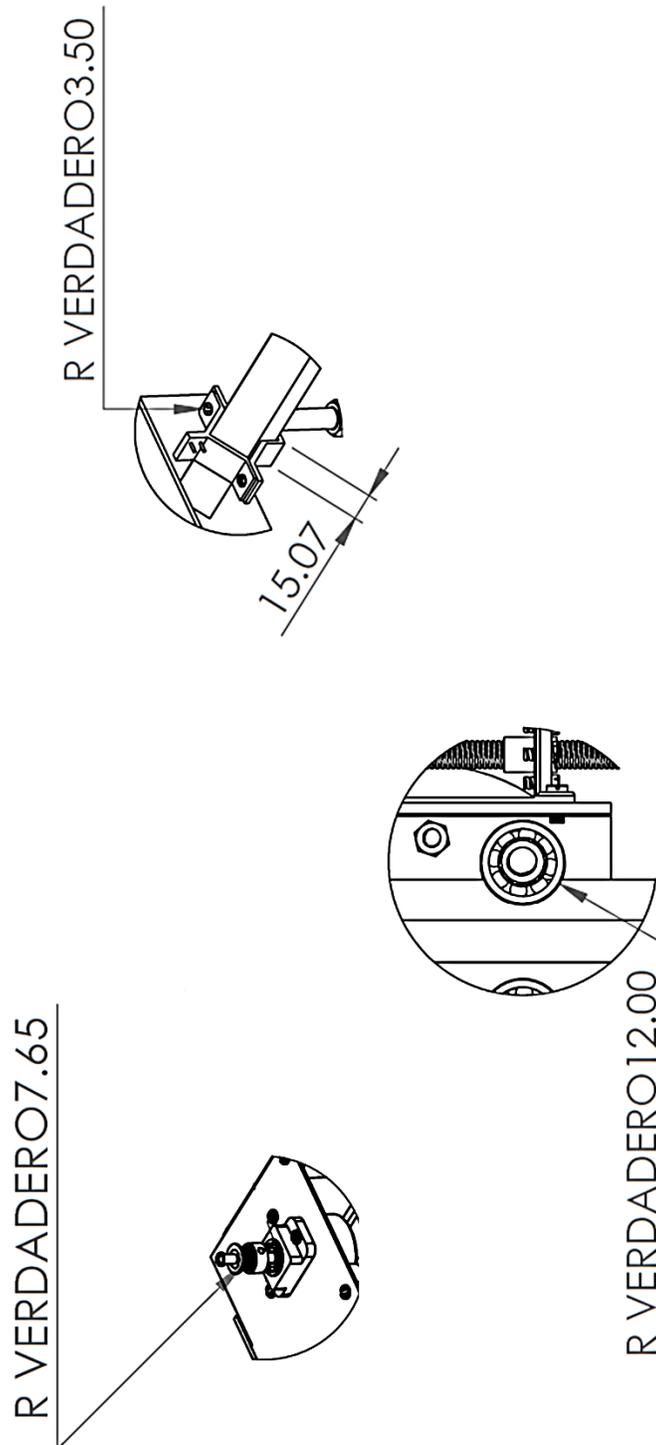


Figura 61. Robot cartesiano: acercamientos de (i) polea dentada escala 1:5 (abajo), (ii) rodamiento 624-RS escala 2:5 (centro) y (iii) base para switch escala 1:5 (arriba).

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

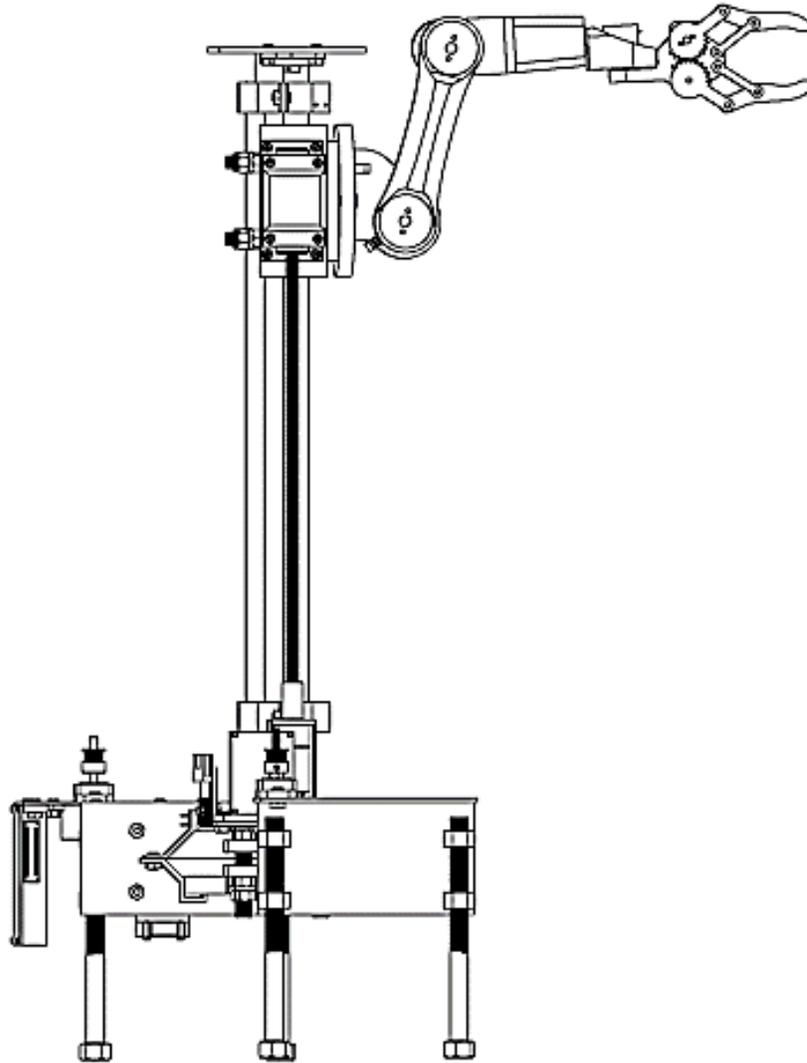


Figura 62. Robot cartesiano & Robot Arm: vista lateral

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Waist	1
2	Servo Motor MG996R	2
3	Arm 01	1
4	Servo Motor Micro 9g	3
5	Arm 02 v3	1
6	Arm 03	1
7	gear1	1
8	gear2	1
9	grip link 1	4
10	Gripper base	1
11	Gripper 1	2

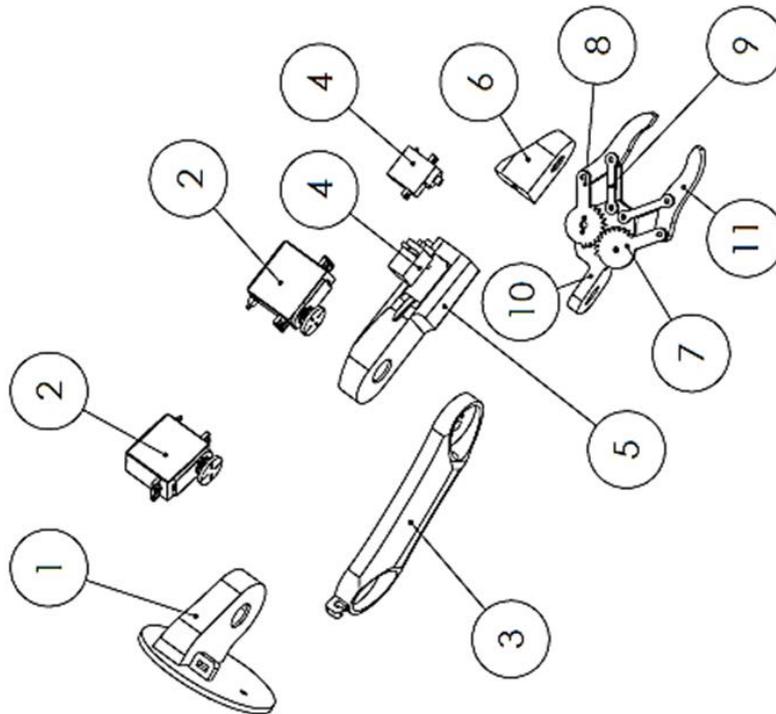


Figura 63. Robot Arm: vista explosiva & rotulación componentes.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

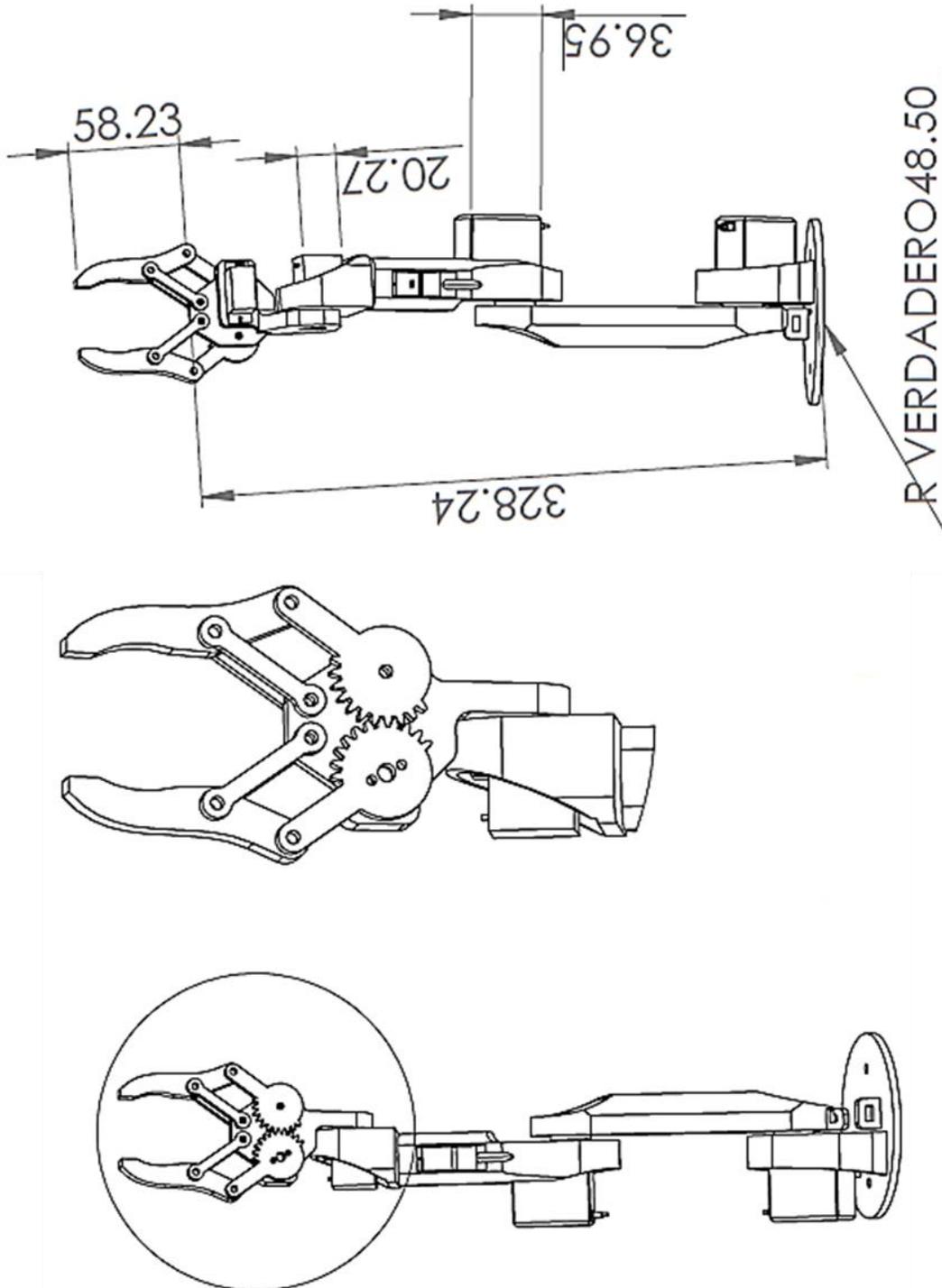


Figura 64. Robot Arm: vistas lateral con ampliación de gripper.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

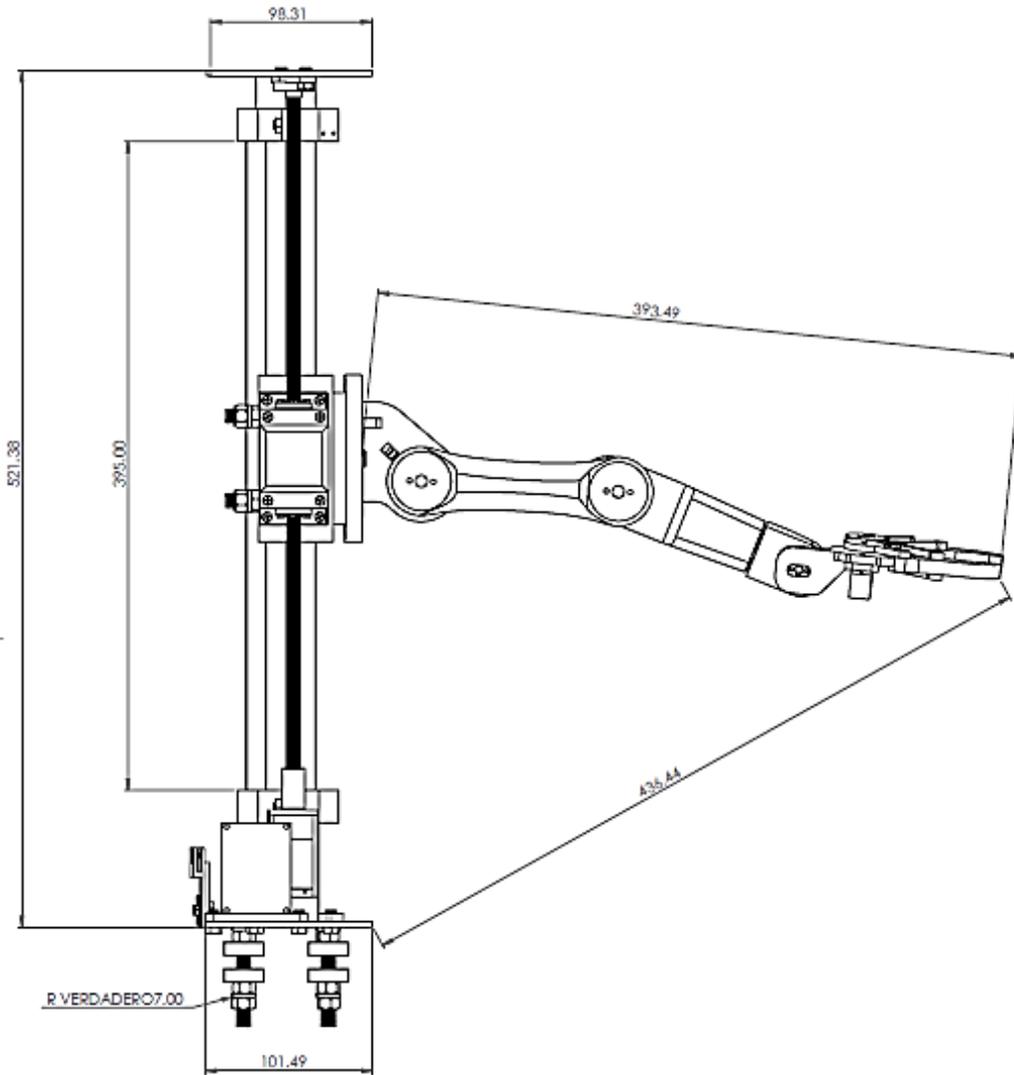


Figura 65. Ensamblaje del Robot Arm en el eje y del robot cartesiano: vista lateral.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

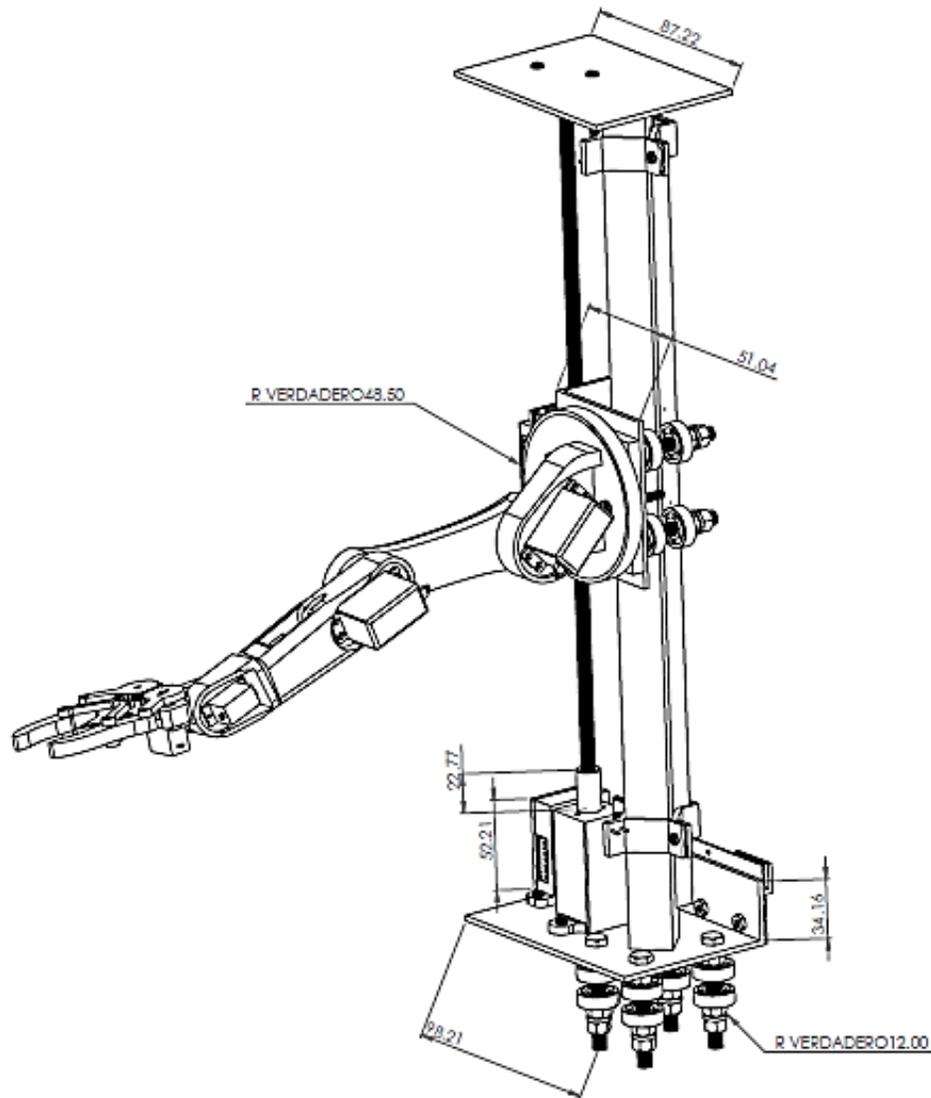


Figura 66. *Ensamble del Robot Arm en el eje y del robot cartesiano: vista frontal.*

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

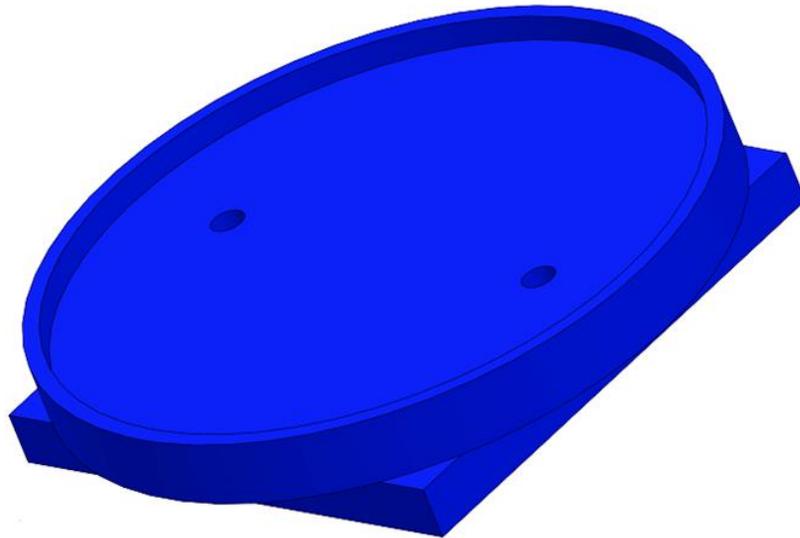


Figura 67. Robot Arm: base circular

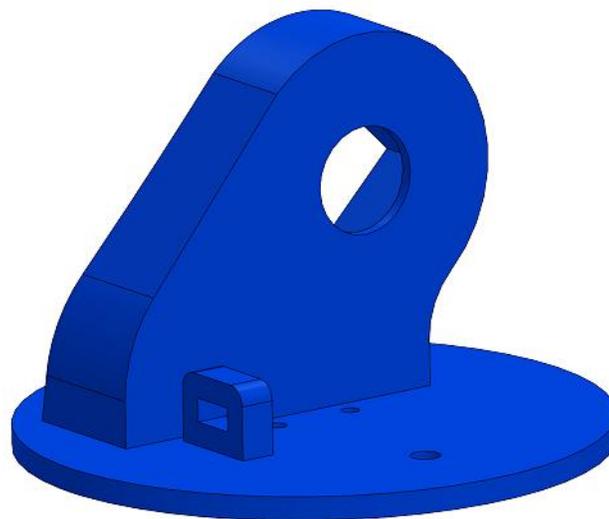


Figura 68. Robot Arm: Waist.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

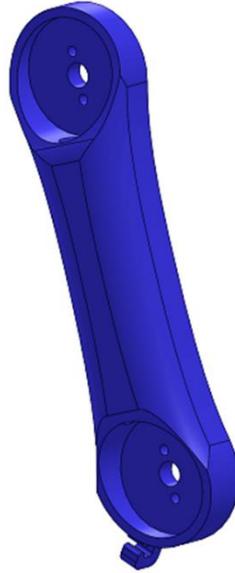


Figura 69. Robot Arm: Arm 01.



Figura 70. Robot Arm: Arm 02.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico



Figura 71. Robot Arm: Arm 03.

