



**Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot omnidireccional  
para impresión 3D**

Canseco Núñez, Jimmy Steven y Conrado Herrera, Cristian Medardo

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Escobar Carvajal, Luis Fernando

28 de julio de 2020

## Document Information

---

Analyzed document	ESCRITO TESIS URKUND.pdf (D76981803)
Submitted	7/24/2020 12:46:00 AM
Submitted by	
Submitter email	cmconrado@espe.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	lfescobar.espe@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

---

<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/793/1/T-UIDE-710.pdf">https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/793/1/T-UIDE-710.pdf</a> Fetched: 10/14/2019 9:21:15 PM	 2
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis - Juan Daniel Galarza Panimboza - 14-01-2019.pdf</b> Document Tesis - Juan Daniel Galarza Panimboza - 14-01-2019.pdf (D46762060) Submitted by: jdgalarza1@espe.edu.ec Receiver: lfescobar.espe@analysis.arkund.com	 19
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis_Allauca_Estevez.pdf</b> Document Tesis_Allauca_Estevez.pdf (D54360931) Submitted by: dcloza@espe.edu.ec Receiver: dcloza.espe@analysis.arkund.com	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/54810087-Ingenieria-mecatronica-proyectos-y-aplicaciones-jose...">https://docplayer.es/54810087-Ingenieria-mecatronica-proyectos-y-aplicaciones-jose ...</a> Fetched: 5/27/2020 2:28:36 AM	 1
<b>SA</b>	<b>DOC FINAL BELLIDO.pdf</b> Document DOC FINAL BELLIDO.pdf (D45778338)	 1
<b>SA</b>	<b>AbrahamPedro_MollinedoMerlo_2017.pdf</b> Document AbrahamPedro_MollinedoMerlo_2017.pdf (D32722056)	 1



Luis Escobar  
1002403200



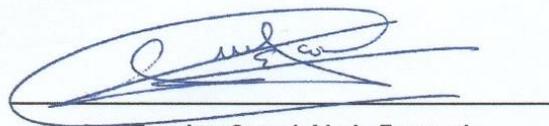
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D” fue realizado por los señores **Canseco Núñez Jimmy Steven** y **Conrado Herrera Cristian Medardo**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de julio de 2020



**Ing. Escobar Carvajal Luis Fernando**

C.C.: 100240320-0



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Canseco Núñez Jimmy Steven** con cédula de ciudadanía N° 172520298-8 y **Conrado Herrera Cristian Medardo** con cédula de ciudadanía N° 050314818-1, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 23 de julio de 2020

---

**Canseco Núñez  
Jimmy Steven**  
C.C.: 172520298-8

---

**Conrado Herrera  
Cristian Medardo**  
C.C.: 050314818-1



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Canseco Núñez Jimmy Steven** con cédula de ciudadanía N° 172520298-8 y **Conrado Herrera Cristian Medardo** con cédula de ciudadanía N° 050314818-1, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 23 de julio de 2020

---

**Canseco Núñez  
Jimmy Steven**  
C.C.: 172520298-8

---

**Conrado Herrera  
Cristian Medardo**  
C.C.: 050314818-1

## **Dedicatoria**

Principalmente a Dios, a la Virgen de la Elevación y a mi madre Zonnia que han sido mi gran soporte durante esta sacrificada etapa de mi vida; a mi amada esposa Ana Estefanía y mi adorado hijo Joaquín Emiliano quienes han sido mi motivación para seguir adelante día a día; a mi padre Jaime y mis hermanos Jonathan y Marjurie quienes son mi apoyo en cada momento.

Este trabajo también lo dedico a mis abuelitos Amada y Alfonso quienes me han llenado de amor desde que era un niño y han hecho las veces de padre cuando los he necesitado.

Jimmy Steven Canseco Núñez

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mis padres Medardo y Ana, que son un pilar fundamental en mi vida y que siempre estuvieron para apoyarme a lo largo de mi carrera universitaria; a mis hermanos Jefferson y Pablo, por ser una motivación de superación; y, a mi familia, que siempre me brindó su apoyo incondicional cuando lo necesité.

Cristian Medardo Conrado Herrera

## Agradecimiento

Agradezco a Dios y a la Virgen de la Elevación por haberme dado un ser tan maravilloso como lo es mi madre Zonnia, que gracias a ella soy el hombre que soy.

Gracias a mi madre Zonnia por la compañía en tantas desveladas de estudio, por cada desayuno servido, por cada palabra de ánimo y principalmente por los abrazos y bendiciones cada mañana antes de salir de casa.

A mi padre Jaime por ser la persona que me inspiró a seguir mi profesión y convertirme en ingeniero y por toda su ayuda en cada proyecto que sin él no los hubiese logrado.

A mi esposa Estefanía por todo el amor, apoyo y motivación en esta carrera universitaria y a mi hijo Joaquín Emiliano le agradezco por haber llegado a este mundo a hacerme infinitamente feliz.

Infinitas gracias a mis hermanos Jonathan y Marjurie por ser mis segundos padres, por la ayuda prestada y por ser mi soporte en los traspies de mi vida.

Gracias a cada uno de mis profesores, pero principalmente al Ing. Luis Escobar por su profesionalismo y acertada orientación académica; a mi amigo Cristian Conrado, gracias por su entrega en la realización de este proyecto de titulación y por su sincera y valiosa amistad.

Jimmy Steven Canseco Núñez

## **Agradecimiento**

A Dios, a la Virgen del Cisne y al Niño de Isinche, por permitirme conseguir un peldaño más en mi vida y ser mi protección estando lejos de casa.

A mis padres, por ser siempre mi guía y apoyo para poder sobrellevar las dificultades y poder cumplir este objetivo tan importante.

A mis hermanos, por sus palabras de aliento en todo momento y nunca dejarme desmayar ante los problemas presentados.

A mis amigos y compañeros de estudio, que hicieron de la universidad mi segundo hogar; en especial a Jimmy Canseco, por su sincera amistad y total entrega en cada trabajo realizado.

A mis docentes, por la dedicación en su labor de enseñanza; principalmente al Ing. Luis Escobar, por su orientación a lo largo de la realización de este trabajo.

A todos quienes colaboraron de alguna manera para poder cumplir este logro, muchas gracias.

Cristian Medardo Conrado Herrera

## Índice de Contenidos

Certificación.....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria .....	6
Dedicatoria .....	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de Contenidos.....	10
Índice de Tablas .....	13
Índice de Figuras .....	14
Resumen .....	16
Abstract .....	17
Capítulo I.....	18
Generalidades .....	18
Antecedentes.....	18
Trabajos Nacionales .....	18
Trabajos Internacionales .....	24
Justificación e Importancia.....	27
Alcance del Proyecto.....	27
Componentes Mecánicos.....	28
Componentes Electrónicos y Eléctricos .....	29
TIC.....	30
Objetivos .....	31
Objetivo General .....	31
Objetivos Específicos.....	32

Capítulo II .....	33
Investigación Inicial .....	33
Robótica Móvil .....	33
Robots Omnidireccionales .....	35
Dimensionamiento de Robots .....	36
Impresión 3D .....	37
Técnicas de Impresión de Manufactura Aditiva .....	38
Materiales no Convencionales para Impresión 3D .....	39
Post-procesadores para Impresión 3D .....	40
Capítulo III .....	42
Diseño Mecatrónico .....	42
Metodología .....	42
Subsistema Mecánico .....	45
Requerimientos .....	45
Diseño Mecánico .....	47
Implementación .....	72
Subsistema Electrónico y/o Eléctrico .....	78
Requerimientos .....	78
Diseño Electrónico y/o Eléctrico .....	80
Implementación .....	85
Subsistema TIC .....	86
Requerimientos .....	86
Diseño TIC .....	89
Capítulo IV .....	95
Pruebas y Resultados .....	95
Evaluación de Rendimiento del Robot .....	95
Pruebas de Exactitud de Posición .....	96

Pruebas de Repetibilidad de Posición .....	99
Resultados .....	100
Análisis Financiero.....	103
Capítulo V.....	105
Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro.....	105
Conclusiones .....	105
Recomendaciones.....	106
Trabajo Futuro .....	107
Bibliografía .....	108
Anexos .....	111
Planos Mecánicos .....	111

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Tipos de robots móviles por su medio de locomoción. ....	34
<b>Tabla 2</b> Identificación de necesidades del subsistema mecánico.....	45
<b>Tabla 3</b> Lista de métricas del subsistema mecánico. ....	46
<b>Tabla 4</b> Matriz de necesidades y métricas del subsistema mecánico.....	46
<b>Tabla 5</b> Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo robótico de configuración PRR. .....	51
<b>Tabla 6</b> Propiedades físicas y geométricas de los eslabones del brazo robótico. ..	62
<b>Tabla 7</b> Resultados de fuerza y torques máximos.....	65
<b>Tabla 8</b> Arquitectura modular del robot. ....	66
<b>Tabla 9</b> Evolución y mejoras del diseño mecánico.....	67
<b>Tabla 10</b> Diseño para manufactura. ....	69
<b>Tabla 11</b> Especificaciones técnicas impresora Tevo Tornado. ....	74
<b>Tabla 12</b> Parámetros de impresión 3D.....	74
<b>Tabla 13</b> Ensayos de compresión de probetas impresas en 3D.....	75
<b>Tabla 14</b> Tiempos de impresión a detalle.....	76
<b>Tabla 15</b> Identificación de necesidades del subsistema electrónico y/o eléctrico. ..	79
<b>Tabla 16</b> Lista de métricas del subsistema electrónico y/o eléctrico.....	79
<b>Tabla 17</b> Matriz de necesidades y métricas del subsistema electrónico y/o eléctrico. .....	80
<b>Tabla 18</b> Requerimientos de los motores del robot. ....	82
<b>Tabla 19</b> Motores utilizados en el prototipo.....	82
<b>Tabla 20</b> Lista de componentes electrónicos. ....	83
<b>Tabla 21</b> Identificación de necesidades del subsistema TICs. ....	87
<b>Tabla 22</b> Lista de métricas del subsistema TICs. ....	87
<b>Tabla 23</b> Matriz de necesidades y métricas del subsistema TICs. ....	88
<b>Tabla 24</b> Datos tomados de posición en la prueba de exactitud y repetibilidad (plano XY). ....	101
<b>Tabla 25</b> Datos tomados de posición en la prueba de exactitud y repetibilidad (eje Z). .....	102
<b>Tabla 26</b> Resultados de exactitud de posición sobre el plano XY. ....	102
<b>Tabla 27</b> Resultados de repetibilidad de posición sobre el plano XY. ....	103

<b>Tabla 28</b> Resultados de exactitud y repetibilidad del desplazamiento a lo largo del eje Z. ....	103
<b>Tabla 29</b> Análisis financiero. ....	103

### Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Sistema multirobot descentralizado para trabajo colaborativo. ....	19
<b>Figura 2</b> Prototipo de plataforma móvil omnidireccional. ....	20
<b>Figura 3</b> Sistema implementado para el cambio de cabezal en la impresora 3D. ....	22
<b>Figura 4</b> Máquina de control numérico aplicada al prototipado rápido. ....	23
<b>Figura 5</b> Impresora 3D por estereolitografía. ....	24
<b>Figura 6</b> Koala 3D. ....	25
<b>Figura 7</b> Impresión cooperativa en 3D. ....	26
<b>Figura 8</b> Prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D. ....	28
<b>Figura 9</b> Componentes mecánicos. ....	29
<b>Figura 10</b> Componentes electrónicos y eléctricos. ....	30
<b>Figura 11</b> TIC. ....	31
<b>Figura 12</b> Robots omnidireccionales de 3 y 4 llantas. ....	36
<b>Figura 13</b> Diagrama de flujo del proceso para el dimensionamiento del robot. ....	37
<b>Figura 14</b> Modelo en "V" para el diseño de sistemas mecatrónicos. ....	43
<b>Figura 15</b> Proceso genérico de diseño y desarrollo de productos. ....	44
<b>Figura 16</b> Componentes del subsistema mecánico. ....	48
<b>Figura 17</b> Diagrama de esqueleto del prototipo de robot omnidireccional. ....	50
<b>Figura 18</b> Esquema del brazo robótico para el análisis geométrico. ....	55
<b>Figura 19</b> Diagrama de flujo del proceso iterativo para el cálculo de fuerza y torques. ....	63
<b>Figura 20</b> Posiciones de las variables articulares para el cálculo de valores máximos. ....	63
<b>Figura 21</b> Fuerza aplicada en la variable articular $q_1$ . ....	64
<b>Figura 22</b> Torque aplicado en la variable articular $q_2$ . ....	64
<b>Figura 23</b> Torque aplicado en la variable articular $q_3$ . ....	65
<b>Figura 24</b> Dimensionamiento de actuadores para la plataforma omnidireccional. ...	71
<b>Figura 25</b> Base metálica de la plataforma omnidireccional. ....	72
<b>Figura 26</b> Rueda omnidireccional tipo mecanum. ....	73

<b>Figura 27</b>	Plataforma omnidireccional: primer subsistema del robot. ....	73
<b>Figura 28</b>	Probeta impresa en 3D. ....	75
<b>Figura 29</b>	Implementación del subsistema mecánico. ....	78
<b>Figura 30</b>	Componentes del subsistema electrónico y eléctrico. ....	81
<b>Figura 31</b>	Esquema de conexión electrónico y/o eléctrico simplificado. ....	85
<b>Figura 32</b>	Implementación del subsistema electrónico y eléctrico. ....	86
<b>Figura 33</b>	Componentes del subsistema TIC. ....	89
<b>Figura 34</b>	Comunicación Raspberry Pi-Computador. ....	90
<b>Figura 35</b>	Sistema de control del robot.....	90
<b>Figura 36</b>	Interfaz HMI: Pantalla principal. ....	91
<b>Figura 37</b>	Interfaz HMI: Pantalla secundaria-Modo Libre. ....	92
<b>Figura 38</b>	Interfaz HMI: Pantalla secundaria-MDI.....	93
<b>Figura 39</b>	Diagrama de nodos general del robot. ....	94
<b>Figura 40</b>	Plano de trabajo.....	96
<b>Figura 41</b>	Trayectoria de prueba. ....	97
<b>Figura 42</b>	Exactitud y repetibilidad de posición. ....	98

## Resumen

Un importante campo de aplicación dentro del área de la Mecatrónica comprende el desarrollo de nuevas alternativas de impresión 3D. La principal desventaja que presentan las impresoras comerciales es el área limitada de trabajo; lo cual, ha provocado que las piezas sean seccionadas y posteriormente unidas mediante pegamentos. Razón por la cual, existe la necesidad de desarrollar una solución que permita incrementar el área de impresión; por lo que, se ha considerado diseñar, construir e implementar un robot omnidireccional con el fin de producir prototipos de dimensiones mayores, sin la necesidad de imprimir piezas por sub partes. Para el desarrollo del proyecto, se planteó el uso de la metodología de diseño de sistemas mecatrónicos propuesta dentro de la norma VDI 2206. La construcción del prototipo se divide en dos sistemas principales: el primero consiste en una plataforma omnidireccional, misma que consta de un chasis y una estructura de acrílico que recubre los componentes motrices y electrónicos; mientras que, el segundo es un brazo robótico de configuración PRR (prismático-rotacional-rotacional) apto para incorporar un sistema de extrusión en su actuador final. El presente trabajo de titulación determina la cinemática y dinámica del brazo robótico, como punto de partida para la definición de un diseño mecánico óptimo. La programación del prototipo consiste en el post-procesamiento del código G, para adaptarlo a las capacidades motrices del robot omnidireccional; y, como resultado se obtiene un prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D con una mayor área de trabajo.

Palabras clave:

- **PLATAFORMA OMNIDIRECCIONAL**
- **BRAZO ROBÓTICO DE CONFIGURACIÓN PRR**
- **IMPRESIÓN 3D**

## **Abstract**

An important field of application within the Mechatronics area includes the development of new 3D printing alternatives. The main disadvantage presented by commercial printers is the limited working area, which has caused the pieces to be sectioned and subsequently joined by glues. Reason why, there is a need to develop a solution that allows to increase the printing area, so it has been considered to design, build and implement an omnidirectional robot in order to produce prototypes of larger dimensions without the need to print pieces by sub parts. For the development of the project, the use of the mechatronic systems design methodology within the VDI 2206 standard was considered. The construction of the prototype is divided into two main systems: the first is made up of an omnidirectional platform, which consists of a chassis and an acrylic structure that covers the driving and electronic components; while the second is a robotic arm of PRR configuration (prismatic-rotational-rotational) capable of incorporating an extrusion system in its final actuator. The present degree work determines the kinematics and dynamics of the robotic arm as a starting point for the definition of an optimal mechanical design. The prototype programming consists in the post-processing of the G code in order to adapt it to the motor capabilities of the omnidirectional robot and as a result, an omnidirectional robot prototype for 3D printing with a larger working area is obtained.