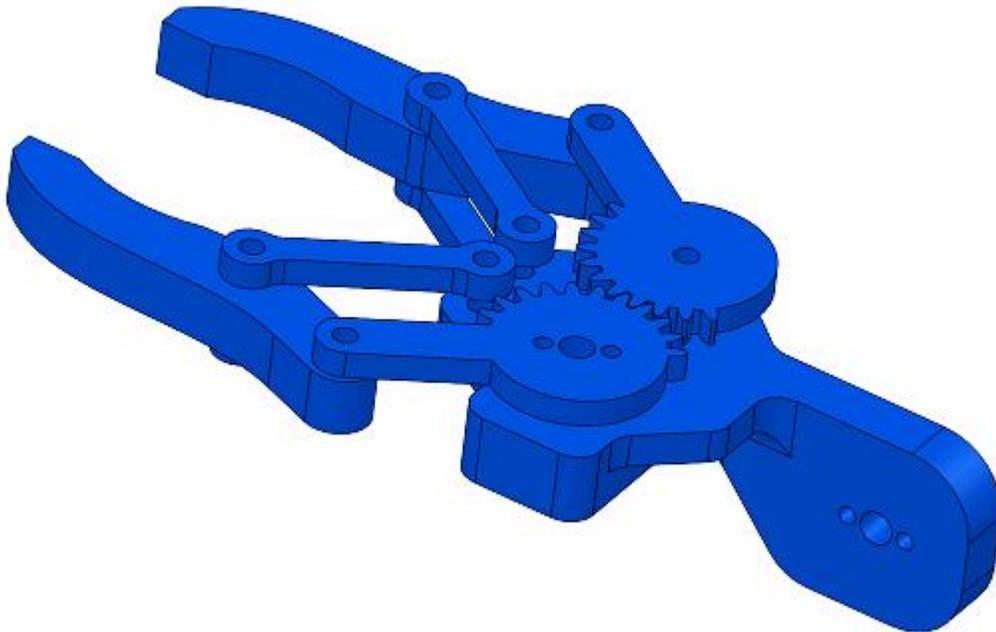


Figura 72. Robot Arm: Gripper.

4.1.2 Diseños electrónicos

El sistema embebido se diseñó en base a electrónica modular para Arduino y todo el sistema de control y automatización se fija en el gabinete de control. En la Tabla 2 se describen los elementos que componen el sistema embebido. En la Tabla 3 se presenta una lista de los componentes con sus respectivas conexiones (pines disponibles y pines requeridos) de los periféricos de acople de señales. Se establecen los pines de comunicación del módulo bluetooth HC-06, los servomotores colocados en el Robot Arm, los interruptores switch de final de carrera para interrumpir o establecer una conexión eléctrica, el driver controlador de motores puente H L298N y relevadores para abrir o cerrar el circuito.

Tabla 3. Interfaz de conexiones del sistema embebido.

MODULO BLUETOOTH HC-06				SERVOMOTORES		
CONEXIÓN DEL MODULO HC-06	ARDUINO MEGA	FUENTE AT 5V	RESISTENCIAS	CONEXIONES SHOULDER (Waist)	ARDUINO MEGA	FUENTE AT 5V
Vcc		5v		signal pin	pin 6	
GND		GND		Vcc		5v
Tx	Rx			GND	GND	GND
Rx	Tx		1 kohm y 2kohm	CONEXIONES ELBOW (codo formado por Arm 01 y Arm 02)		
				signal pin	pin 7	
LIMIT SWITCH				Vcc		5v
CONEXION SWITCH 1	ARDUINO MEGA	FUENTE AT 5V	RESISTENCIAS	GND	GND	GND
COM		5v		CONEXIONES WRIST ROLL (rotación muñeca en Arm 03)		
NO	28	GND	1 kohm	signal pin	pin 8	
CONEXION SWITCH 2				Vcc		5v
COM		5v		GND	GND	GND
NO	29		1 kohm	WRIST PITCH (inclinación muñeca en Arm 03)		
CONEXION SWITCH 3				signal pin	pin 9	
COM		5v		Vcc		5v
NO	30	GND	1 kohm	GND	GND	GND
CONEXION SWITCH 4				CONEXIONES GRIPPER		
COM		5v		signal pin	pin 10	

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

NO	31	GND	1 kohm	Vcc		5v
				GND	GND	GND
DRIVERS L298N						
CONEXIÓN DRIVER 1	ARDUINO MEGA	MOTOR DC EJE X	RELAY 1	FUENTE AT 12V		
OUT 1		PIN 1				
OUT 2		PIN2				
12v			NO	12v		
GND				GND		
ENA	PIN 3					
IN1	PIN 34					
IN2	PIN 35					
CONEXIÓN DRIVER 2		MOTOR DC EJE Y	RELAY 2			
OUT 3		PIN 1				
OUT4		PIN 2				
12v			NO	12v		
GND				GND		
IN3	PIN 36					
IN4	PIN 37					
ENB	PIN 4					
RELEVADORES						
CONEXIÓN RELAY 1	ARDUINO MEGA	DRIVER 1	FUENTE AT 5V			
NO		12v				
COM			12 v			
COIL 1	PIN 41					
COIL 2			GND			
CONEXIÓN RELAY 2		DRIVER 2				
NO		12v				
COM			12v			
COIL 1	PIN 43					
COIL 2			GND			

En la Figura 73, se presenta el diagrama electrónico elaborado en software *Proteus* en vista esquema ampliada. El circuito electrónico funciona como una interfaz entre la computadora con la que se carga el programa previamente elaborado en la placa Arduino. Esto a su vez nos permitirá controlar los diferentes actuadores (motores, switch, encoder, servomotores) para dar paso a la movilidad del sistema mecánico-eléctrico. El diagrama hace referencia a la Tabla 3 para un mejor entendimiento de interfaz y conexiones.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

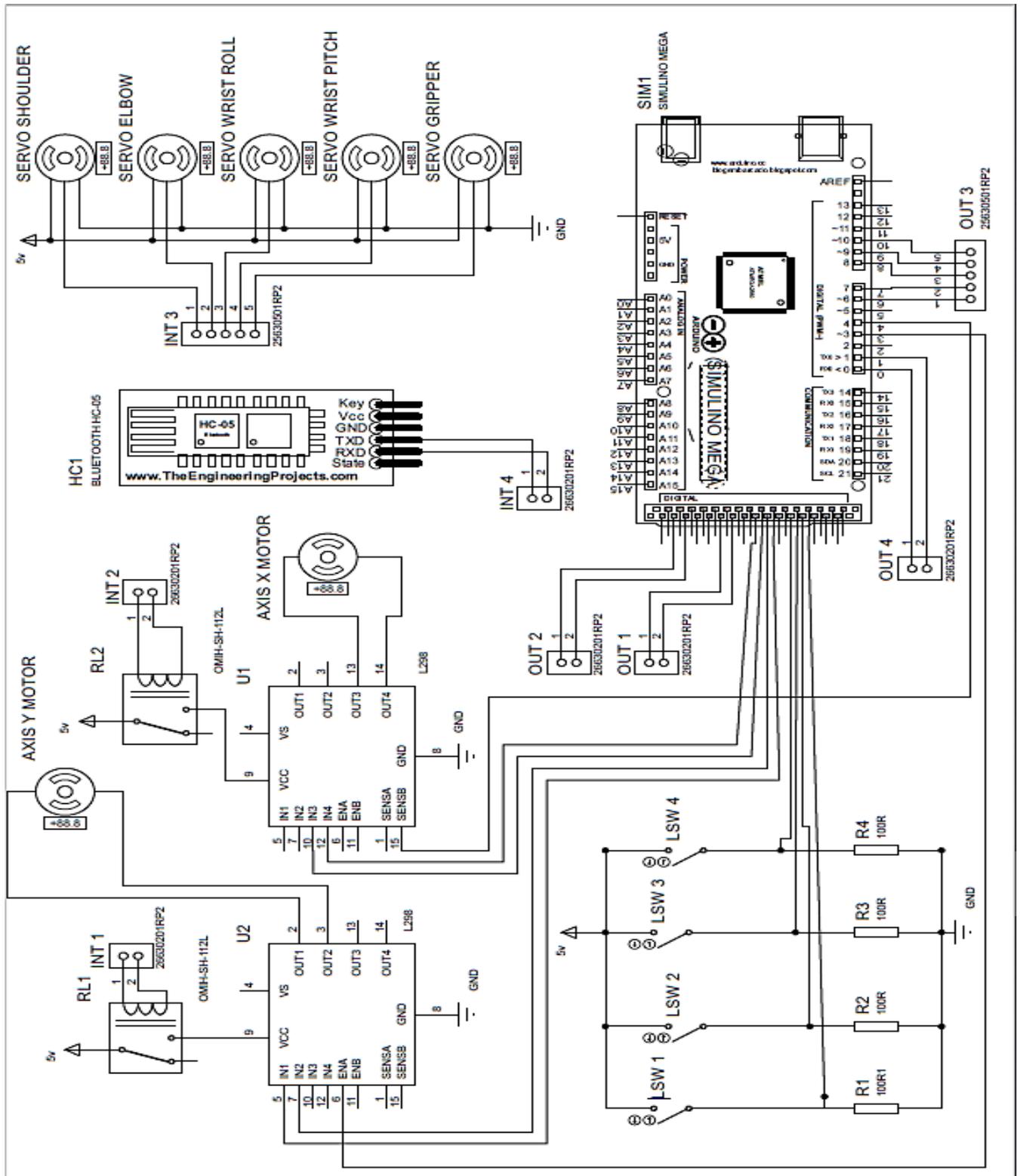


Figura 73. Diagrama electrónico del sistema embebido de control y automatización en vista esquema Proteus.

En la Figura 74, se muestra el diagrama esquemático del sistema embebido en vista protoboard elaborado en software de acceso libre *Fritzing*. Se observa la forma en que los sensores se empotran en la placa de inserción y se comunican con el microcontrolador. El diagrama hace referencia a la Tabla 3 para una mejor apreciación de los componentes con sus respectivas conexiones (pines) de los periféricos de acople de señales.

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT CARTESIANO Y BRAZO ROBÓTICO

La construcción del sistema de robot cartesiano & Robot Arm permite cumplir con el objeto fin del proyecto de poder conducir un filamento polimérico desde la boca de salida de un extrusor (dado extrusor) hasta un sistema de estiramiento mediante rodillos. El dado de extrusión se mantiene sumergido en el baño de coagulación (conteniendo una solución acuosa de dimetilformamida) donde el *gripper* de sujeción (acoplado al Robot Arm) se introduce en la solución del baño para agarrar el filamento saliente del dado y lo traslada (siempre manteniéndolo sumergido) por toda la dimensión de longitud lineal en el eje x del baño (poco más de 100 cm). Al llegar al otro extremo del baño, el *gripper* es conducido verticalmente por el eje y hasta colocarlo en el primer rodillo de estiramiento.

Todos los elementos de construcción para la estructura de soporte en los ejes x e y del robot cartesiano, sistema embebido de control y automatización, interfaz de comunicación (cableado), eslabones del Robot Arm, bases y piezas en PLA, actuadores, *sliders* y elementos generales se especifican en la Tabla 2.

En particular se logra lo siguiente:

- (a) El robot cartesiano logra desplazarse en el eje x llevando consigo todo el armazón del Robot Arm montado en la *slider* del eje x .
- (b) El Robot Arm logra trasladarse en el eje y del robot cartesiano mediante su montaje en la *slider* del eje y .
- (c) El *gripper* de agarre del Robot Arm logra sumergirse en el baño y realizar un movimiento lineal en el eje x por toda la dimensión del medio de coagulación.
- (d) El *gripper* de agarre del Robot Arm logra realizar un movimiento lineal en el eje y hasta el sistema de estiramiento.

4.2.1 Fabricación de piezas en PLA

De la Figura 75 a la 79 se presentan las vistas de las piezas de del Robot Arm fabricadas en PLA (excepto Arm 03).

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

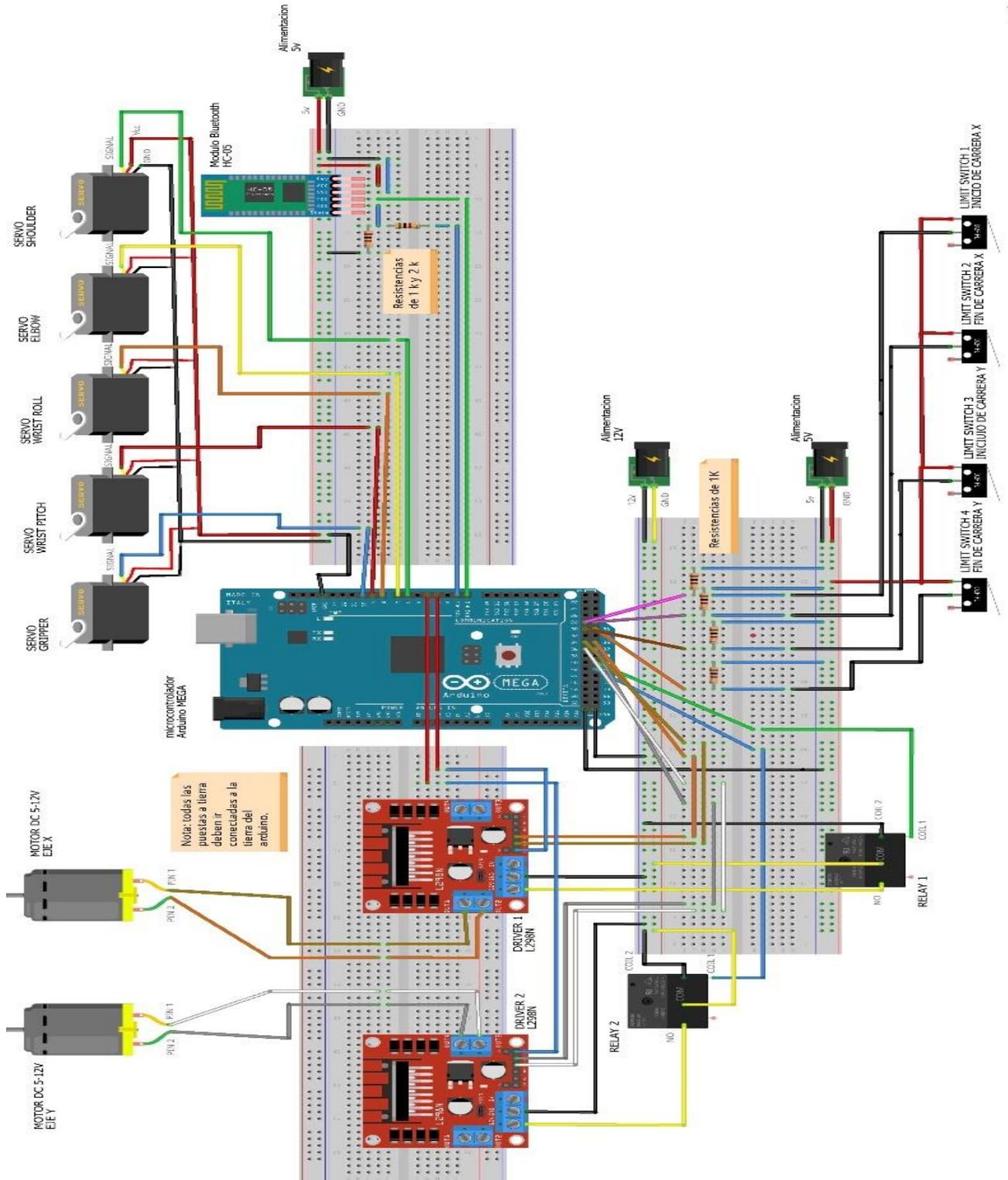


Figura 74. Diagrama electrónico del sistema embebido de control y automatización en vista protoboard Fritzing.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico



Figura 75. Robot Arm: base fabricada en PLA.

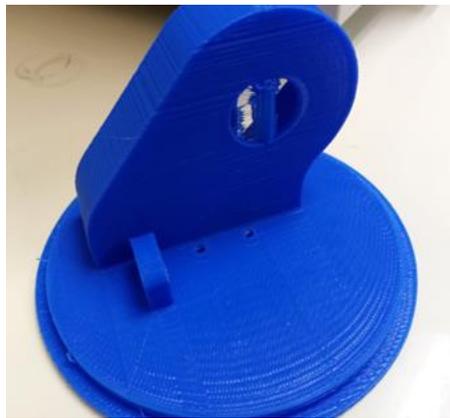


Figura 76. Robot Arm: Waist fabricada en PLA.



Figura 77. Robot Arm: Arm 01 fabricada en PLA.



Figura 78. Robot Arm: Arm 02 fabricada en PLA.



Figura 79. Robot Arm: pinza angular fabricada en PLA y gripper de aluminio.

4.2.2 Fabricación de estructura de soporte de robot cartesiano y sliders

La construcción de la estructura de soporte del eje x e y del robot cartesiano y de las sliders consistió en el ensamble de piezas metálicas de solera, tubular, tornillería, baleros, entre otras. Se emplearon máquinas y herramientas convencionales para soldadura, corte y perforaciones. Por ejemplo, para fabricar las bases de sujeción de los baleros para las sliders se emplearon 9 piezas de solera para su construcción.

Para las sliders se optó por un sistema de carros con baleros que permiten el movimiento libre de forma lineal en cualquiera de los dos ejes x e y . El sistema se basa en un *motorized slider* para cámara fotográfica y en base a su principio de funcionamiento se fue desarrollando bajo diseño propio en SolidWorks empleando la *toolbox* de excelencia del software. El sistema de la slider consiste en una placa de 79 mm de ancho x 101 mm de largo, con 4 perforaciones en cada esquina donde se introducen tornillos de 68 x 8 mm donde irán colocados 2 baleros en

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

cada uno de los tornillos y sujetos a estos con rondanas y tuercas. En la Figura 80, se presentan varias imágenes del desarrollo de la construcción de las sliders y los ejes del robot cartesiano.

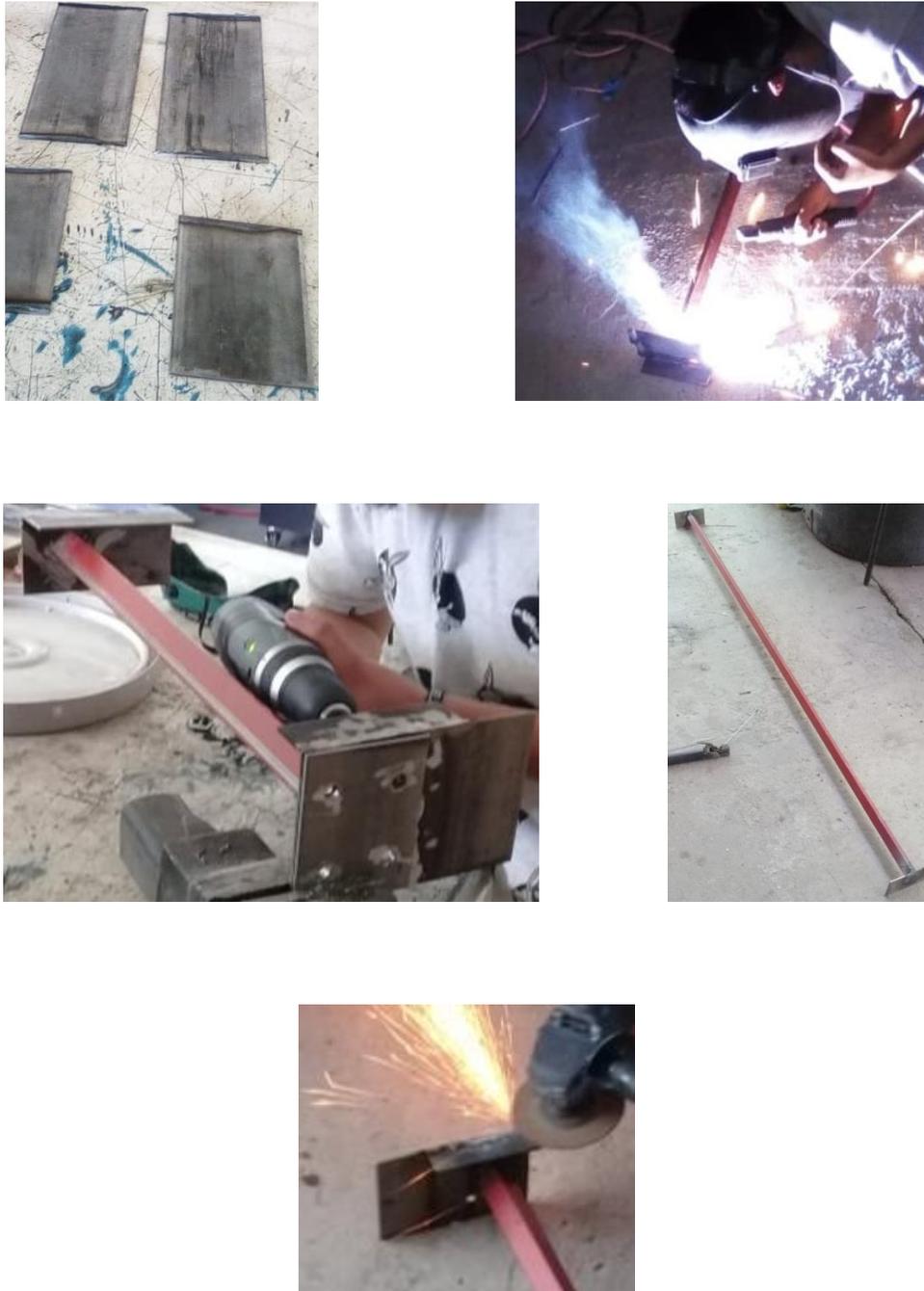


Figura 80. Operaciones de manufactura de estructuras de soporte metálicas de robot cartesiano y sliders: corte, soldadura, perforación, esmeril.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

De la Figura 81 a la 105 se presentan diferentes vistas y acercamientos de las secciones del sistema construido. Lo anterior como evidencia del logro del objeto fin del presente trabajo.