Keywords:

- **OMNIDIRECTIONAL PLATFORM**
- **ROBOTIC ARM OF PRR CONFIGURATION**
- **3D PRINTING**

## **Capítulo I**

### **Generalidades**

#### **Antecedentes**

Dentro de este capítulo presenta una revisión sobre trabajos tanto nacionales como internacionales relacionados con sistemas omnidireccionales e impresión 3D, haciendo un preámbulo sobre impresión colaborativa utilizando robots móviles. Además, se define la justificación, importancia, alcance y objetivos del presente proyecto.

En cuanto a la revisión realizada de los trabajos nacionales e internacionales, se toma en consideración temas de importancia que resultan útiles para el desarrollo del presente prototipo, como son los sistemas robóticos con plataformas omnidireccionales y sistemas de impresión 3D innovadores; que, contengan información sobre post-procesamiento y que se diferencien de los sistemas comunes por el interés de incrementar el área de trabajo.

#### ***Trabajos Nacionales***

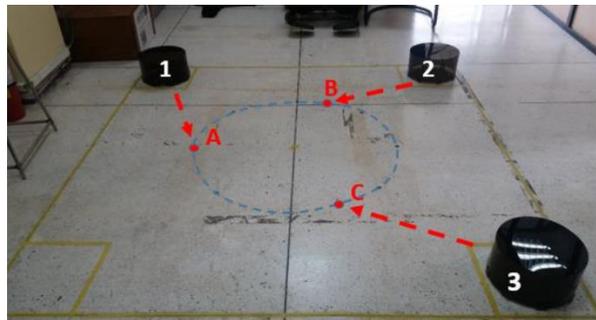
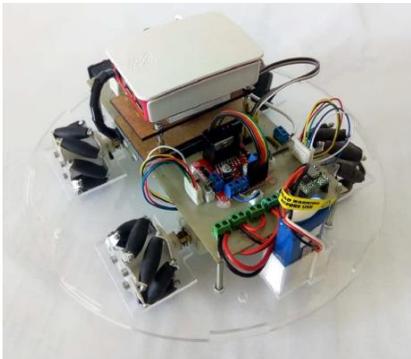
##### **Diseño e Implementación de un Sistema Multirobot Descentralizado para Realizar Trabajo Colaborativo con Aplicaciones Logísticas, Flexibles y Escalables.**

El trabajo contiene el procedimiento para diseñar e implementar un sistema mecatrónico, mismo que consiste en la construcción de un sistema multirobot en una red descentralizada. Como se observa en la Figura 1, el proyecto se compone de tres robots móviles omnidireccionales con las mismas características; y, la red tiene posibilidades de aumentar dispositivos que contengan direcciones IP. Se emplea un

protocolo MQTT para realizar la paquetería entre los elementos de la red, la que se estructuró gracias a la herramienta NodeRed en conjunto de librerías ROS, instaladas en el sistema operativo Lubuntu en una Raspberry Pi 3 modelo B+. Además, se programó un algoritmo de red colaborativa en donde los robots móviles leen información del número de robots existentes en la red; con esta información, se mueven al punto más cercano de una serie de puntos inscritos en un círculo de trabajo. Al unir estos puntos, se observa una figura geométrica del número de lado igual a la cantidad de robots móviles conectados. La red tiene la posibilidad de recuperar la información, rediseñando los puntos en donde se van a posicionar los robots dependiendo si se desconectan o se añaden otros dispositivos (Aguirre & Moyano, 2019).

### Figura 1

*Sistema multirobot descentralizado para trabajo colaborativo.*



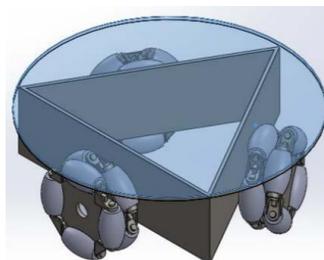
*Nota.* Tomado de “Diseño e implementación de un sistema multirobot descentralizado para realizar trabajo colaborativo con aplicaciones logísticas, flexibles y escalables”, por B. Aguirre & C. Moyano, 2019, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

## **Diseño y Fabricación de un Prototipo de Plataforma Móvil Omnidireccional para la Empresa SIMYM – Servicios Industriales Mecánicos y Mecatrónicos.**

El desarrollo del proyecto se basa en el diseño y construcción de un prototipo de plataforma omnidireccional; cuyo objetivo, es transportar una carga máxima de 500 [kgf], en una superficie industrial plana con ayuda de sus tres grados de libertad, a una velocidad lineal máxima de 0.8 [m/s]. El diseño mecatrónico aplicado identifica mejoras al diseño propuesto por la empresa auspiciante; logrando así, fabricar un vehículo de carga de bajo costo con materiales convencionales. A partir de lo señalado, se analiza la cinemática del robot y se desarrolla un sistema de control de movimiento. Mediante la aplicación del diseño mecatrónico, se diseña y construye la estructura de la plataforma como se muestra en la Figura 2; se acopla un sistema de reducción de velocidad, para aumentar la aportación de torque a las ruedas; adicionalmente, se implementa un algoritmo de control; y, se utiliza un dispositivo de mando para comandar dicho control (Bernal & Yépez, 2014).

### **Figura 2**

Prototipo de plataforma móvil omnidireccional.



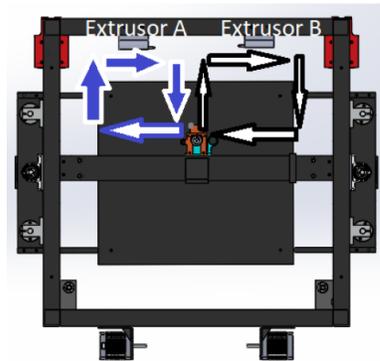
*Nota.* Tomado de “Diseño y fabricación de un prototipo de plataforma móvil omnidireccional para la empresa SIMYM”, por D. Bernal & J. Yépez, 2014, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

### **Implementación de un Sistema Multicabezal a una Impresora 3D.**

El trabajo consiste en la implementación de un sistema multicabezal a una impresora 3D como se observa en la Figura 3; el cual, permite un intercambio automático de cabezales empleando acoples magnéticos, el mecanismo presenta la efectividad necesaria ya que permite optimizar el uso del espacio en el eje X. El control del sistema intercambiador de cabezales se lleva a cabo a través de un script, que acondiciona las líneas de código en un archivo G-code para un correcto posicionamiento de los extrusores. El objetivo del proyecto radica en mejorar y facilitar el proceso de manufactura; a través, de los beneficios que se describen a continuación, en contraste con otros métodos tradicionales: alta velocidad de impresión, combinación de componentes en un mismo sistema, reducción del control de operación y robustez en el proceso en general. Con la implementación del sistema multicabezal de impresión, se pretende mejorar el prototipado 3D de las piezas que se desean construir; estableciendo, mejores características y propiedades a las piezas a ser impresas, a un bajo costo, minimizando la cantidad de recursos y ahorrando el tiempo empleado (Ruiz, 2017).

**Figura 3**

*Sistema implementado para el cambio de cabezal en la impresora 3D.*



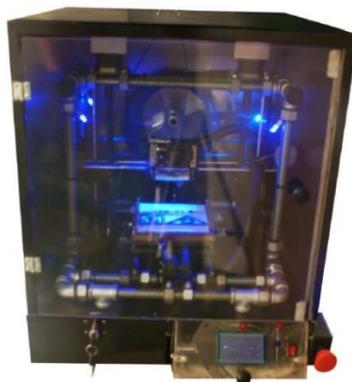
*Nota.* Tomado de “Implementación de un sistema multicabezal a una impresora 3D”, por G. Ruiz, 2017, Universidad Técnica del Norte.

**Diseño, Construcción y Programación de una Máquina de Control Numérico Aplicada al Prototipado Rápido de Modelado por Deposición Fundida de Material para el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Internacional del Ecuador.**

El objetivo del proyecto radica en el diseño y construcción de una máquina de prototipado rápido, de modelado por deposición fundida; mediante, la integración y control de sistemas mecatrónicos para la elaboración de prototipos plásticos a pequeña escala. La Figura 4 muestra los cinco subsistemas que componen el proyecto, tales como: estructura y carcasa, mecanismos de accionamiento y control, extrusora, interfaces de comunicación y tecnologías de soporte. La metodología empleada para el análisis de todo el concepto establece condiciones de trabajo óptimas para unificar componentes mecánicos, electrónicos y de software (Maldonado, 2012).

**Figura 4**

*Máquina de control numérico aplicada al prototipado rápido.*



*Nota.* Tomado de “*Diseño, construcción y programación de una máquina de control numérico aplicada al prototipado rápido de modelado por deposición fundida de material*”, por G. Maldonado, 2012, Universidad Internacional del Ecuador.

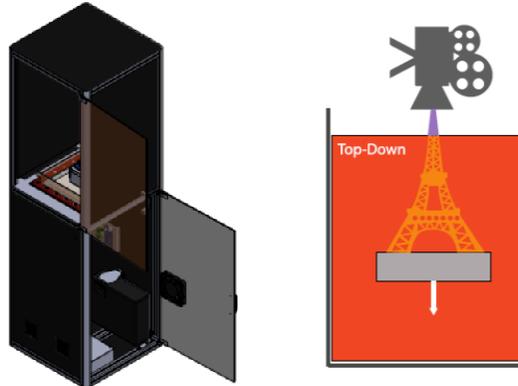
**Impresora 3D por Estereolitografía para el Laboratorio de Simulación y Centro de Mecanizado CNC de la Universidad Técnica del Norte.**

La finalidad del proyecto radica en diseñar y construir una impresora 3D por estereolitografía, para la creación de objetos tridimensionales de mayor calidad, en comparación con los objetos impresos con la técnica de deposición de material fundido; y, con una dureza mayor que los objetos impresos con la tecnología de polvo cerámico. La impresora 3D permite la impresión de objetos utilizando un proyector DLP; el cual, mediante la proyección de una imagen monocromática envía rayos UV para solidificar la fotoreolina de una manera programada. El software que se implementa para el proceso de impresión involucra la generación del código y la separación de la imagen por capas; y en cuanto al programa utilizado, éste corresponde al Nano DLP. El área de impresión es de 200x200 [mm], con una altura máxima de 400 [mm]; como se observa en la

Figura 5, lo que permite imprimir objetos relativamente grandes con respecto a otras impresoras 3D (Heredia, 2018).

### Figura 5

*Impresora 3D por estereolitografía.*



*Nota.* Tomado de “*Impresora 3D por estereolitografía*”, por P. Heredia, 2018, Universidad Técnica del Norte.