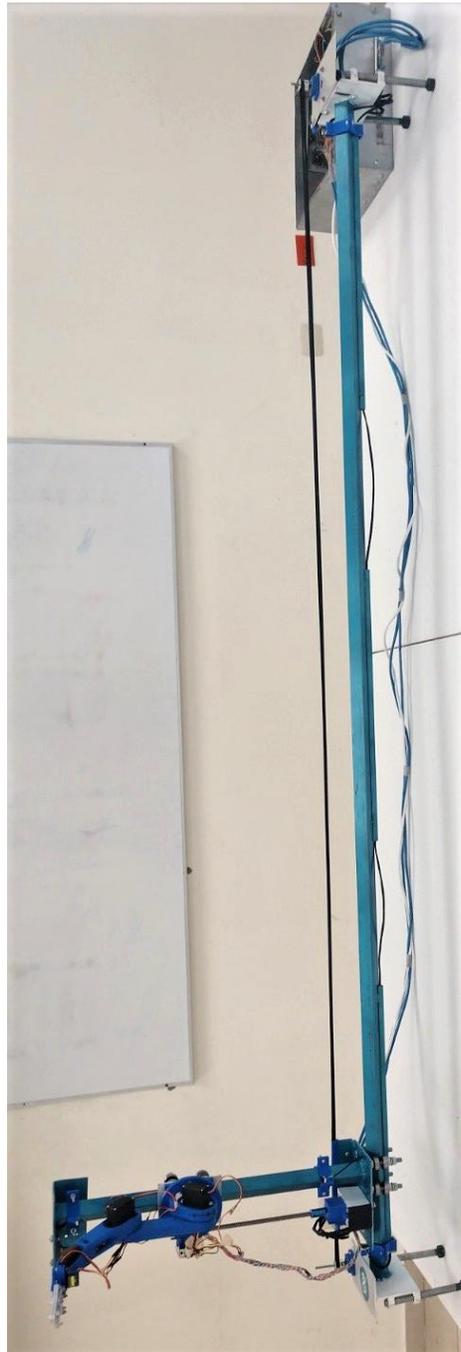


Figura 81. Robot cartesiano & Robot Arm: vista frontal completa.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

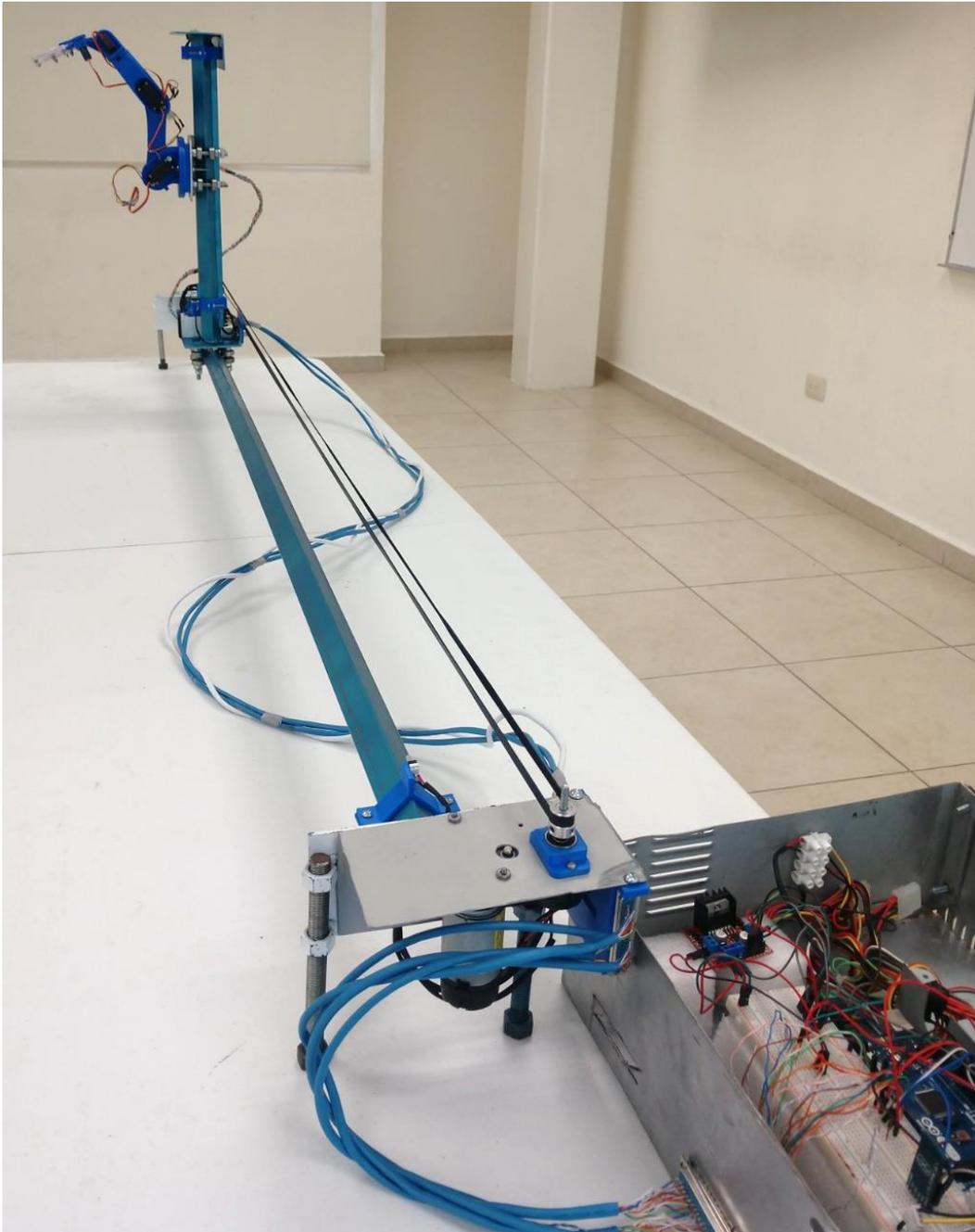


Figura 82. Robot cartesiano & Robot Arm: vista lateral completa.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

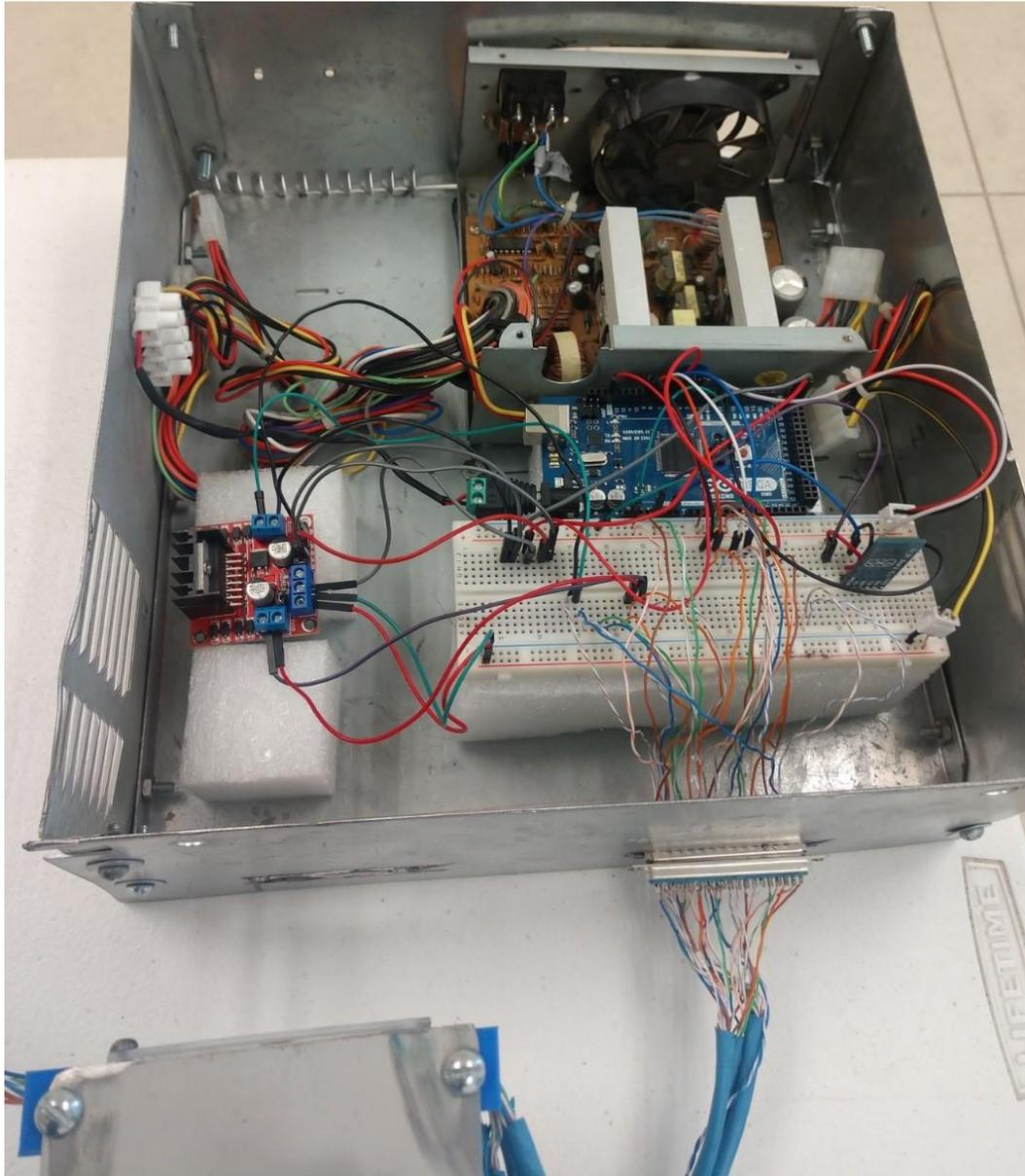


Figura 83. Gabinete de control de sistema embebido.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico



Figura 84. Robot cartesiano en el eje x.

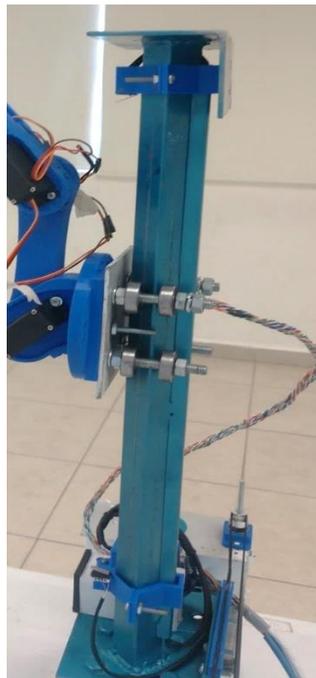


Figura 85. Robot cartesiano en el eje y.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

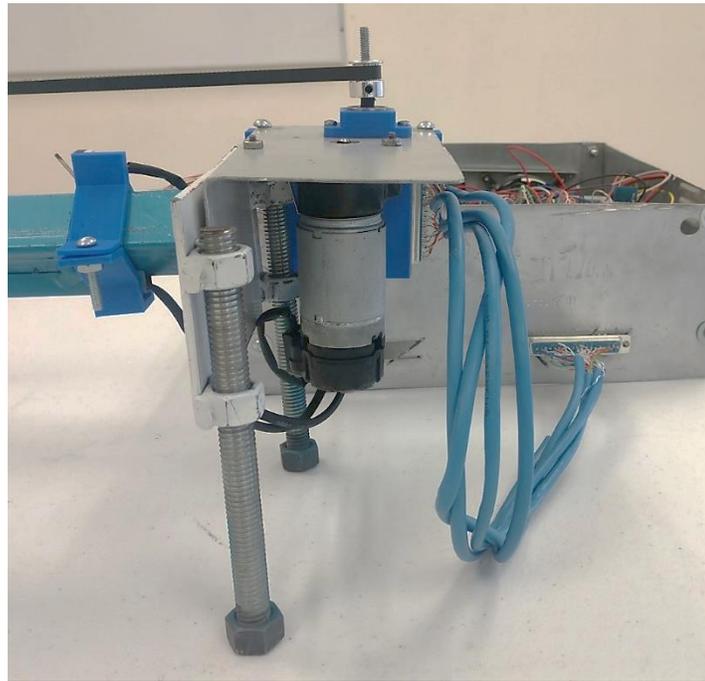


Figura 86. Soporte derecho del robot cartesiano.

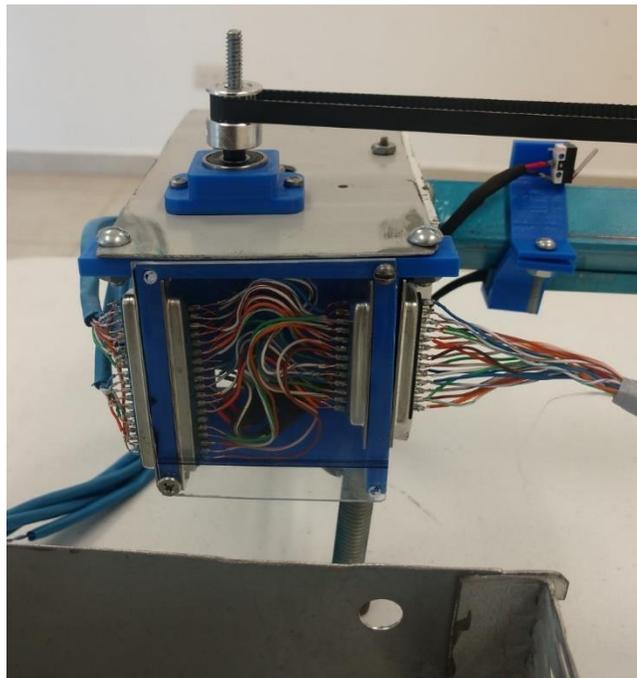


Figura 87. Interfaz puertos serie D37 y D25 en soporte derecho del robot cartesiano.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

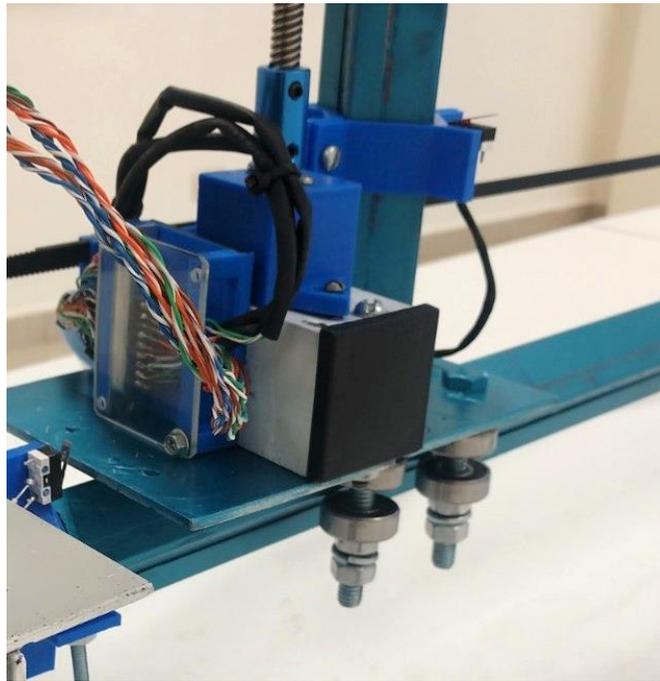


Figura 88. Slider del eje x vista frontal.

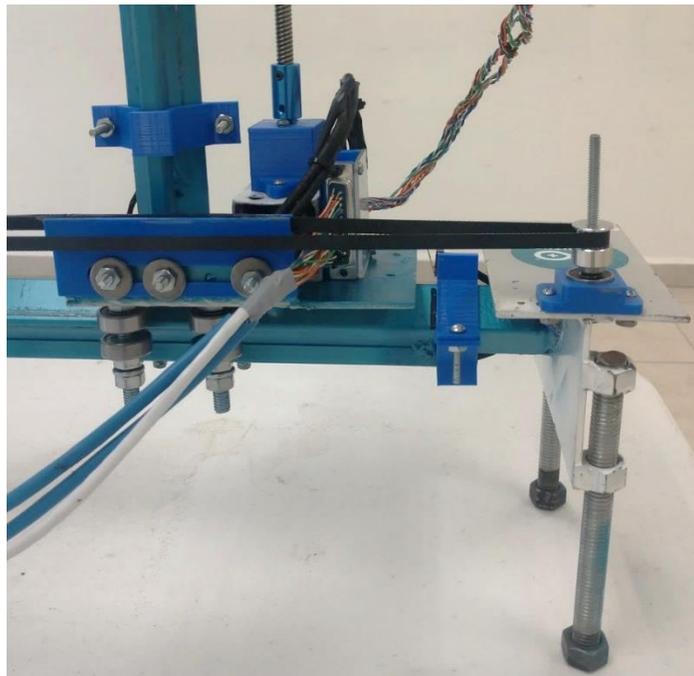


Figura 89. Slider del eje x vista trasera y soporte izquierdo del robot cartesiano.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

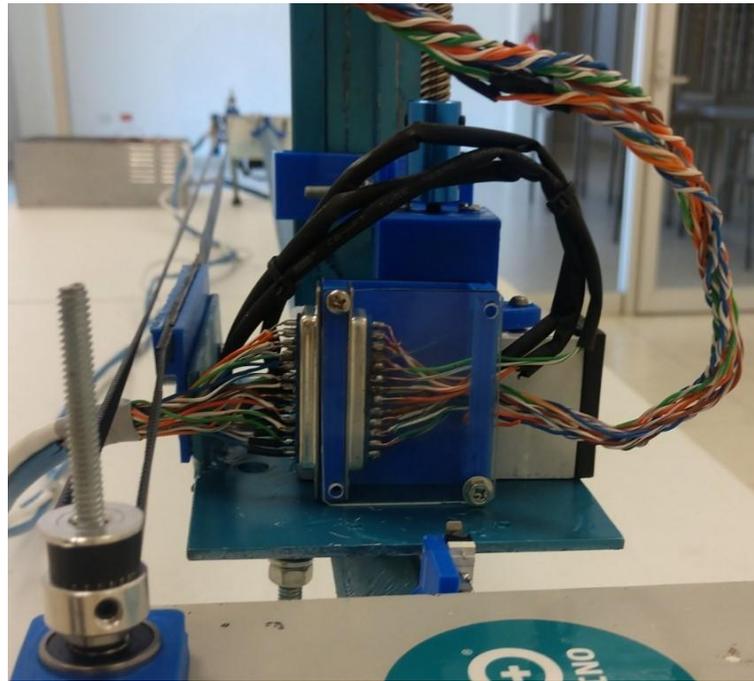


Figura 90. Interfaz puertos serie D25 en slider del eje x del robot cartesiano.



Figura 91. Slider del eje y vista lateral.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

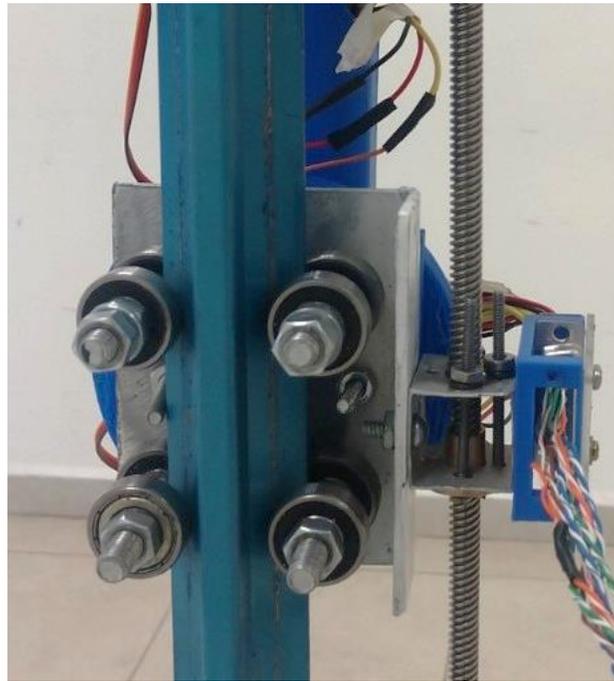
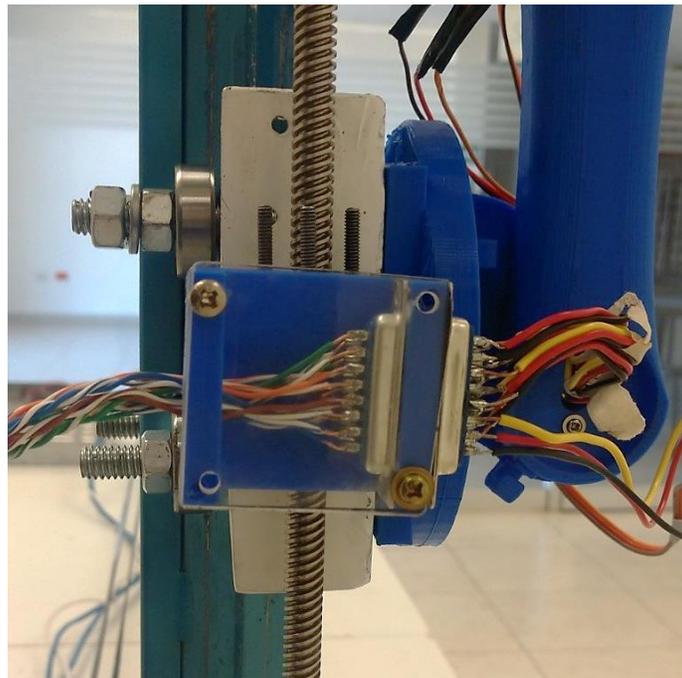


Figura 92. Slider del eje y vista posterior.



. Figura 93. Interfaz puertos serie D15 en slider del eje y del robot cartesiano.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

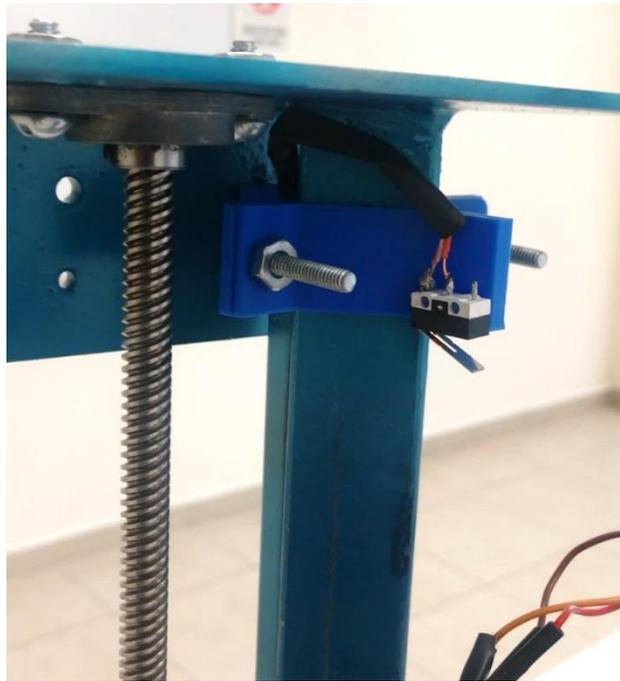


Figura 94. Switch de fin de carrera en el eje y para desplazamiento de Robot Arm.

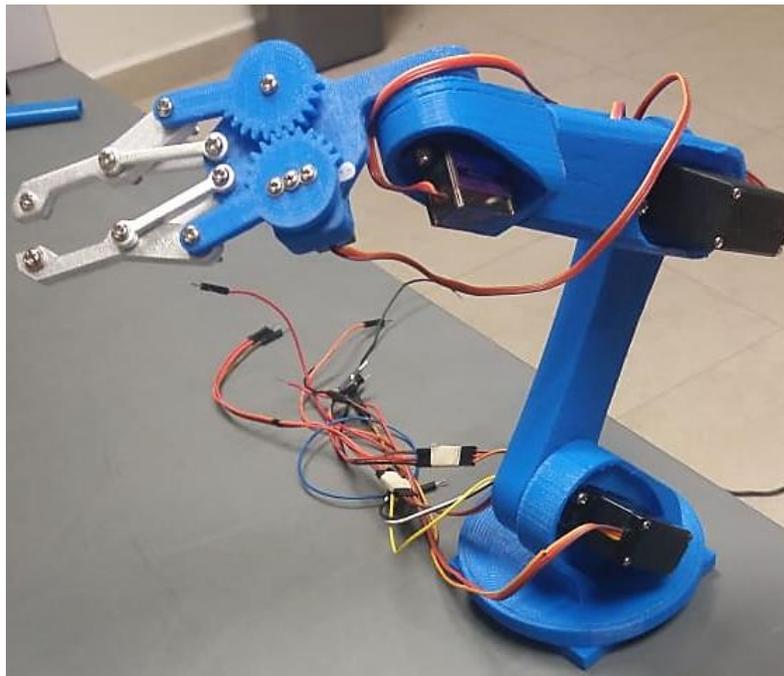


Figura 95. Vista de Robot Arm con servomotores MG90S integrados.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

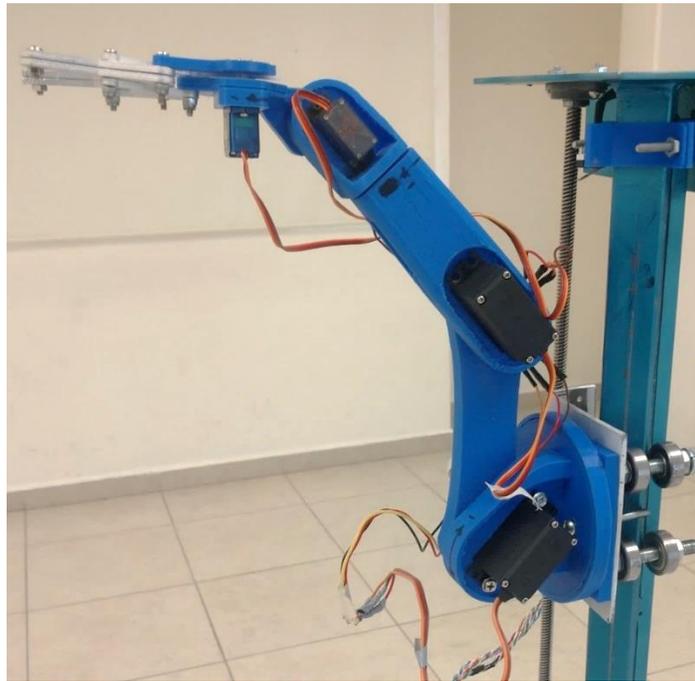


Figura 96. Robot Arm montado sobre eje y del robot cartesiano: vista lateral.

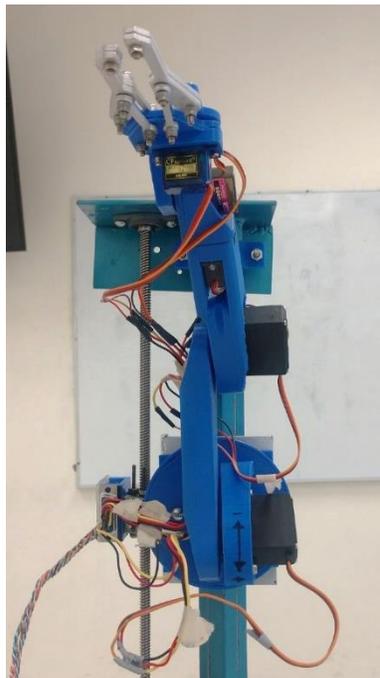


Figura 97. Vista frontal del Robot Arm sobre el eje y.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

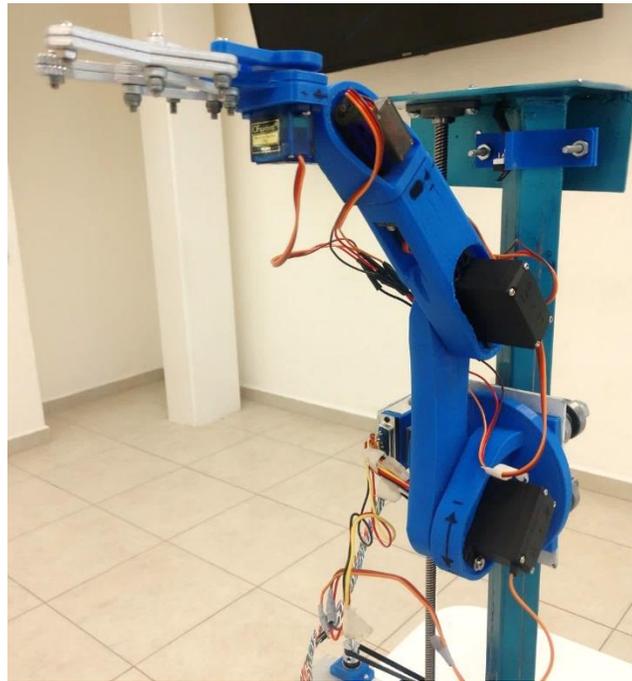


Figura 98. Vista 1 del Robot Arm sobre el eje y.

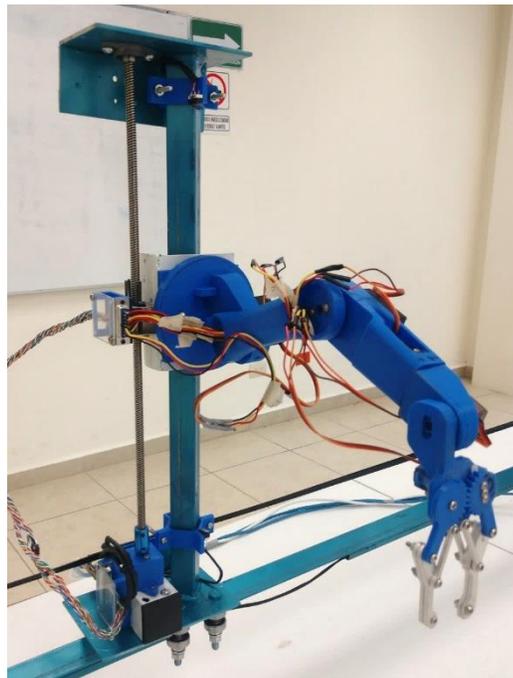


Figura 99. Vista 2 del Robot Arm sobre el eje y.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

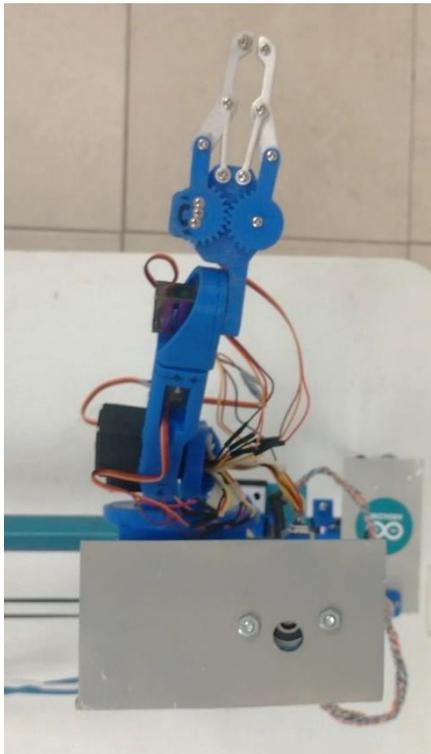


Figura 100. Vista superior del Robot Arm sobre el eje y.

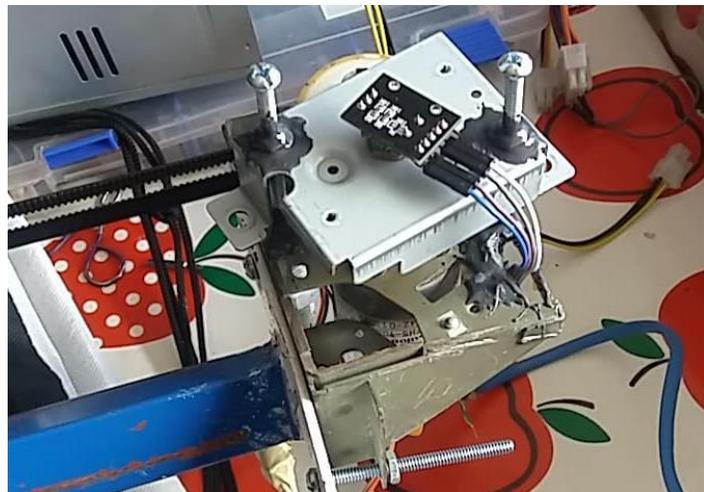


Figura 101. Encoder KY-040 rotatorio.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

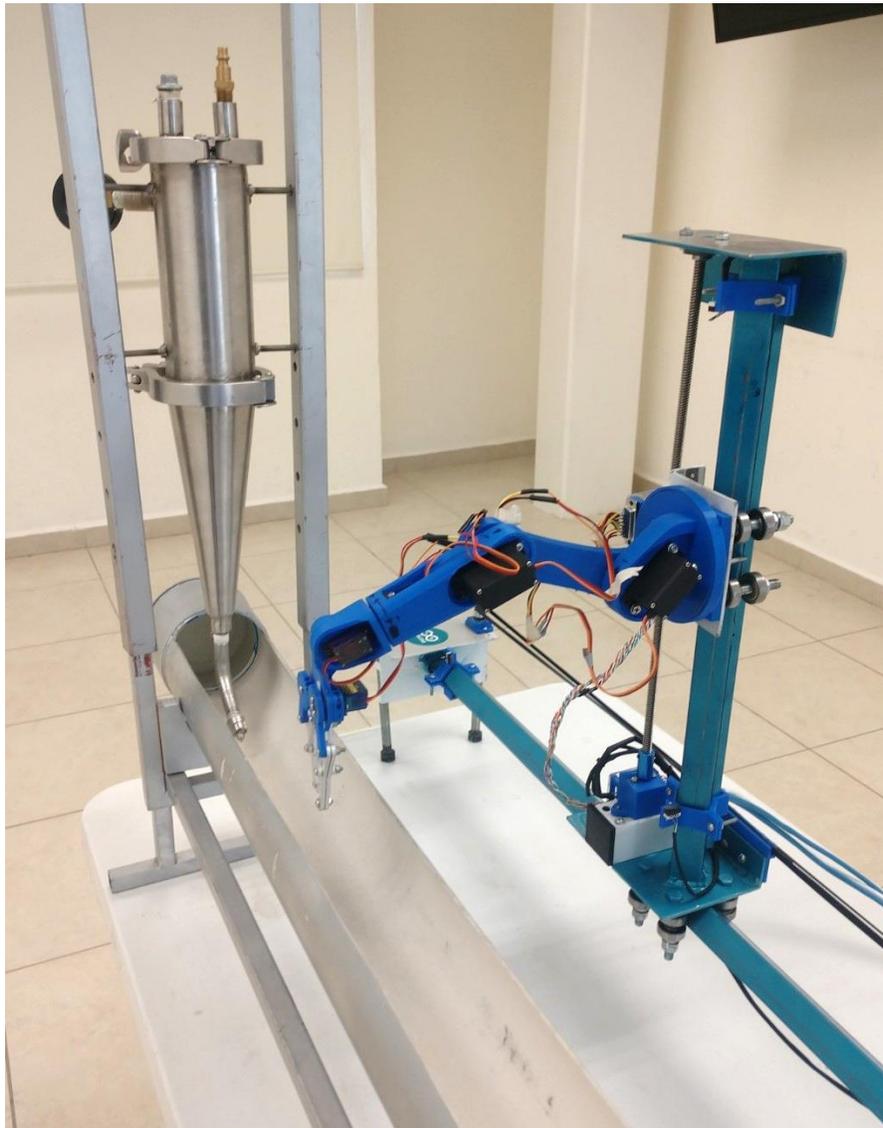


Figura 102. Sistema de extrusión completo: extrusor + robot cartesiano + Robot Arm: vista 1.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

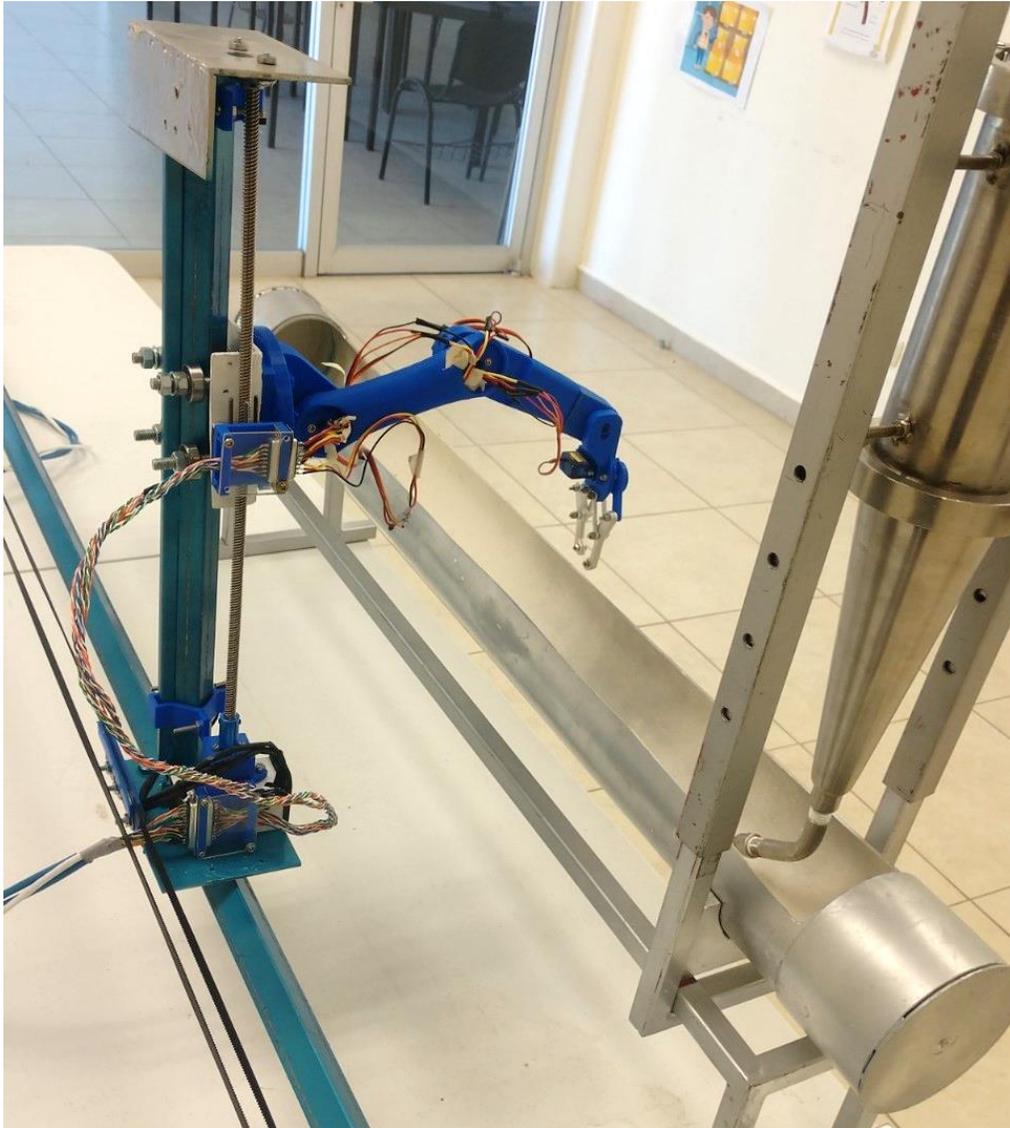


Figura 103. Sistema de extrusión completo: extrusor + robot cartesiano + Robot Arm: vista 2.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

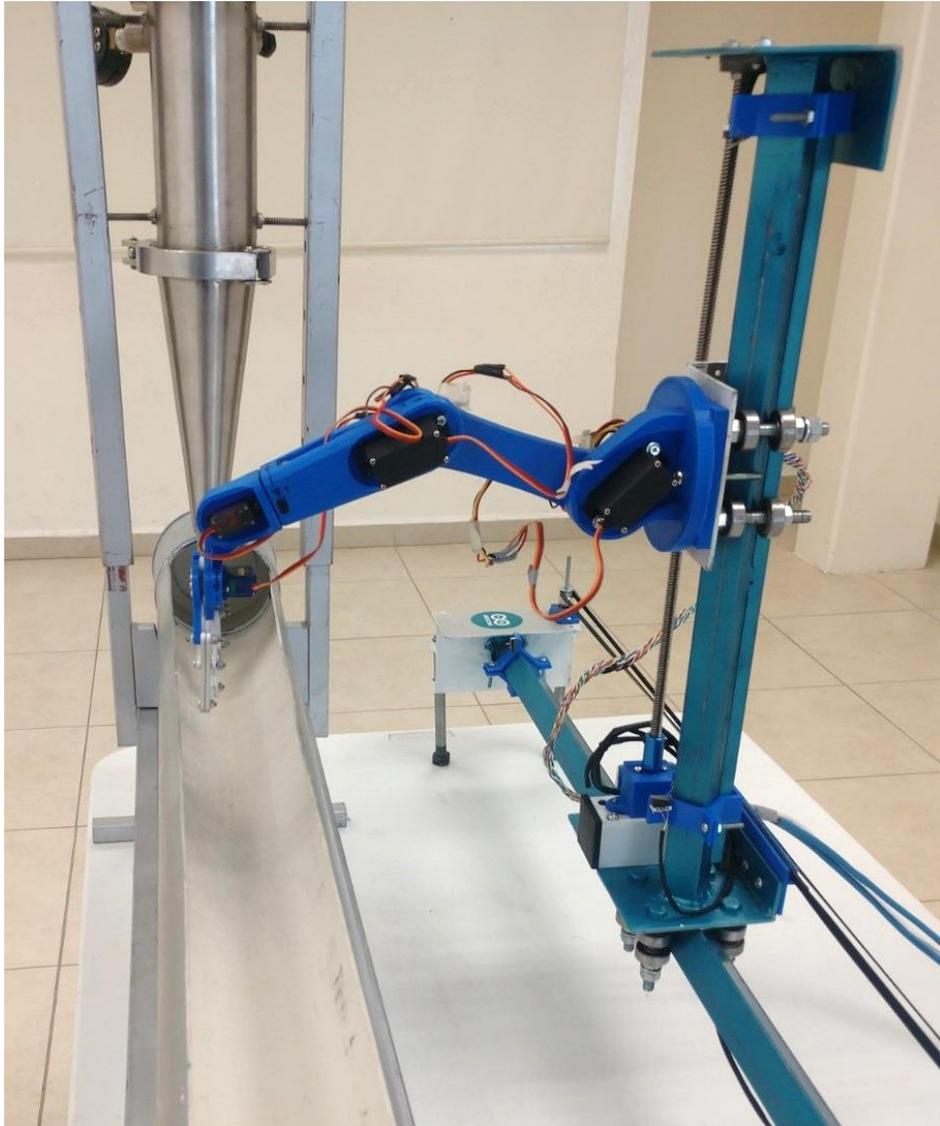


Figura 104. Sistema de extrusión completo: extrusor + robot cartesiano + Robot Arm: vista 3.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

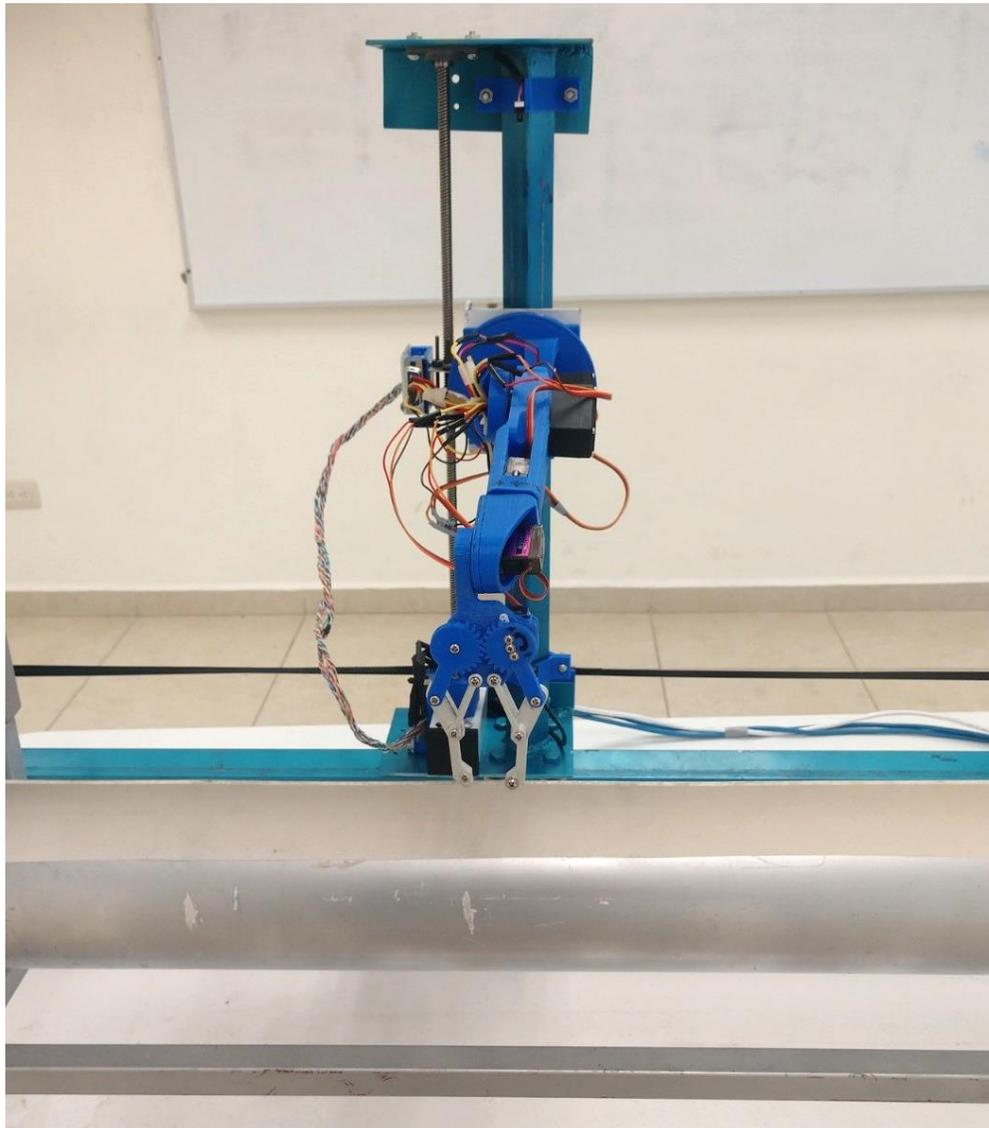


Figura 105. Sistema de extrusión completo: extrusor + robot cartesiano + Robot Arm: vista 4.