### ***Trabajos Internacionales***

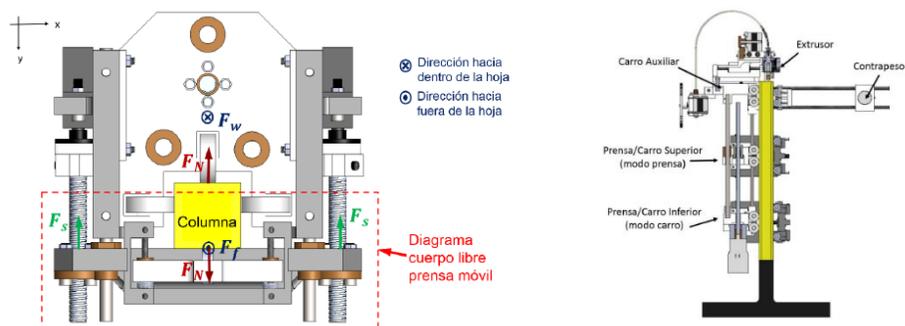
#### **Koala 3D: Impresora 3D Capaz de Fabricar Objetos de Altura Mayor que su Propia Altura.**

Hoy en día, las herramientas de fabricación están limitadas a producir objetos cuyas dimensiones no sobrepasen los límites de su volumen de manufactura. Con respecto a las impresoras 3D, la relación entre el volumen de manufactura y el tamaño de la máquina se aproxima a la unidad, debido a su principio de funcionamiento. Lipson (2012) comenta que es posible incrementar esta relación al infinito si es que la impresora se acopla a un mecanismo que se mueva libremente por el espacio. En este

trabajo, se describe el proceso de desarrollo y caracterización de Koala 3D, una impresora 3D móvil que es capaz de fabricar objetos de mayor tamaño que su propia altura; esto lo hace, ya que continuamente modifica la posición de su volumen de manufactura al trepar la pieza (estructura) que imprime en paralelo. Como se muestra en la Figura 6, el desarrollo de Koala 3D se lleva a cabo separando el prototipo en dos subsistemas: una impresora 3D y un robot trepador. Para el diseño del primer subsistema, se toma como referencia modelos que funcionan mediante el método de modelado por deposición fundida; y, se innova en el mecanismo que posiciona el material sobre el área de manufactura. El segundo subsistema se diseña procurando que se mueva con precisión a lo largo de la estructura impresa y que tenga la capacidad de soportar largas sesiones de manufactura (Vélez, 2017).

### Figura 6

*Koala 3D.*



*Nota.* Tomado de “KOALA 3D: Impresora 3D capaz de fabricar objetos de altura mayor que su propia altura.”, por M. Vélez, 2017, Universidad de Chile.

### **A Mobile 3D Printer for Cooperative 3D Printing.**

La impresión cooperativa en 3D es una tecnología emergente que tiene como objetivo proporcionar escalabilidad a la impresión 3D al permitir que miles de robots móviles, con cabezales de impresión, cooperen en un solo trabajo de impresión e integren componentes prefabricados durante este proceso. En el núcleo de la plataforma de impresión 3D cooperativa se encuentra un robot móvil que puede llevar diferentes cabezales de impresión o elementos de sujeción. En este trabajo, se presenta una impresora 3D móvil con un cabezal de impresión de extrusión de filamentos que se puede controlar a través de Internet. Primero, se diseña una impresora 3D móvil compacta con un cabezal de impresión de extrusión y cuatro ruedas omnidireccionales. Como se observa en la Figura 7, también se desarrolla una interfaz de comunicación inalámbrica para enviar comandos y recibir información de la impresora móvil. Gracias a este proyecto se han demostrado impresiones exitosas con dos impresoras 3D móviles que imprimen cooperativamente, lo que demuestra la promesa de la impresión cooperativa 3D (Marques, Williams & Zhou, 2017).

#### **Figura 7**

*Impresión cooperativa en 3D.*



*Nota.* Tomado de “A mobile 3D printer for Cooperative 3D Printing”, por L. Marques, R. Williams & W. Zhou, 2017, Solid Freeform Fabrication Symposium.

## **Justificación e Importancia**

En la actualidad la tecnología de impresión 3D en el país, se ha basado principalmente en el uso de máquinas pequeñas con una limitada área de trabajo, la principal aplicación en ingeniería de esta tecnología es el desarrollo de prototipos; pero, los limitantes del área de impresión han provocado que ciertas piezas sean impresas en sub-partes y unidas mediante pegamentos, alterando de este modo su diseño y sus propiedades.

El trabajo a realizarse permite un desarrollo y un nuevo enfoque en la tecnología de impresión 3D mediante la ampliación del área de trabajo en el plano horizontal, con la finalidad de producir prototipos de dimensiones mayores sin la necesidad de imprimir piezas por sub-partes (Marques, Williams, & Zhou, 2017).

La importancia del proyecto radica en que puede ser un punto de partida para un cambio de enfoque de la aplicación de la impresión 3D, como en el área de construcción de viviendas, biomedicina, resistencia de materiales; y, además la apertura de un campo de estudio y desarrollo para trabajos futuros. Considerando que hoy en día existen materiales no convencionales para impresión 3D, se pueden generar grandes ventajas dentro del ámbito de la manufactura aditiva.

## **Alcance del Proyecto**

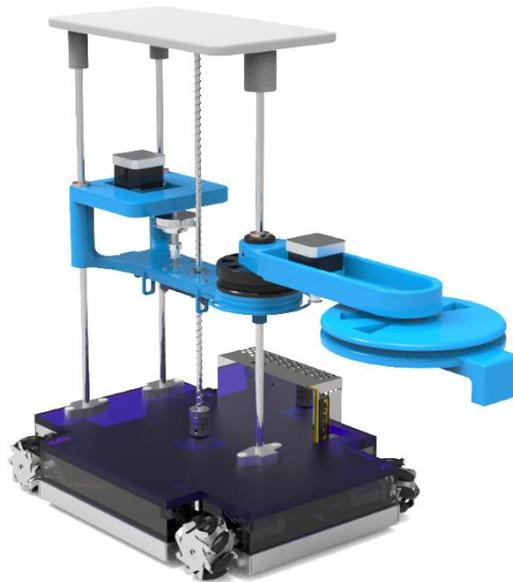
La unión de los dos sistemas mencionados anteriormente, tanto la plataforma omnidireccional como el brazo robótico, permitirá al concepto general obtener un mayor espacio de trabajo, con un área de desplazamiento en el plano horizontal de aproximadamente 600x200 [mm]. Las pruebas de funcionamiento del proyecto se

fundamentarán en pruebas de exactitud y repetibilidad de posición con respecto al brazo robótico.