En el caso del potenciador Encoder KY-040 se determinó no integrarlo finalmente debido a que las velocidades preliminares de traslación fueron completamente controlables por el sistema embebido logrado sin poner en riesgo la integridad de los componentes durante sus recorridos.

4.3 SISTEMA DE CONTROL

4.3.1 Comunicación serial y cableado

Se estableció el diseño y construcción de una comunicación serial empleando un sistema de cableado de red de Ethernet, cable para servomotores y cables jumper dupont así como puertos serie D15, D25 y D37 pines. En las Figuras de la 81 a la 105 también se pueden apreciar las conexiones y terminales construidas.

4.3.2 Código Arduino

El código de control y automatización para el sistema embebido se desarrolló en lenguaje Arduino bajo una estructura de sintaxis textual de diseño propio. Se tomaron como guía varias fuentes de información electrónica (ver punto 3.3) disponibles en la red libremente, así como librerías integradas por default en el software de acceso libre.

En el Anexo 3 se presenta el código Arduino desarrollado para este trabajo.

4.3.3 Interfaz gráfica LabVIEW

Se desarrolla una interfaz por medio de lenguaje de programación visual gráfico LabVIEW versión estudiante para el control del robot cartesiano y del Robot Arm. El programa se constituye " por medio de diagramas de bloques que representan un texto de instrucciones o sentencias en modalidad "off-line" (no presentados en este trabajo debido a que se maneja versión estudiante que no cuenta con la herramienta para exportar la información en archivos gráficos de mayor nitidez).

En la Figura 106, se muestra un diagrama de flujo elaborado en software libre *Lucidchart* donde se describe los pasos de programación definidos en LabVIEW bajo lo siguiente:

1. Motor de eje vertical = motor del eje y.
2. Motor de eje horizontal = motor del eje x.
3. Eje horizontal = eje x.
4. Eje vertical = eje y.
5. Anexo: para posicionar el robot en posición original se debe accionar otro botón en el tablero virtual.

HS: Horizontal Start.

HF: Horizontal Final.

HM: horizontal Middle.

VS: Vertical Start.

VF: Vertical Final.

En la Figura 107, se presenta el IDE de la interfaz LabVIEW desarrollada donde: (A) indicador de posición en el eje y, (B) indicador de posición en el eje x, (C) indicadores de posiciones, (D) velocímetros, (E) indicadores de cambio de aceleración pwm (*pulse width modulation*-modulación por ancho de pulso), (F) botones play y stop.

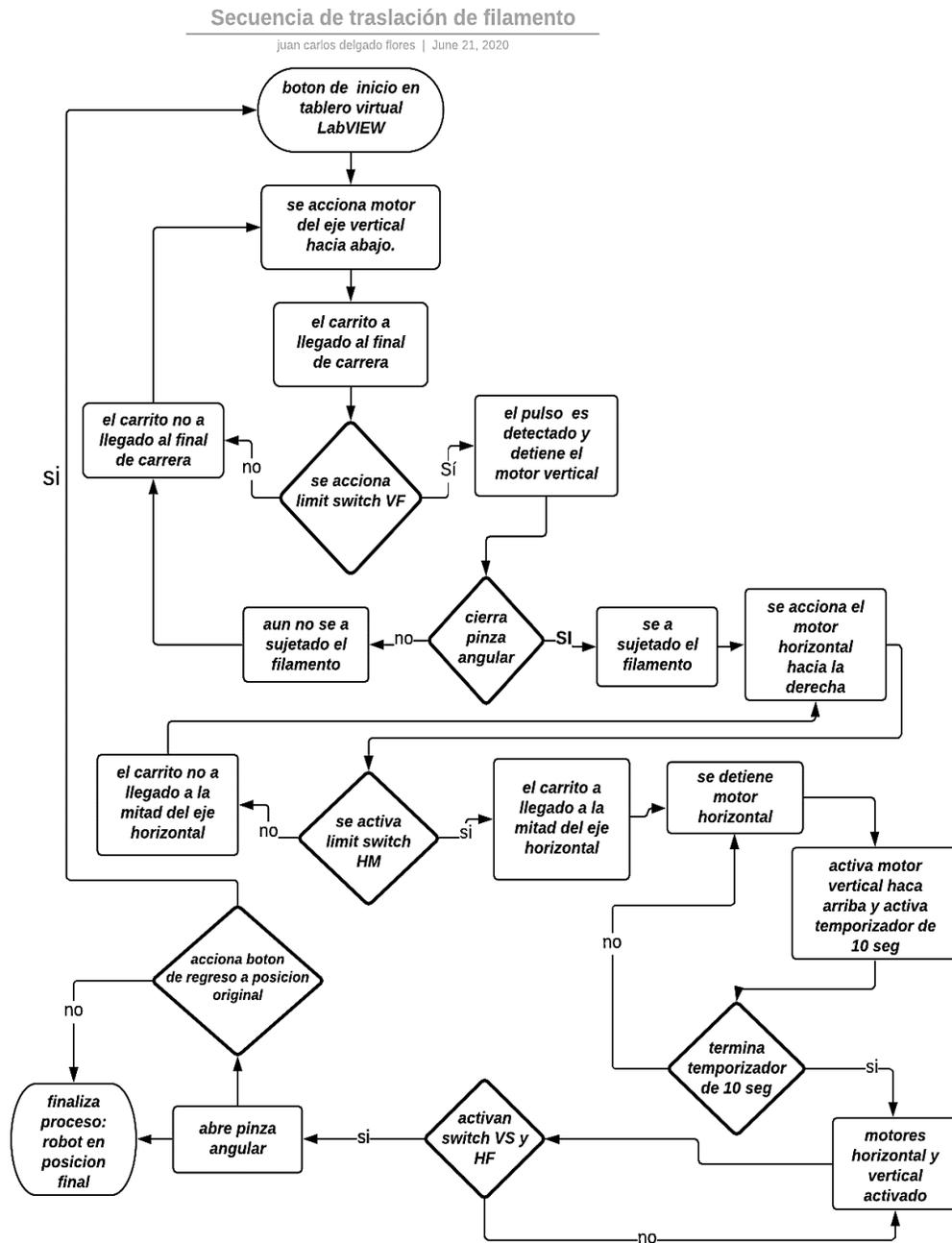


Figura 106. Secuencia de programación en LabVIEW para el control del sistema.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

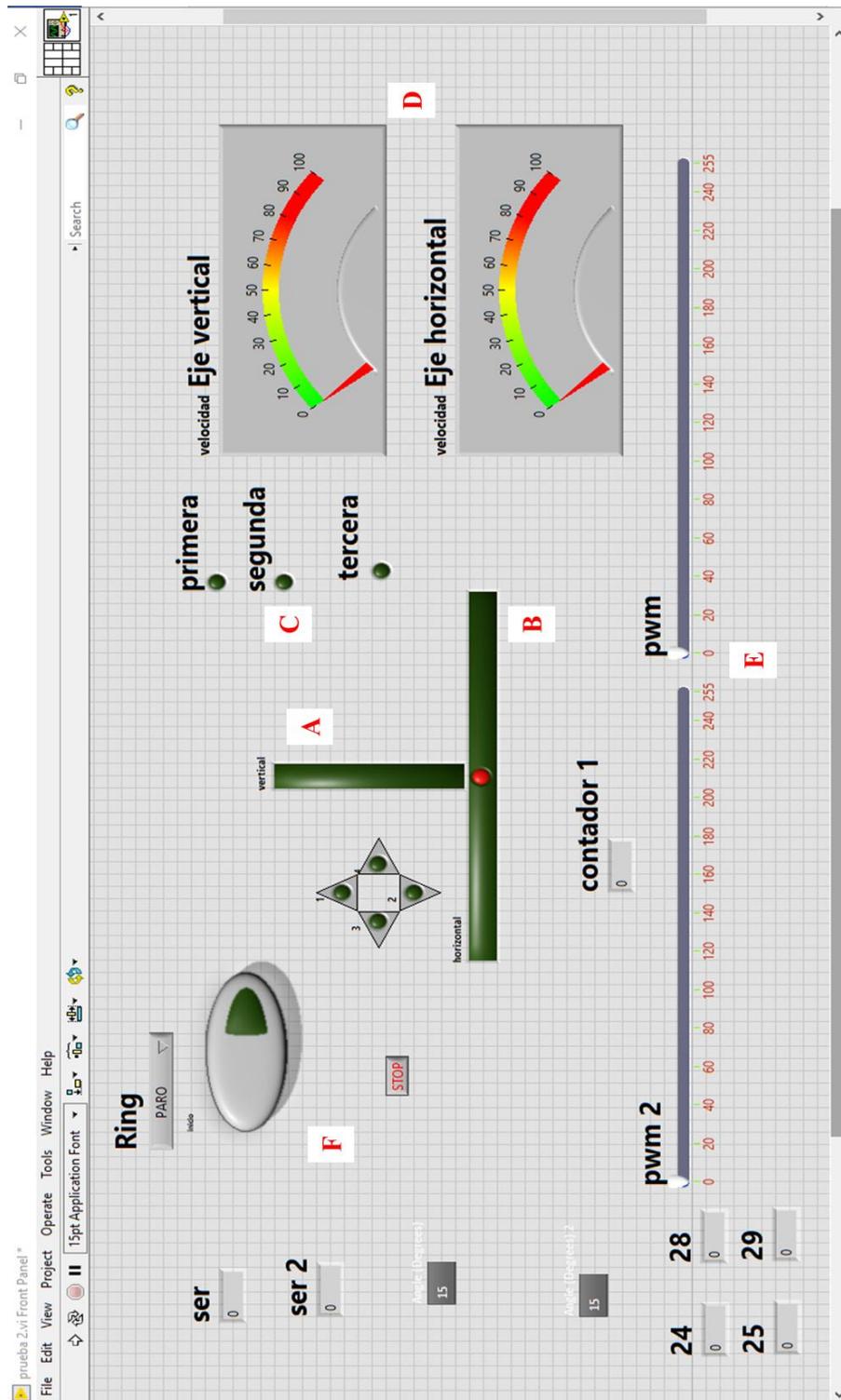


Figura 107. Interfaz visual desarrollada en LabVIEW para el control del sistema.

4.3.4 Interfaz gráfica MIT App Inventor

Adicionalmente se diseñó una interfaz gráfica remota (vía módulo bluetooth) y teléfono inteligente empleando la aplicación MIT App Inventor para controlar los desplazamientos del robot cartesiano y del Robot Arm en los ejes x , y e z .

En la Figura 108, se muestra la interfaz desarrollada para el control de los ejes x e y del robot cartesiano: (a) botones para movimientos derecha (*left*), izquierda (*right*), arriba (*up*) y hacia abajo (*down*); (b) botón de paro (*stop*); (c) potenciómetro para velocidad (*speed*); (d) imagen del esquema direccional de los ejes; (e) botón para cambiar a la interfaz del robot angular (*robot arm control*) y (f) botones para encender (*motor on*) y apagar (*motor off*) motores.

En la Figura 109, se muestra la interfaz desarrollada para el control del Robot Arm: (i) botones para conectar (*connect*) y desconectar (*disconnec*), así como un indicador de conexión/desconexión; (ii) botones para guardar movimientos (*save*), correr movimientos (*run*) y resetear (*reset*); (iii) potenciómetros tipo *sliders* para los servomotores del *gripper* (*grip*), muñeca angular (*wrist pitch*), muñeca giratoria (*wrist roll*), codo (*elbow*) y hombro (*shoulder*); (iv) potenciómetro para velocidad (*speed*); (v) botón para cambiar a la interfaz del robot cartesiano (*cartesian control*) y (vi) botones para encender (*motor on*) y apagar (*motor off*) motores.

En la Figura 110 se presentan los IDE de MIT App Inventor en pantalla en un dispositivo móvil marca Huawei.

En el Anexo 4 se presenta el código MIT App Inventor desarrollado para este proyecto.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

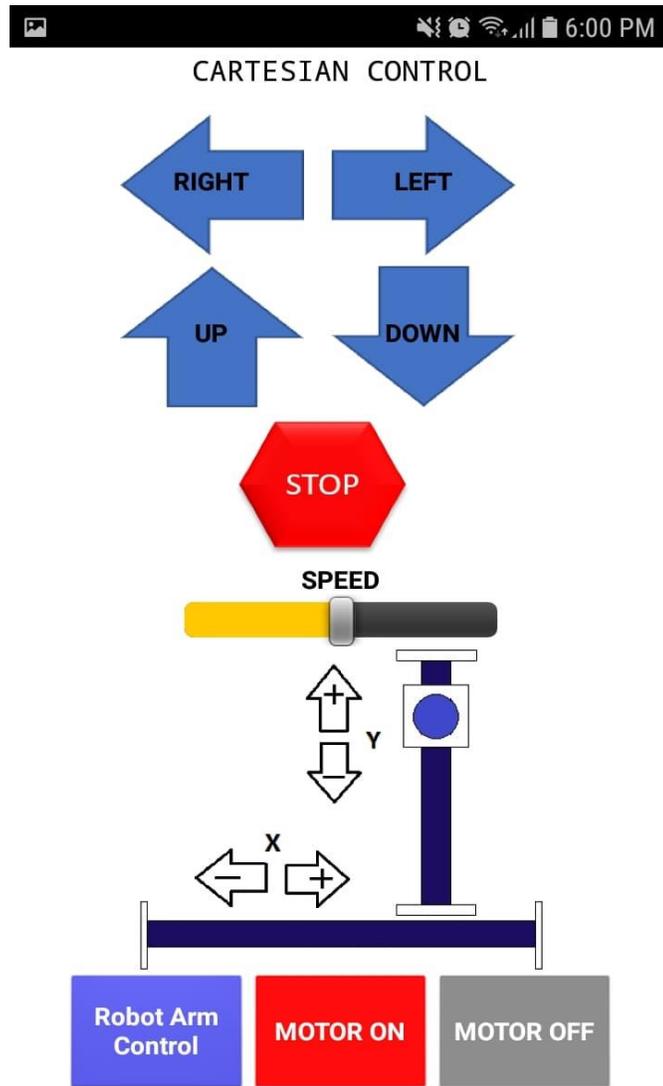


Figura 108. Interfaz visual desarrollada en MIT App Inventor para el robot cartesiano.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

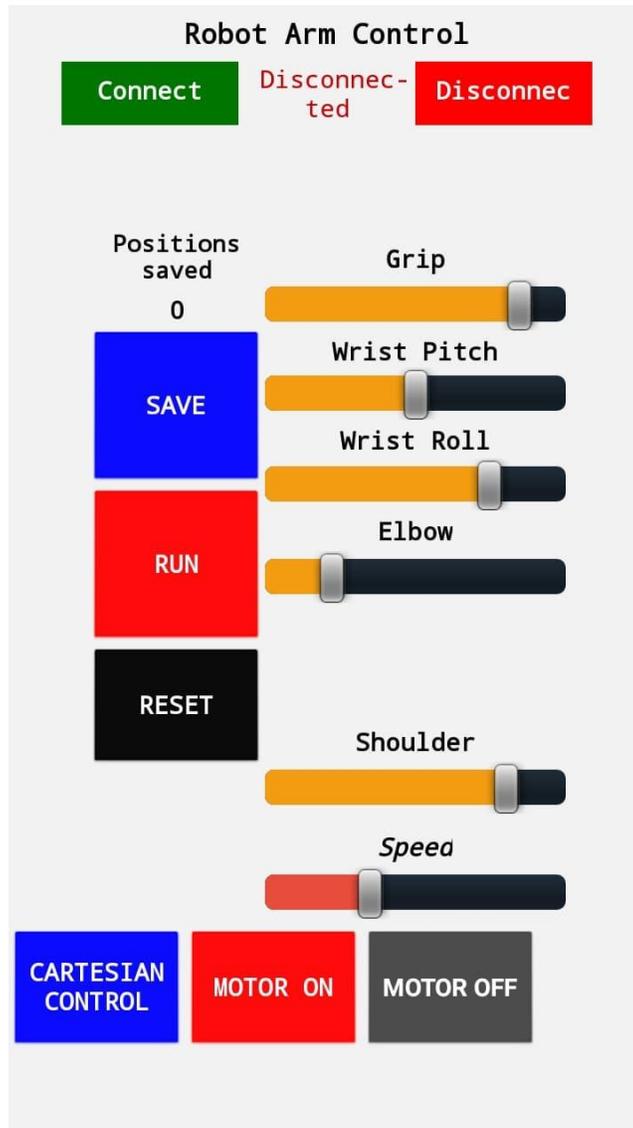


Figura 109. Interfaz visual desarrollada en MIT App Inventor para el Robot Arm.

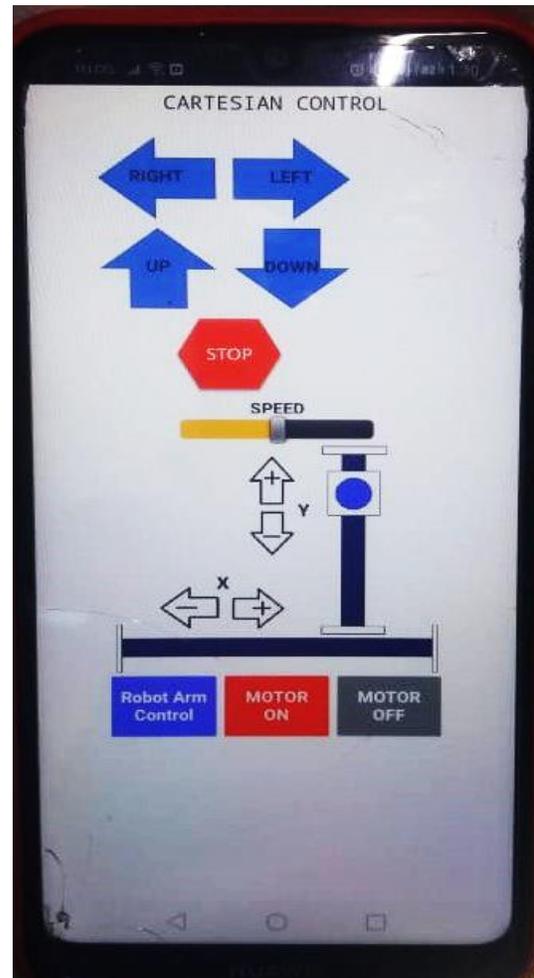
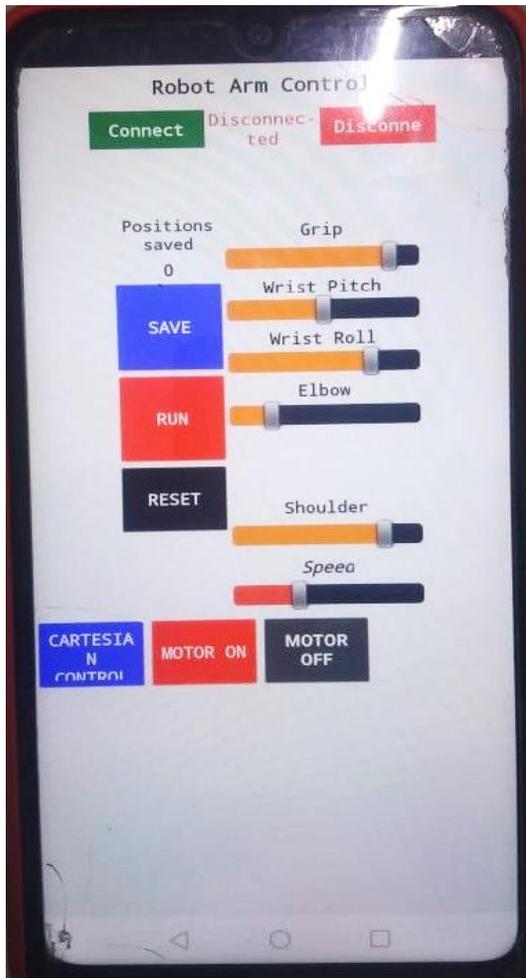


Figura 110. Interfaz visual desarrollada en MIT App Inventor de teléfono inteligente: Robot Arm (izq.) y robot cartesiano (der.).

V. CONCLUSIONES

Se logró diseñar y construir un robot cartesiano en los ejes x e y del tipo estándar con terminación en brazo robótico (Robot Arm) del tipo articulado con 5 grados de libertad empleando poco más de 400 piezas entre materiales de acero al carbón, electrónica modular compatible con hardware y software Arduino, comunicación serial y CNC robótica, además de fabricar unidades de soporte mediante impresión 3D con material de poliácido láctico.

El robot cartesiano y el Robot Arm fueron controlados y automatizados mediante códigos de programación de diseño propio empleando la plataforma electrónica de código abierto Arduino. Adicionalmente, se elaboró una interfaz gráfica propia del sistema en software LabVIEW para facilidad de operación de movimientos de los robots. Así mismo, se desarrolló una interfaz gráfica móvil mediante la aplicación MIT App Inventor para teléfonos inteligentes que permitieron controlar las operaciones de los robots desde una vía remota.

El sistema embebido se construyó con base a los diagramas electrónicos elaborados en softwares *Proteus* y *Fritzing* con lo que se aseguró contar con correctas respuestas de señales entre todos los elementos de programación y electrónica modular empleados.

Se realizaron pruebas preliminares de respuesta de los robots directamente con la manipulación del código Arduino a través de una PC, utilizando la interfaz LabVIEW y usando un teléfono inteligente con la interfaz elaborada en MIT App Inventor.

Las pruebas preliminares permitieron observar una correcta respuesta del sistema durante sus distintos desplazamientos en los ejes x , y e z . El *gripper* de agarre (sumergido en el baño de coagulación de prueba) podía seguir una trayectoria de desplazamiento a lo largo del baño y salir del mismo sin contratiempos.

Por lo que se puede sugerir que se logrará eliminar la manipulación manual de la conducción de un filamento polimérico de poliacrilonitrilo sumergido en un medio de coagulación de una solución acuosa de dimetilformamida sustituyendo el brazo humano por medio de un brazo robótico, específicamente la mano humana por un *gripper* de sujeción.

Como trabajo a futuro se contempla para otros proyectos – fuera del alcance del presente trabajo – optimizar el robot cartesiano y el brazo robótico a través de un diseño experimental robusto y realizando pruebas prácticas de extrusión de filamentos de poliacrilonitrilo y su conducción en un medio de coagulación existente.