El diseño del prototipo se muestra en la Figura 8, donde se pueden evidenciar los dos sistemas principales que componen el concepto general; como son, la plataforma omnidireccional y el brazo robótico de configuración PRR.

### **Figura 8**

*Prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D.*



A continuación, se detallan los componentes mecánicos, electrónicos y las TIC a emplearse.

### ***Componentes Mecánicos***

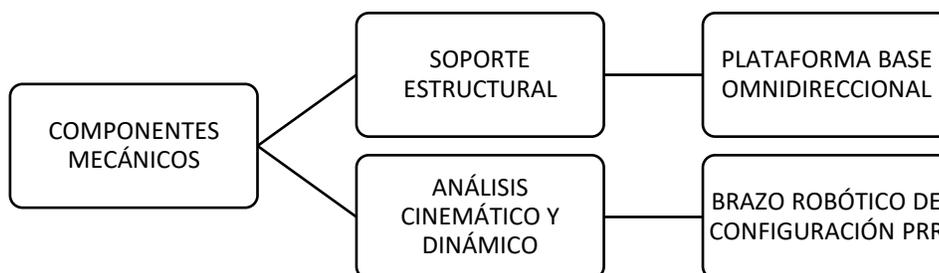
Se plantea la ejecución del diseño mecánico de cada uno de los componentes del prototipo mediante el uso de un software de diseño, que serán utilizados como fundamento para realizar el modelamiento matemático tanto de la plataforma de

locomoción como del manipulador robótico; para así, obtener los parámetros geométricos, cinemáticos y dinámicos. Los resultados obtenidos en el modelamiento serán utilizados para el dimensionamiento adecuado de los actuadores en función de los requerimientos planteados. A continuación, se resumen las etapas que componen el desarrollo del subsistema mecánico:

- Plataforma base: sistema de soporte del brazo robótico y de alojamiento de los componentes electrónicos.
- Ruedas omnidireccionales: sistema de locomoción de la plataforma.
- Brazo robótico: análisis cinemático y dinámico.

### Figura 9

*Componentes mecánicos.*



### ***Componentes Electrónicos y Eléctricos***

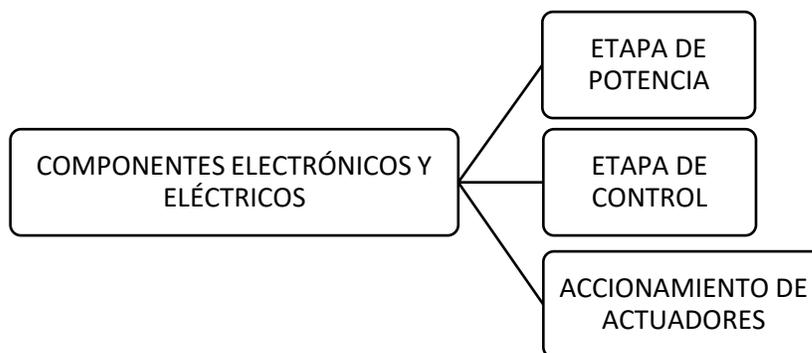
Se requiere garantizar la alimentación para los elementos de potencia y control a partir de los parámetros de corriente y voltaje requeridos. Los componentes electrónicos para el control de los actuadores se implementarán tomando en cuenta los requisitos de procesamiento y características específicas de cada actuador. Se realizarán los

acondicionamientos necesarios para garantizar la compatibilidad entre la tarjeta de procesamiento y los actuadores seleccionados. A continuación, se resumen las etapas que componen el desarrollo del subsistema electrónico y eléctrico:

- Etapa de potencia: fuente de alimentación y reductor de voltaje.
- Etapa de control: sistemas embebidos y módulos de control (drivers).
- Accionamiento de actuadores: empleados como elementos motrices tanto para la plataforma como para el brazo robótico.

### Figura 10

*Componentes electrónicos y eléctricos.*



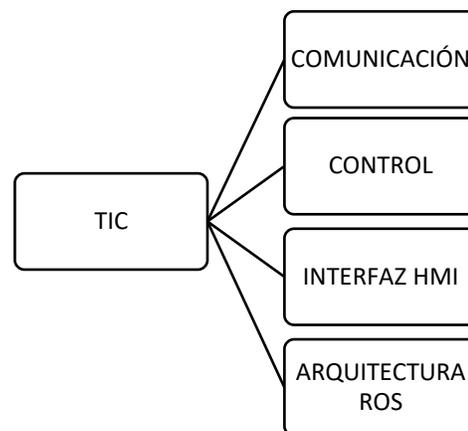
### TIC

Se plantea seleccionar la plataforma y periféricos óptimos para el desarrollo del proyecto, considerando las arquitecturas de trabajo, medios de comunicación y relación con el usuario. A continuación, se resumen las etapas que componen el desarrollo del subsistema TIC:

- Comunicación
- Control
- Interfaz HMI
- Arquitectura ROS

**Figura 11**

*TIC.*



## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Diseñar, construir e implementar un prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D.

***Objetivos Específicos***

- Diseñar y construir una plataforma omnidireccional.
- Calcular la cinemática y dinámica de un brazo robótico de configuración PRR acoplada a una plataforma omnidireccional.
- Construir un brazo robótico de configuración PRR de tres grados de libertad.
- Implementar un trabajo sincronizado entre el brazo robótico y la plataforma base.