El presente trabajo permite establecer las bases para generar productos académicos y de desarrollo tecnológico más significantes y de alto valor agregado para considerar la transferencia de tecnología. Además de que fomenta demás trabajo futuro para nuevos posibles temas de investigación y de Tesis.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Mejía-Azcarate, F. (2006). Programa de Textilización, sexta edición (enero 2015). Recuperado de <https://programadetextilizacion.blogspot.com/search/label/Autor%3A%20Francisco%20Mej%C3%ADa%20Azc%C3%A1rate%20-%20Introducci%C3%B3n>
- (2) Bonet-Aracil, M. A. (2013). Hilatura química de las fibras textiles. Universitat Politècnica de València. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vmZ7e4OAv4I>
- (3) Dena-Aguilar, J. A. (2011). Graft copolymerization of poly(acrylonitrile) and vinyl acetate on starch via free radical in solutions: synthesis and characterization. *Afinidad*, LXVIII, 553, 195-202.
- (4) Fuentes-Sevilla, F. M. (2013). *Estudio Y Aplicación De Las Regulaciones Textiles Utilizadas En El Termoseccionador Con Fibra Acrílica Húmeda, Brillante De 3.3 DTEX* (Tesis de Licenciatura). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- (5) BASF Chemical Company. (2004). Hoja de seguridad Dimetilformamida, versión 1.0. Recuperado de <http://www.regenciaquimica.ucr.ac.cr/sites/default/files/0013%20-%20nn-dimetilformamida.pdf>
- (6) Hermida, É. (2011). Polimeros: guía didáctica. Ed. Ministerio de Educación, Instituto Nacional de Educación Tecnológica, Argentina.
- (7) Cedron, J., Landa, V & J. Robles. (2011). Química General: Polimeros. Recuperado de <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/82-polimeros.html>
- (8) Tecnología de los plásticos. (2013). Polimerización. Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/07/polimerizacion.html>
- (9) Tecnología de los plásticos. (2011). Poliacrilonitrilo. Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliacrilonitrilo.html>
- (10) 2VS Químicos. (2016). Que es la Dimetilformamida y cuáles son sus usos generales. Recuperado de <http://www.2vsq.com/post/79/que-es-la-dimetilformamida-y-cuales-son-sus-usos-generales>
- (11) R.-Yadav, R., Dewang, Y. & J. Raghuvanshi. (2018). A study on metal extrusion process. *International Journal of LNCT*, 2(6), 124-130. Recuperado de base de datos ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/326210297_A_study_on_metal_extrusion_process
- (12) Kopeliovich, D. (2014). Extrusion of polymers. SubSTech: Substances & Technologies). Recuperado de https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=extrusion_of_polymers
- (13) Rahman-S., S. (2015). Melt Spinning, Dry spinning and Wet Spinning Method. Recuperado de <https://textilestudycenter.com/melt-spinning-dry-spinning-and-wet-spinning-method/>
- (14) Kroschwitz, J. I. (1986). Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. Second Edition, Vol. 6. John Wiley & Sons. New York. pp. 812-815. Recuperado de <https://www.pslc.ws/macrog/mpm/composit/fiber/process/wetspin.htm>

- (15) Snetkov, P., Morozkina, S., Uspenskaya, M. & R. Olekhovich. (2019). Hyaluronan-Based nonofibers: fabrication, characterization and application. *Polymers*, 11, 2036. 1-25.
- (16) Lanhua. (s.f.). Maquina de hilar textiles. Wuxi City Lanhua Textile Equipment: China. Recuperado de <http://m.spinmachinery.com/spinning-production-line/wet-spinning-production-line/textile-spinning-machine.html>
- (17) Galiano, F. (2016). Coagulation Medium. In: Drioli E., Giorno L. (eds) *Encyclopedia of Membranes*. Springer, Berlin, Heidelberg. Recuperado de https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-662-44324-8_1868#howtocite
- (18) Foroughi, J., Mirabedini, A. & H. B. F. Warren. (2018). Hydrogels Fibers. 10.5772/intechopen.74188. Recuperado de base de datos ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/326751351_Hydrogels_Fibers
- (19) Dena-Aguilar, J. A., Zacarías-Moreno, E., Acevedo-Martínez, J., García-Vargas, F. & J. G. Moreno-Paredes. (2018). *Diseño y construcción de un sistema de extrusión en frío de bajo volumen para la obtención de fibras poliméricas*. (reporte técnico). Tecnológico Nacional de México/I. T. Pabellón de Arteaga, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.
- (20) Collins, D. (2018). What is a Cartesian robot?. *Linearmotiontips*. Recuperado de <https://www.linearmotiontips.com/what-is-a-cartesian-robot/>
- (21) Quora. (s.f.). What is the difference between a machine and a robot?. Recuperado de <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-a-machine-and-a-robot>
- (22) Comíns-Tello, F. (2018). Lenguaje de programación de robots industriales, una perspectiva histórica: del control numérico a los frameworks robóticos. (Documento de trabajo). Versión 1.0 ed. Universitat Politècnica de València. Recuperado de <https://www.gestiopolis.com/wp-content/uploads/2019/01/lenguajes-programacion-robots-industriales.pdf>
- (23) APIEL. (s.f.). Robot. Recuperado de http://www.apiel.com/Espagnol/01-1_robot+cartesiano+robotica+industrial+scara+robot.htm.
- (24) Quora. (s.f.). What is a cartesian robot? What are its use?. Recuperado de <https://www.quora.com/What-is-a-Cartesian-robot-What-are-its-uses>
- (25) Robótica 4. (s.f.) 5. Robots industriales. Recuperado de <https://sites.google.com/site/4esoroboticalaunion/5-robots-industriales>
- (26) ESNECA. (2019). Que es el brazo robotico y en que industrias se emplea. Recuperado de <https://www.esneca.com/blog/brazo-robotico-industrias/>
- (27) Shields, B. (2020). Parts of a Robotic Arm. *itstillworks*. Recuperado de <https://itstillworks.com/parts-robotic-arm-5913826.html>.
- (28) Henao, I., Giraldo, J., Meza, F., Sánchez, C. & J. Ordoñez. (2017). El brazo robotico como herramienta pedagógica en el aula de clase. *Revista Lumen Gentium*, 1, 82. Recuperado de base de datos ResearchGate:

- https://www.researchgate.net/publication/317413734_El_brazo_robotico_como_herramienta_pedagogica_en_el_aula_de_clase
- (29) Robótica educativa RED. (2017). Movimientos angulares (robot articulado). Recuperado de <http://roboticared.blogspot.com/2017/07/movimientos-angulares-robot-articulado.html>
- (30) Amat-Verdú, O. (2017). Diseño de un manipulador controlado con el microcontrolador Arduino. (Tesis de Ingeniería). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- (31) EcuRed. (2012). IDE de programación. Recuperado de https://www.ecured.cu/IDE_de_Programaci%C3%B3n
- (32) Arduino. (2020). What is Arduino? Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- (33) National Instruments. (2020). ¿Qué es LabVIEW?. US: National Instruments. Recuperado de <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>
- (34) Hubor-Proteus. (2015). ¿Cómo es el trabajo de Proteus?. Recuperado de http://www.hubor-proteus.com/proteus-pcb/proteus-pcb/230-como_trabajar_con_proteus.html
- (35) MIT App Inventor. (2020). With MIT App Inventor, anyone can build apps with global impact. Recuperado de <https://appinventor.mit.edu/>
- (36) Fritzing. (2020). Fritzing. Recuperado de <https://fritzing.org/home/>
- (37) okdiario. (2020). ¿Cuáles son las articulaciones del cuerpo humano? Recuperado de <https://okdiario.com/curiosidades/cuales-son-articulaciones-del-cuerpo-humano-3189443>

ANEXO 1

Diseños acotados de piezas de Robot Arm y bases de componentes del robot cartesiano

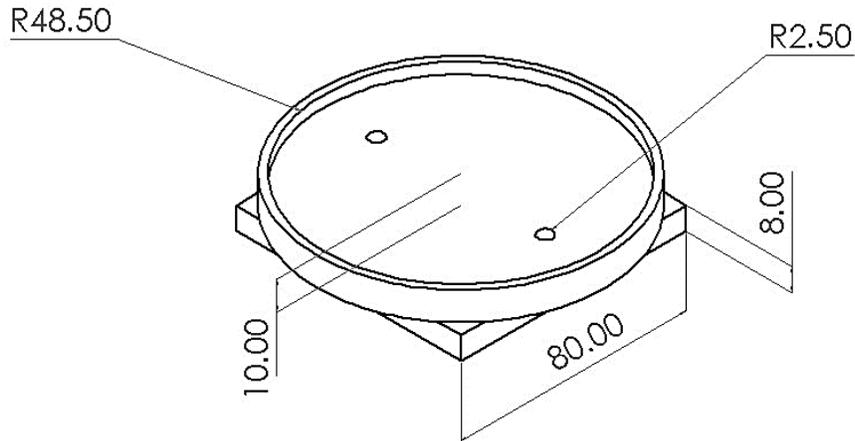


Figura 111. Robot Arm: base circular.

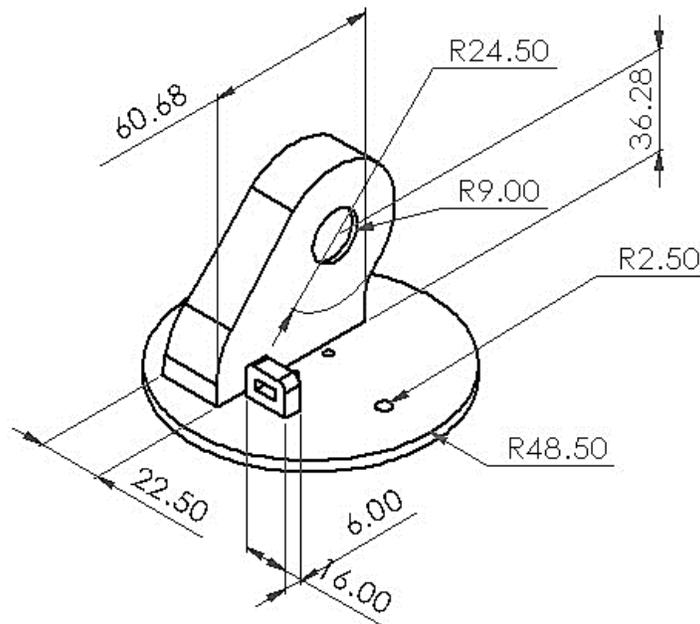


Figura 112. Robot Arm: ancla de sujeción (Waist).

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

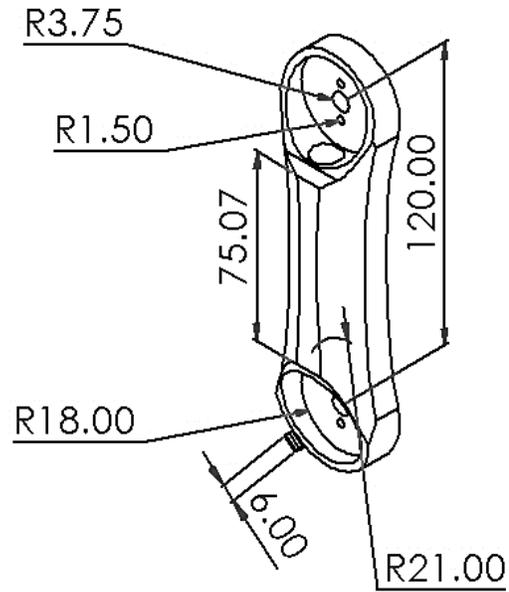


Figura 113. Robot Arm: Arm 01.

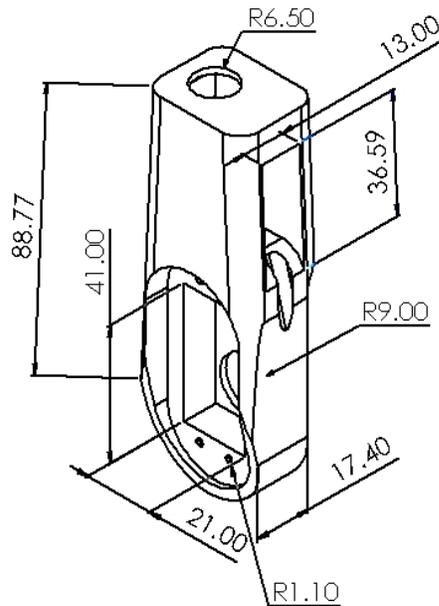


Figura 114. Robot Arm: Arm 02.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

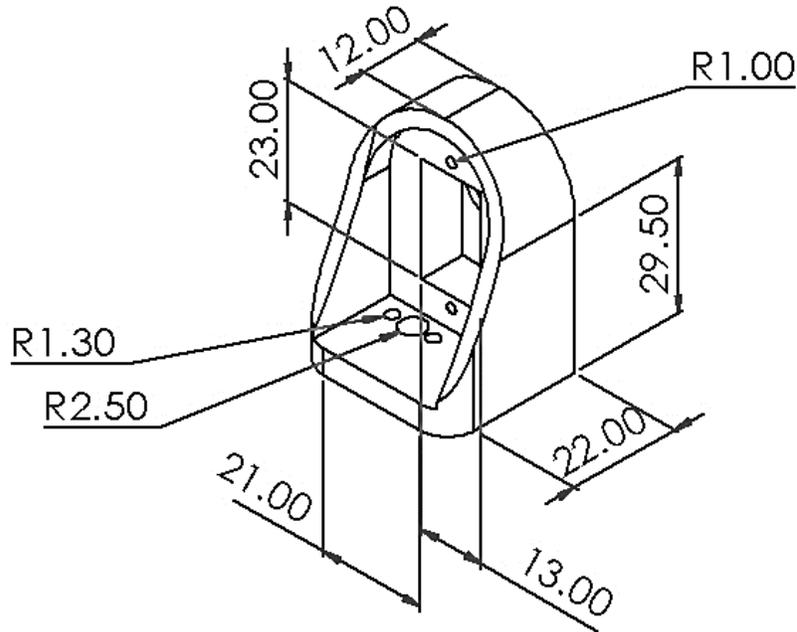


Figura 115. Robot Arm: Arm 03.

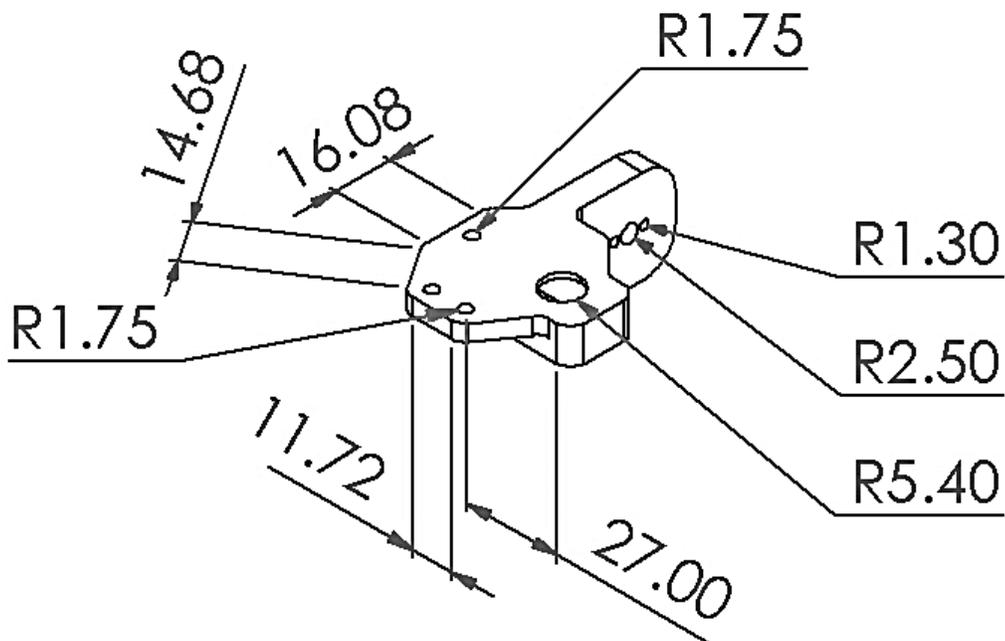


Figura 116. Robot Arm: Gripper donde van sujetas las partes de la pinza.

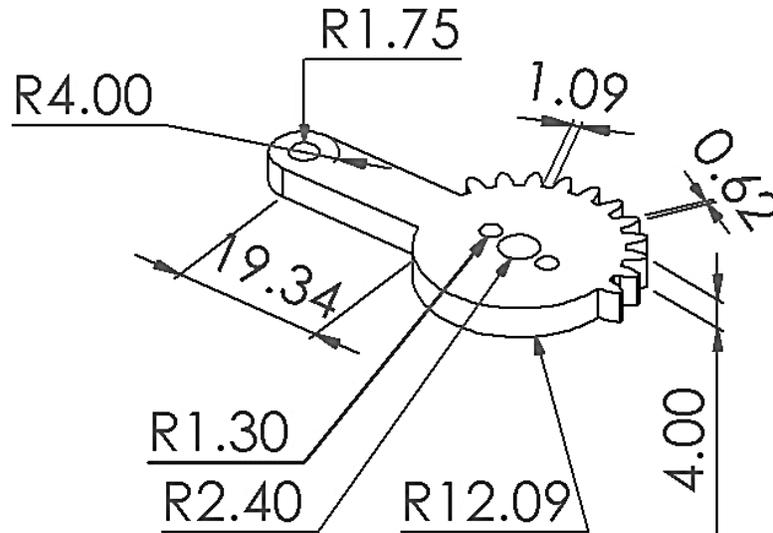


Figura 117. Robot Arm: primer eslabón de la pinza lado derecho, donde se sujeta el servomotor.

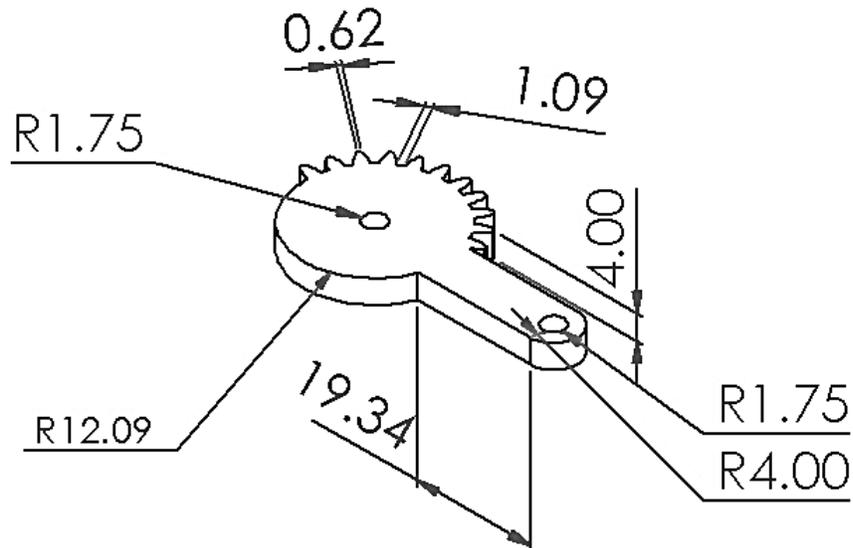


Figura 118. Robot Arm: primer eslabón de la pinza lado izquierdo.

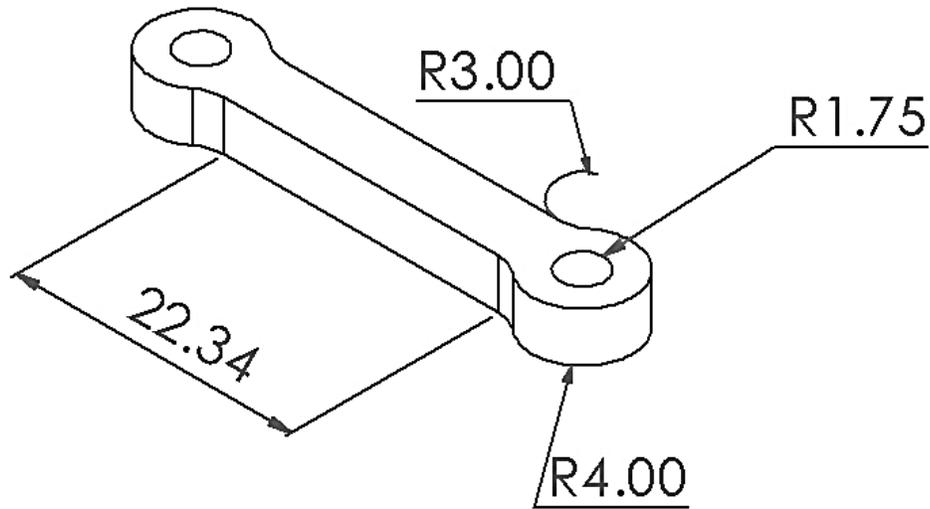


Figura 119. Robot Arm: conector del primer y segundo eslabón del gripper..

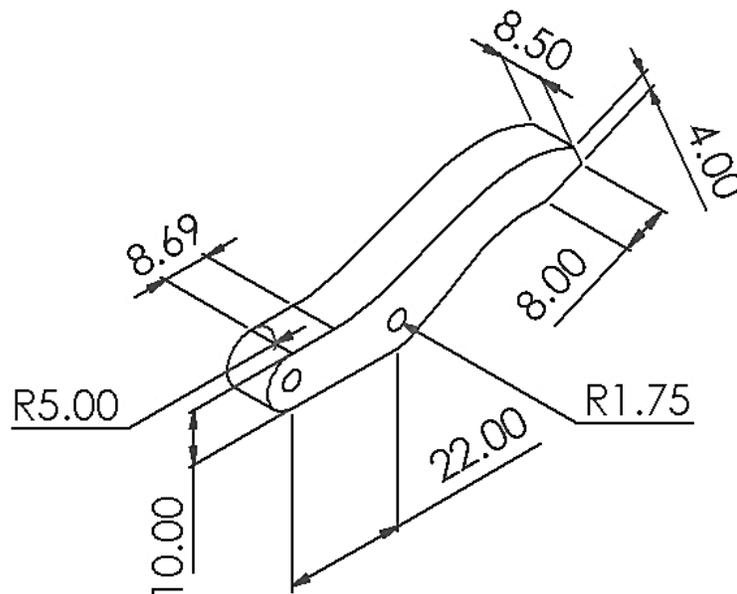


Figura 120. Robot Arm: segundo eslabón de la pinza del gripper.

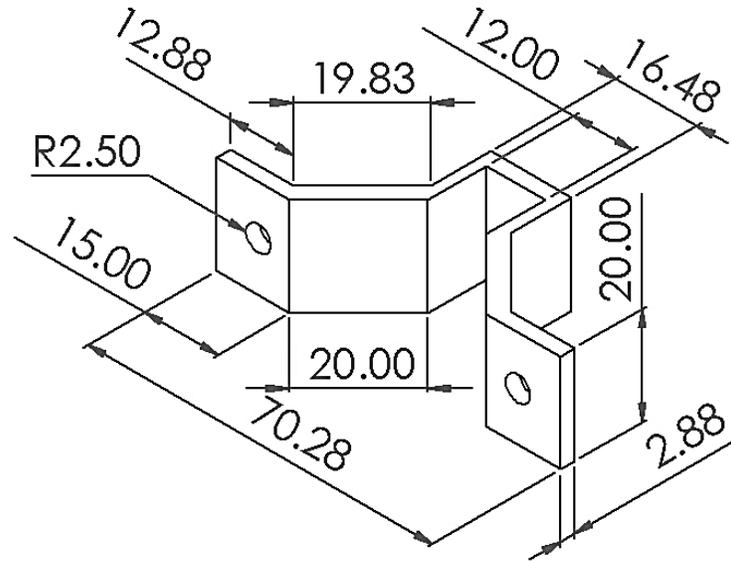


Figura 121. Robot cartesiano: base inferior para sujeción de limit switch.

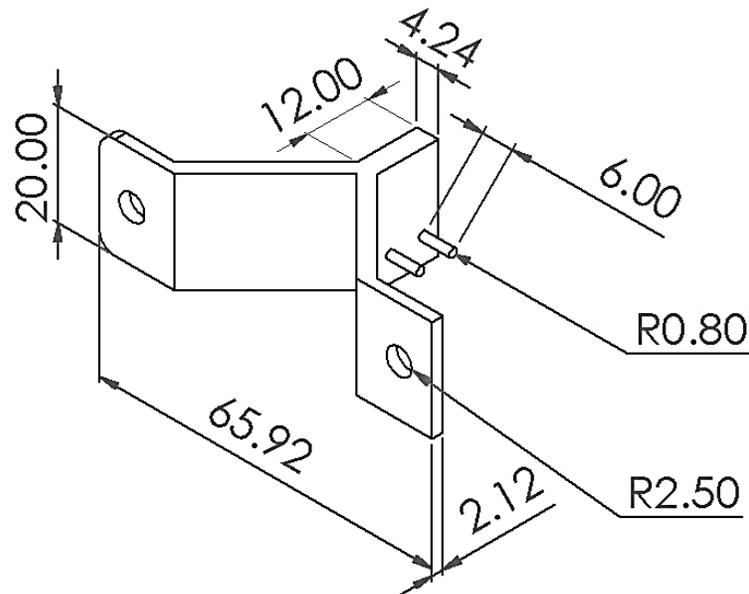


Figura 122. Robot cartesiano: base superior para sujeción de limit switch.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

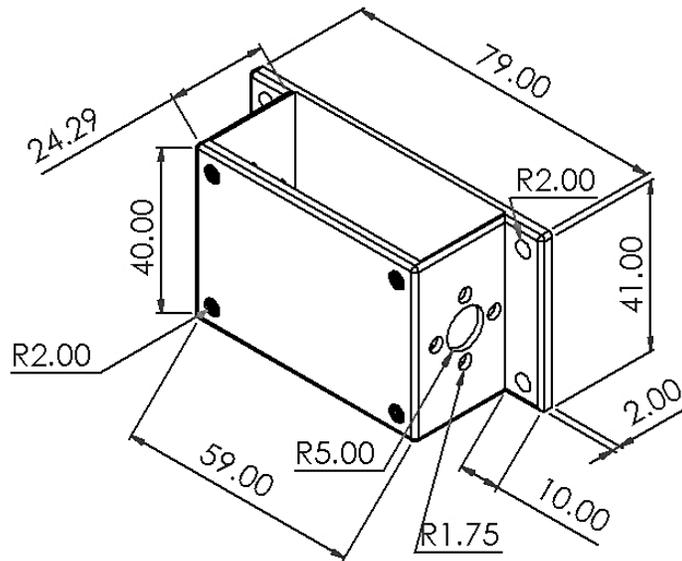


Figura 123. Robot cartesiano: base para sujeción de varilla roscada (husillo) de 8 mm.

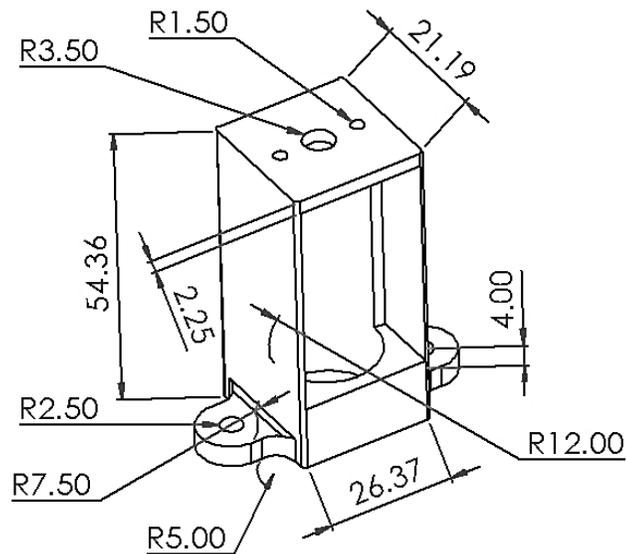


Figura 124. Robot cartesiano: base para sujeción de motor-reductor eje y.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

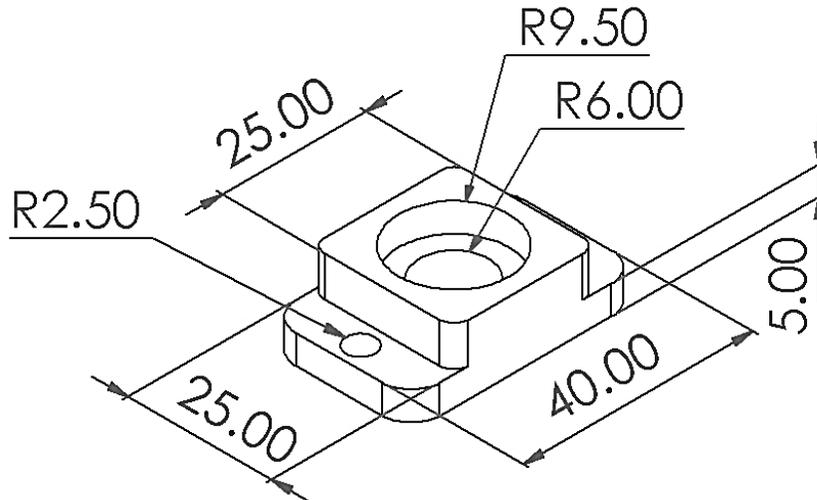


Figura 125. Base para rodamiento 626-RS.

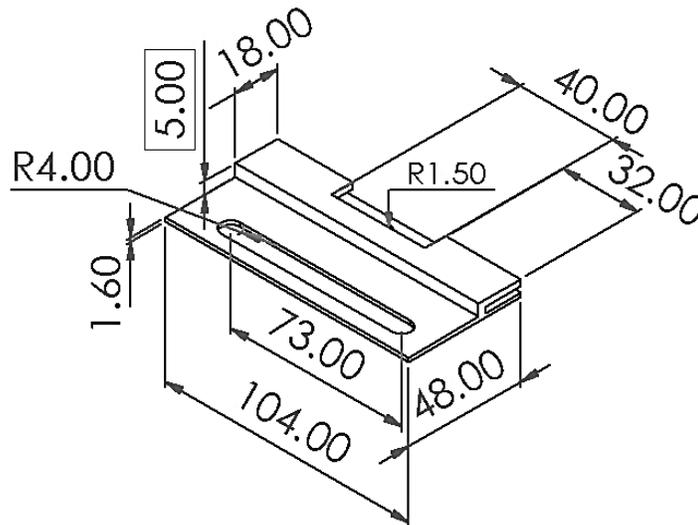


Figura 126. Robot cartesiano: base tipo prensa para sujeción de banda dentada..

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

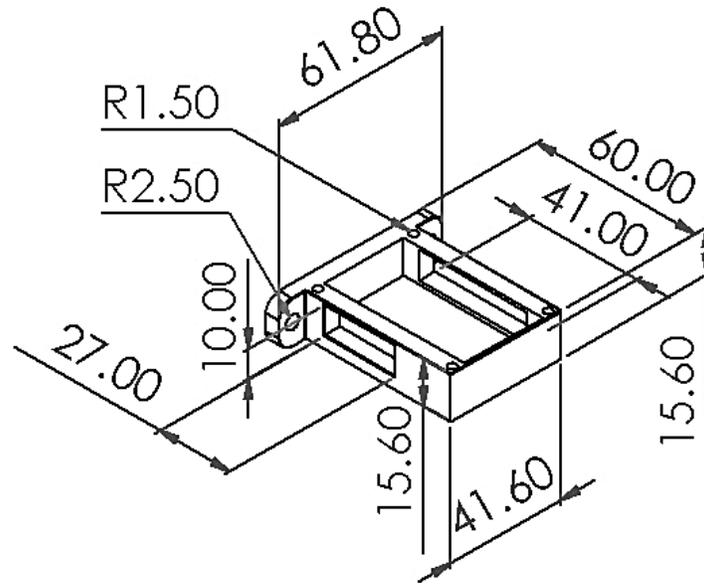


Figura 127. Robot cartesiano: base para sujeción de puertos serie 15 y 25 pines hembra.

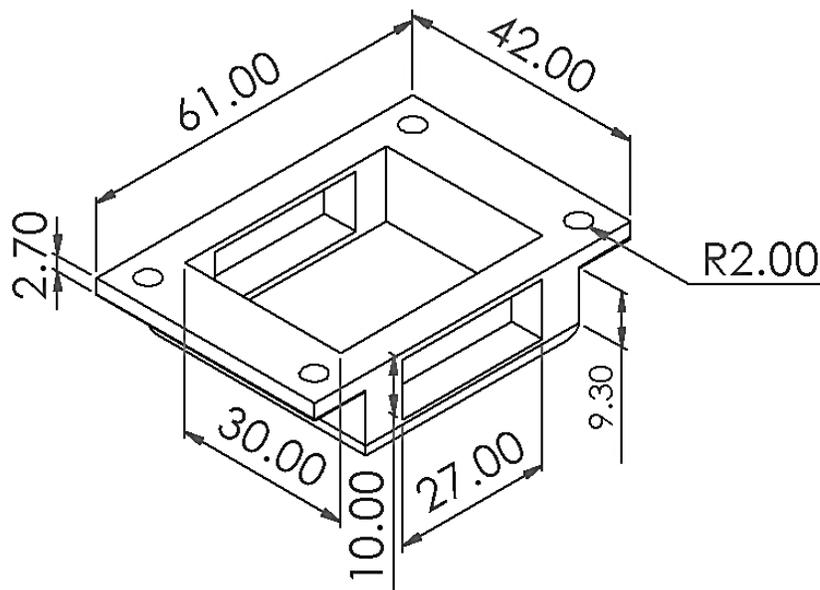


Figura 128. Robot cartesiano: base para sujeción de puertos serie 15 pines hembra.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

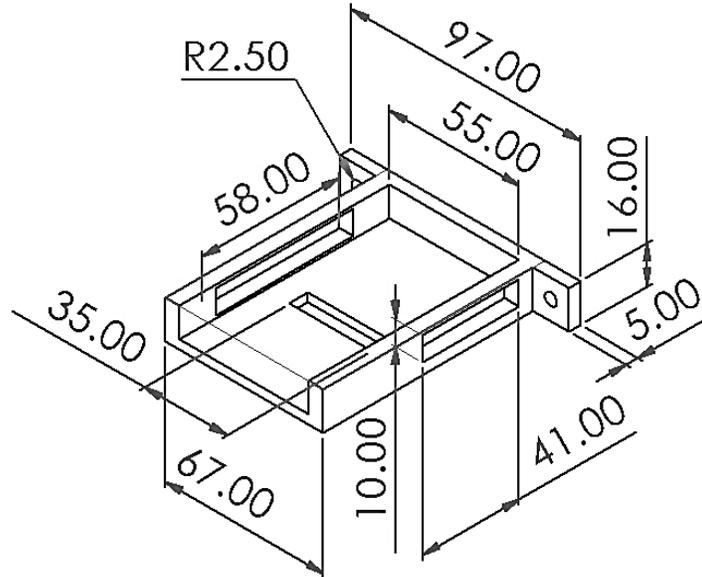


Figura 129. Robot cartesiano: base para sujeción de puertos serie 25 y 37 pines hembra.

ANEXO 2

Diseños con medidas de alcances entre el robot cartesiano y el Robot Arm

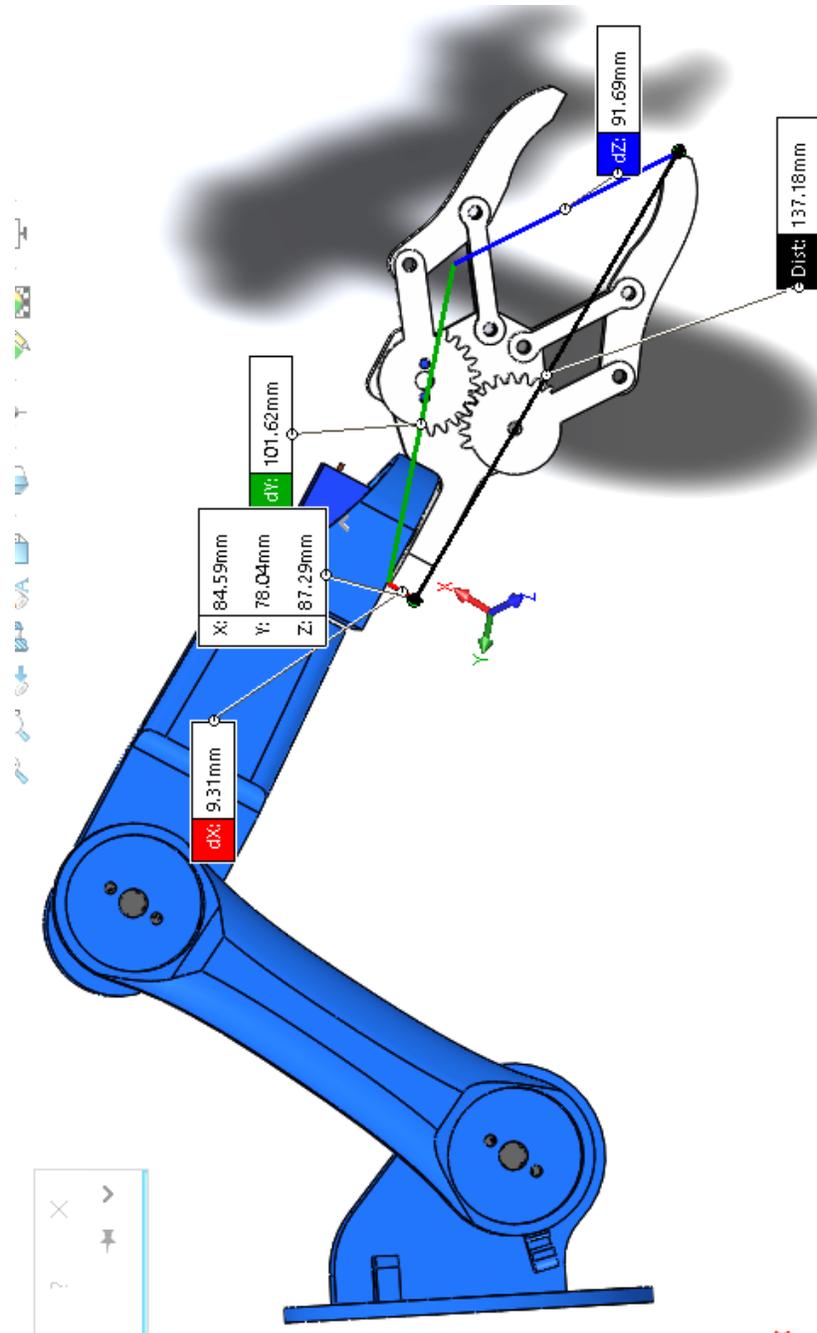


Figura 130. Robot Arm: vista lateral con medidas de gripper.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

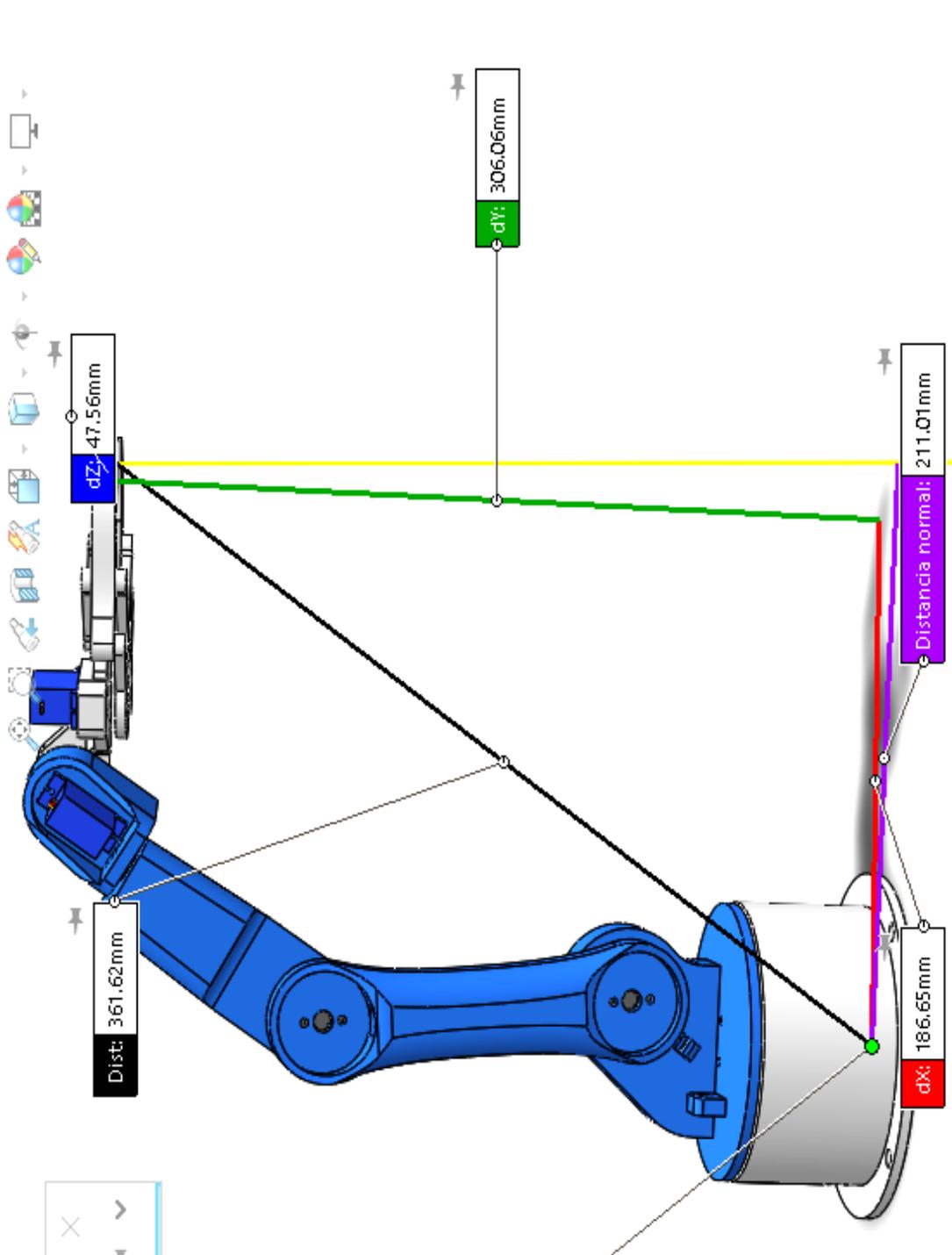


Figura 131. Robot Arm: medidas de alcance del Robot Arm desde su base hasta la punta del gripper.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

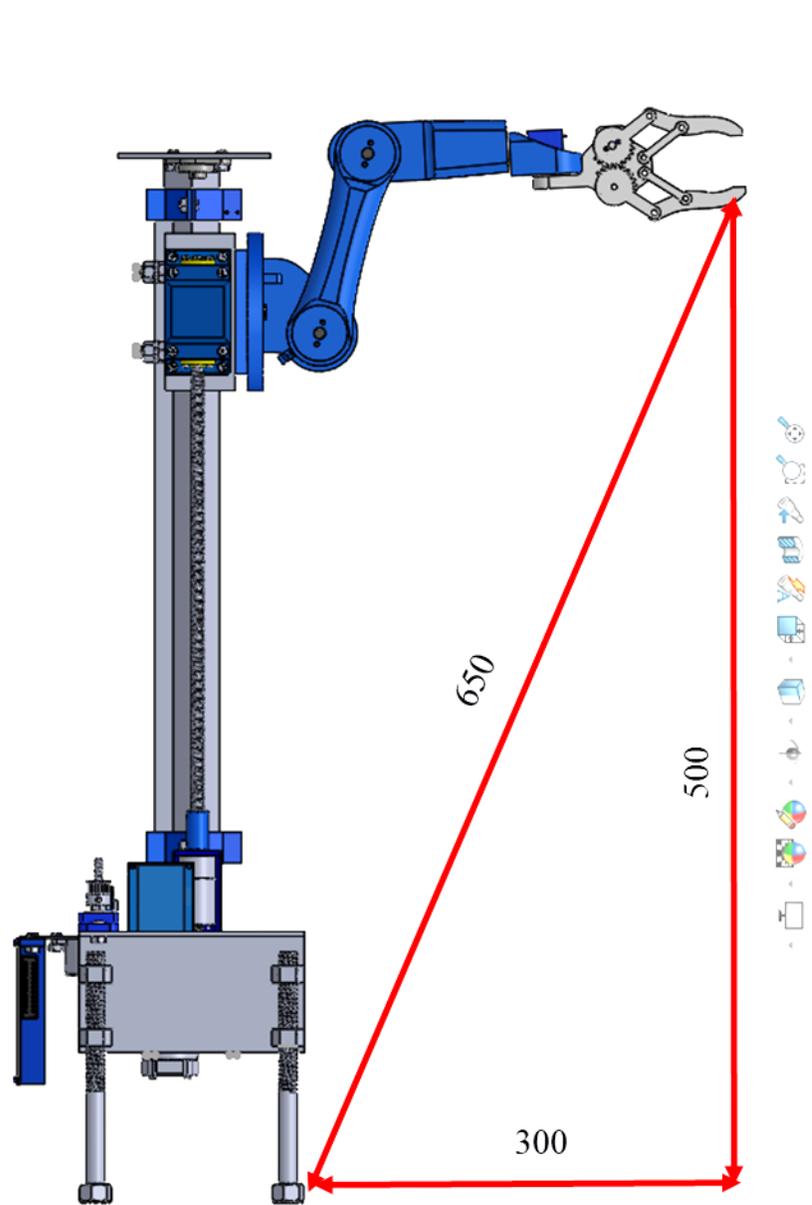


Figura 132. Vista lateral con medidas de alcance desde la base del robot cartesiano hasta el gripper.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Automatizado para un Sistema de Hilatura: Transporte de un Filamento Polimérico

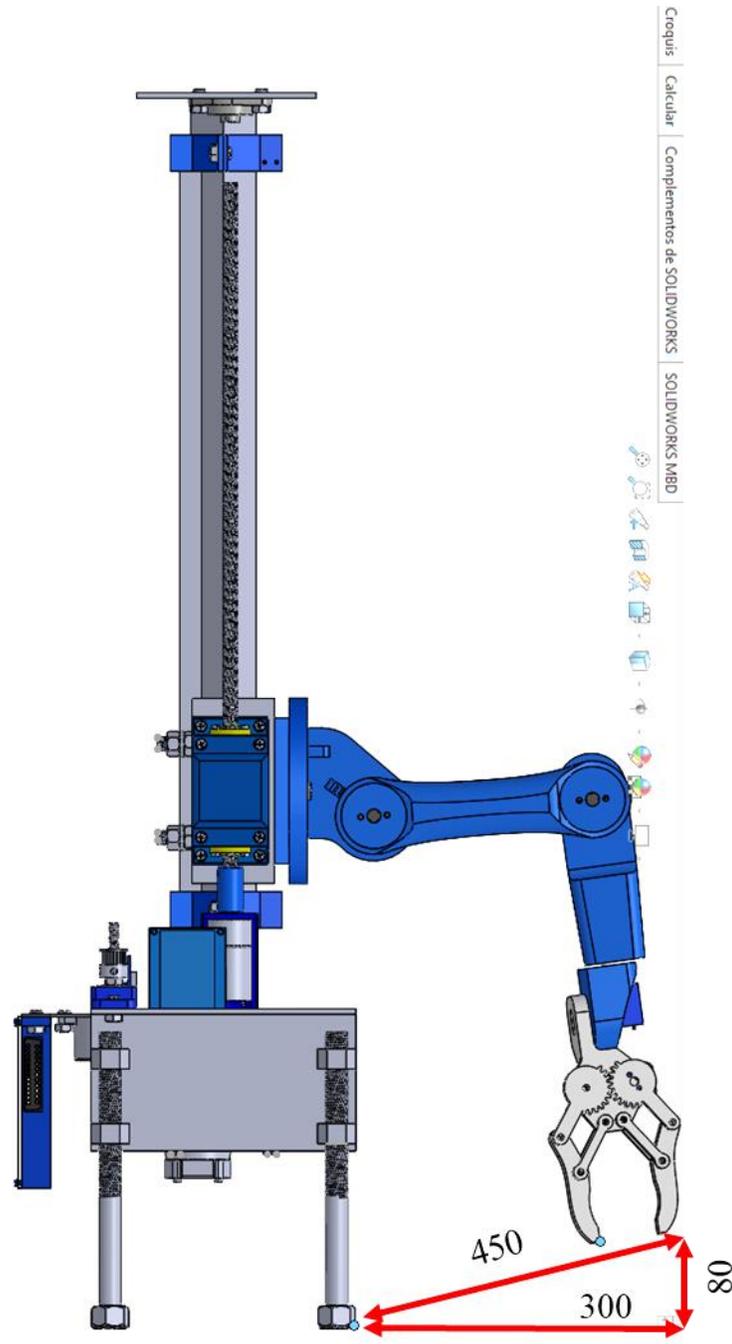


Figura 133. Vista lateral con medidas de alcance desde la base del robot cartesiano hasta el gripper en posición de sujeción.

ANEXO 3

Código Arduino del sistema embebido de control y automatización del robot cartesiano & Robot Arm

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>
Servo servo02;
Servo servo03;
Servo servo04;
Servo servo05;
Servo servo06;
SoftwareSerial Bluetooth(2, 3);
int servo1Pos, servo2Pos, servo3Pos, servo4Pos, servo5Pos, servo6Pos;
int servo1PPos, servo2PPos, servo3PPos, servo4PPos, servo5PPos, servo6PPos;
int servo01SP[50], servo02SP[50], servo03SP[50], servo04SP[50], servo05SP[50], servo06SP[50];
int speedDelay = 20;
int index = 0;
String dataIn = "";
int start1 = 13;
int start2 = 1 ;
int IN1 = 5;
int IN2 = 10;
int IN3 = 11;
int IN4 = 6;
void setup() {
servo02.attach(6);
servo03.attach(7);
servo04.attach(8);
servo05.attach(9);
servo06.attach(10);
Bluetooth.begin(38400);
Bluetooth.setTimeout(1);
delay(20);
servo2PPos = 150;
servo02.write(servo2PPos);
servo3PPos = 35;
servo03.write(servo3PPos);
servo4PPos = 140;
servo04.write(servo4PPos);
servo5PPos = 85;
servo05.write(servo5PPos);
servo6PPos = 80;
servo06.write(servo6PPos);
pinMode(start1, OUTPUT);
pinMode(start2, OUTPUT);
pinMode(IN1, OUTPUT);
pinMode(IN2, OUTPUT);
```

```
pinMode(IN3, OUTPUT);
pinMode(IN4, OUTPUT);
}
void loop() {
if (Bluetooth.available() > 0) {
dataIn = Bluetooth.readString();
if (dataIn.startsWith("s2")) {
String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
servo2Pos = dataInS.toInt();
if (servo2PPos > servo2Pos) {
for ( int j = servo2PPos; j >= servo2Pos; j--) {
servo02.write(j);
delay(50);
}
}
if (servo2PPos < servo2Pos) {
for ( int j = servo2PPos; j <= servo2Pos; j++) {
servo02.write(j);
delay(50);
}
}
servo2PPos = servo2Pos;
}
if (dataIn.startsWith("s3")) {
String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
servo3Pos = dataInS.toInt();
if (servo3PPos > servo3Pos) {
for ( int j = servo3PPos; j >= servo3Pos; j--) {
servo03.write(j);
delay(30);
}
}
if (servo3PPos < servo3Pos) {
for ( int j = servo3PPos; j <= servo3Pos; j++) {
servo03.write(j);
delay(30);
}
}
servo3PPos = servo3Pos;
}
if (dataIn.startsWith("s4")) {
String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
servo4Pos = dataInS.toInt();
if (servo4PPos > servo4Pos) {
for ( int j = servo4PPos; j >= servo4Pos; j--) {
servo04.write(j);
delay(30);
}
}
if (servo4PPos < servo4Pos) {
for ( int j = servo4PPos; j <= servo4Pos; j++) {
servo04.write(j);
}
```

```
delay(30);
}
}
servo4PPos = servo4Pos;
}
if (dataIn.startsWith("s5")) {
String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
servo5Pos = dataInS.toInt();
if (servo5PPos > servo5Pos) {
for ( int j = servo5PPos; j >= servo5Pos; j--) {
servo05.write(j);
delay(30);
}
}
if (servo5PPos < servo5Pos) {
for ( int j = servo5PPos; j <= servo5Pos; j++) {
servo05.write(j);
delay(30);
}
}
servo5PPos = servo5Pos;
}
if (dataIn.startsWith("s6")) {
String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
servo6Pos = dataInS.toInt();
if (servo6PPos > servo6Pos) {
for ( int j = servo6PPos; j >= servo6Pos; j--) {
servo06.write(j);
delay(30);
}
}
if (servo6PPos < servo6Pos) {
for ( int j = servo6PPos; j <= servo6Pos; j++) {
servo06.write(j);
delay(30);
}
}
servo6PPos = servo6Pos;
}
if (dataIn.startsWith("SAVE")) {
servo01SP[index] = servo1PPos;
servo02SP[index] = servo2PPos;
servo03SP[index] = servo3PPos;
servo04SP[index] = servo4PPos;
servo05SP[index] = servo5PPos;
servo06SP[index] = servo6PPos;
index++;
}
if (dataIn.startsWith("RUN")) {
runservo();
}
if ( dataIn == "RESET") {
```

```
memset(servo01SP, 0, sizeof(servo01SP));
memset(servo02SP, 0, sizeof(servo02SP));
memset(servo03SP, 0, sizeof(servo03SP));
memset(servo04SP, 0, sizeof(servo04SP));
memset(servo05SP, 0, sizeof(servo05SP));
memset(servo06SP, 0, sizeof(servo06SP));
index = 0;
}
if(dataIn == "a"){
analogWrite(IN1, 1);
analogWrite(IN2, 0);
}
if(dataIn == "b"){
analogWrite(IN1, 0);
analogWrite(IN2, 1);
}
if(dataIn == "c"){
analogWrite(IN1, 0);
analogWrite(IN2, 0);
analogWrite(IN3, 0);
analogWrite(IN4, 0);
}
if(dataIn == "d"){
analogWrite(IN3, 1);
analogWrite(IN4, 0);
}
if(dataIn == "e"){
analogWrite(IN3, 0);
analogWrite(IN4, 1);
}
if (dataIn == "MOTOR_ON") {
digitalWrite(13, HIGH);
}
if (dataIn == "MOTOR_OFF") {
digitalWrite(13, LOW);
}
}
}
void runservo() {
while (dataIn != "RESET") {
for (int i = 0; i <= index - 2; i++) {
if (Bluetooth.available() > 0) {
dataIn = Bluetooth.readString();
if ( dataIn == "PAUSE" ) {
while (dataIn != "RUN") {
if (Bluetooth.available() > 0) {
dataIn = Bluetooth.readString();
if ( dataIn == "RESET" ) {
break;
}
}
}
}
}
```

```
}
if (dataIn.startsWith("ss")) {
String dataInS = dataIn.substring(2, dataIn.length());
speedDelay = dataInS.toInt(); // Change servo speed (delay time)
}
}
if (servo02SP[i] == servo02SP[i + 1]) {
}
if (servo02SP[i] > servo02SP[i + 1]) {
for ( int j = servo02SP[i]; j >= servo02SP[i + 1]; j--) {
servo02.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo02SP[i] < servo02SP[i + 1]) {
for ( int j = servo02SP[i]; j <= servo02SP[i + 1]; j++) {
servo02.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo03SP[i] == servo03SP[i + 1]) {
}
if (servo03SP[i] > servo03SP[i + 1]) {
for ( int j = servo03SP[i]; j >= servo03SP[i + 1]; j--) {
servo03.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo03SP[i] < servo03SP[i + 1]) {
for ( int j = servo03SP[i]; j <= servo03SP[i + 1]; j++) {
servo03.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo04SP[i] == servo04SP[i + 1]) {
}
if (servo04SP[i] > servo04SP[i + 1]) {
for ( int j = servo04SP[i]; j >= servo04SP[i + 1]; j--) {
servo04.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo04SP[i] < servo04SP[i + 1]) {
for ( int j = servo04SP[i]; j <= servo04SP[i + 1]; j++) {
servo04.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo05SP[i] == servo05SP[i + 1]) {
}
if (servo05SP[i] > servo05SP[i + 1]) {
for ( int j = servo05SP[i]; j >= servo05SP[i + 1]; j--) {
```

```
servo05.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo05SP[i] < servo05SP[i + 1]) {
for ( int j = servo05SP[i]; j <= servo05SP[i + 1]; j++) {
servo05.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo06SP[i] == servo06SP[i + 1]) {
}
if (servo06SP[i] > servo06SP[i + 1]) {
for ( int j = servo06SP[i]; j >= servo06SP[i + 1]; j--) {
servo06.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
if (servo06SP[i] < servo06SP[i + 1]) {
for ( int j = servo06SP[i]; j <= servo06SP[i + 1]; j++) {
servo06.write(j);
delay(speedDelay);
}
}
}
}
}
}
```

ANEXO 4

Código MIT App Inventor de control y automatización del robot cartesiano & Robot Arm

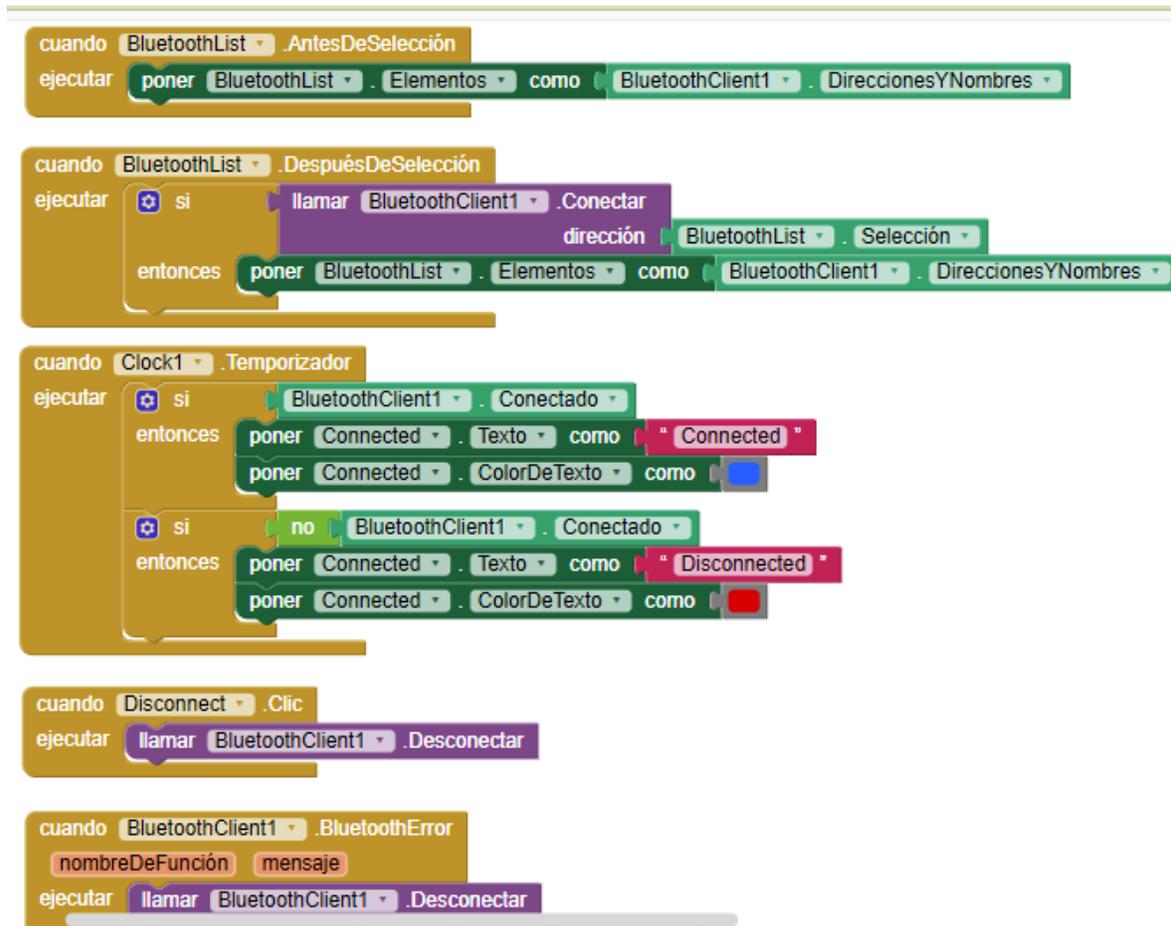


Figura 134. Sección del IDE MIT App Inventor para el modulo bluetooth.

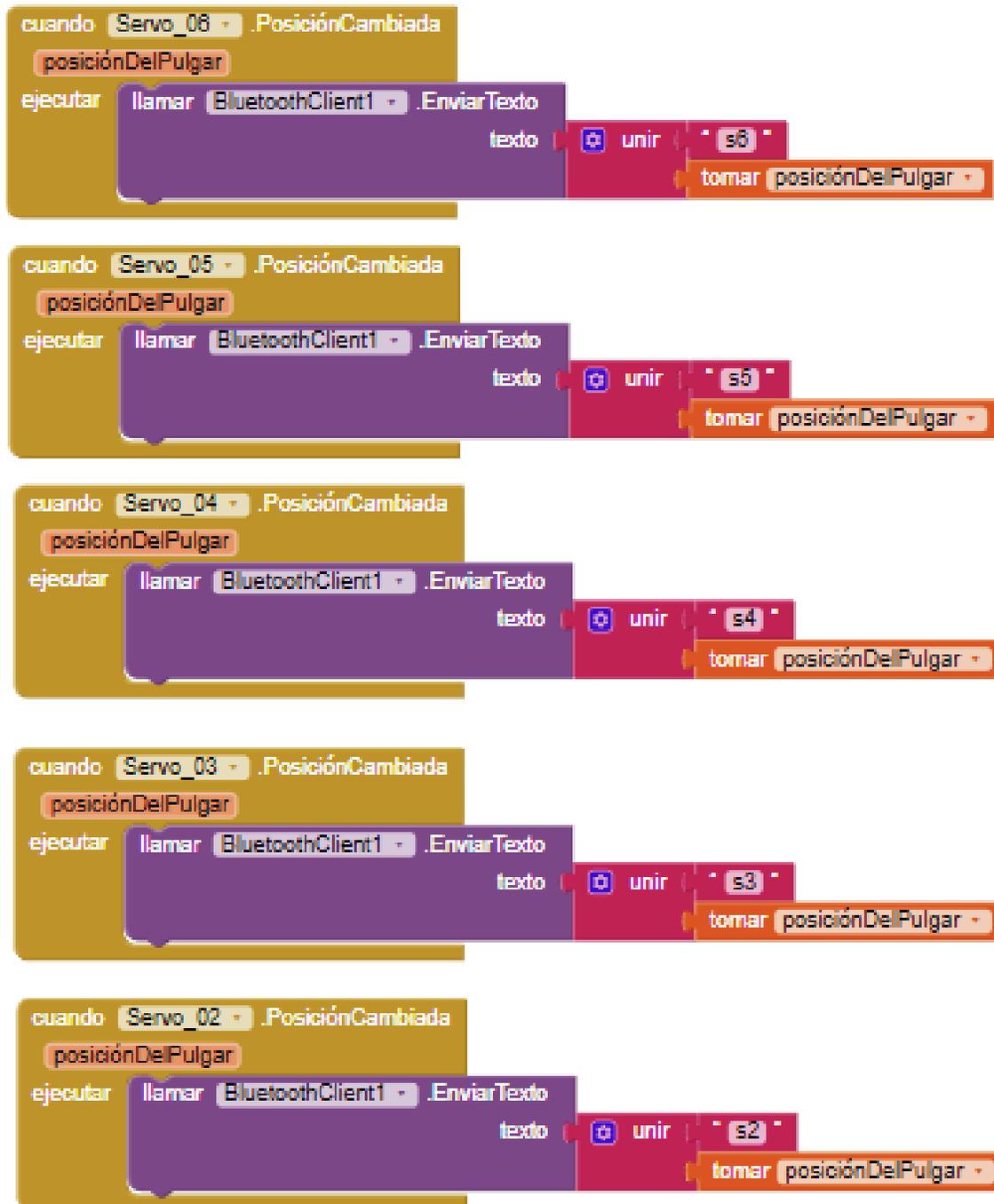


Figura 135. Sección del IDE MIT App Inventor para comunicación de los servomotores con modulo bluetooth.

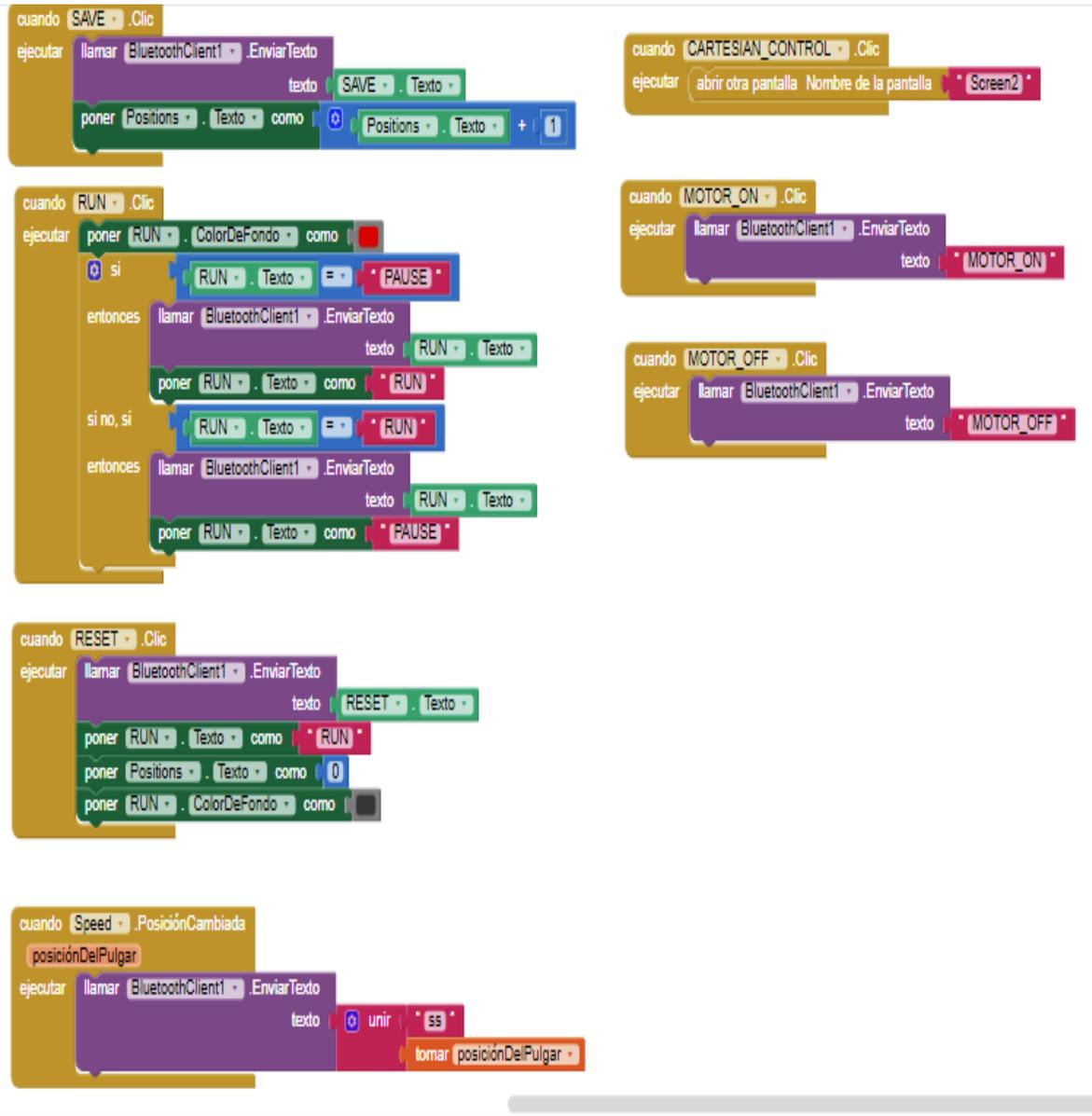


Figura 136. Sección del IDE MIT App Inventor para operación del robot cartesiano.