## **Capítulo II**

### **Investigación Inicial**

El capítulo contiene las bases científicas y tecnológicas con las cuales se desarrolló el proyecto. Se exponen los conceptos referentes a robótica móvil, robots omnidireccionales, dimensionamiento de robots e impresión 3D, en donde se define a detalle las técnicas de impresión de manufactura aditiva, materiales no convencionales utilizados en el campo de la impresión 3D y las concepciones sobre el código G, indispensable para la programación del robot, considerando la fundamentación de los post-procesadores existentes.

#### **Robótica Móvil**

Según Lazea & Lupu (2001) en su trabajo “Aspects on path planning for mobile robots”, la robótica móvil es una de las ramas más importantes dentro del campo de la robótica y comprende una nueva generación de tecnología avanzada, que puede usarse en un amplio rango de sectores para automatizar su transporte interno. Es necesario recalcar, que esta parte de la robótica abarca todo tipo de robot definido como un vehículo de propulsión autónoma con movimiento reprogramable por medio de un control automático con el fin de realizar una tarea específica.

El desarrollo de robots móviles responde a la necesidad de ampliar el campo de aplicación de la robótica, limitado inicialmente al alcance de una estructura mecánica anclada en uno de sus extremos. Se trata también de incrementar la autonomía, minimizando en lo posible la intervención humana. En estos sistemas se incluyen tareas de planificación, percepción y control (Ollero, 2001).

Los elementos motrices de este tipo de robots pueden tratarse de articulaciones, ruedas o sistemas de locomoción especiales, esto depende de varios aspectos importantes a considerar, como el tipo de movimiento que se pretenda realizar, el tipo de terreno en el cual se va a trasladar y la rapidez de movimiento. Cabe recalcar, que el análisis matemático del robot dependerá del tipo de elemento motriz a emplear; y, por consecuencia el método de control será diferente para cada caso (Bruno & Oussama, 2007). En la Tabla 1 se detallan los diferentes tipos de robots móviles según su medio de locomoción, siendo esta su característica principal.

**Tabla 1**

*Tipos de robots móviles por su medio de locomoción.*

<b>Tipo</b>	<b>Sistema</b>	<b>Definición</b>
<b>Terrestres</b>	Deslizante	Simulan el movimiento de serpientes o gusanos
	Rodantes	Su desplazamiento es mediante ruedas
	Caminantes	Tienen patas que permiten su movimiento, pueden ser bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc.
	Rulantes	Se desplaza mediante orugas o cadenas
<b>Aéreos</b>	Ala rotativa	Su impulso es gracias a la rotación de alas, el ejemplo más popular son los drones
	Ala fija	Su vuelo es producto del aire que se encuentra debajo de sus alas
<b>Acuáticos</b>	Flotante	Se impulsa mediante turbinas o simulando el movimiento de serpientes
	Submarino	Se impulsa mediante propulsores o simulando las aletas de animales acuáticos.

*Nota.* Adaptada de “Diseño e implementación de una arquitectura IoT para robótica colaborativa”, por D. González & A. Verdugo, 2018, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Como se puede evidenciar en la información mencionada, existen varios elementos que permiten el traslado de un punto a otro.

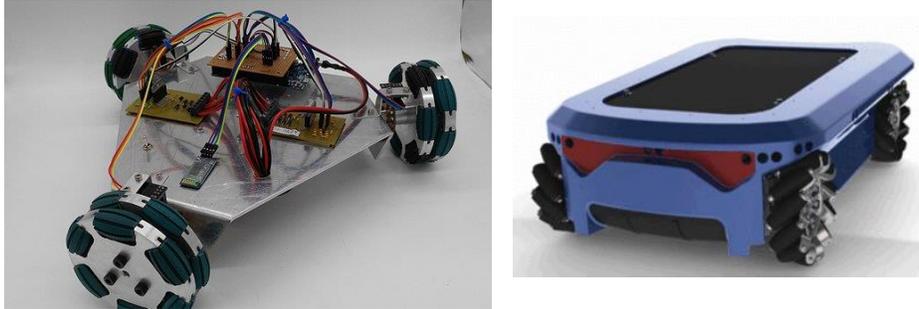
### **Robots Omnidireccionales**

Un robot omnidireccional es un tipo de robot móvil rodante, cuya configuración le permite desplazarse en cualquier dirección sin la necesidad de alcanzar previamente una orientación específica. Es decir, es capaz de realizar movimientos en cualquiera de las componentes del plano, bien sean traslaciones (hacia adelante, en reversa, laterales) o rotaciones, a partir de un estado de movilidad. Todo ello, a expensas de un mayor grado de complejidad en su manejo (Martinez, 2009).

Para un robot omnidireccional es importante contar con al menos tres ruedas activas, por lo que un punto indispensable del diseño es la decisión de cuántas ruedas emplear. Cada una de las ruedas proporciona al robot una fuerza normal al eje del motor y paralela a la superficie sobre la cual se desplaza; la suma de ellas, permite la traslación y rotación de la estructura. Por lo general, presentan una configuración mecánica de tres o cuatro ruedas; como se observa en la Figura 12, el primer móvil es mecánicamente más simple que el segundo; no obstante, este último permite una mayor aceleración al robot. Los robots de cuatro ruedas tienen más tracción que los de tres, pues se adiciona la potencia entregada por el motor adicional. Lo cual se traduce a menos deslizamiento en las ruedas, si el peso de la carga se encuentra distribuido uniformemente sobre ellas, un mayor consumo de energía, costo; y, posiblemente, la necesidad de incorporar un sistema de suspensión para distribuir las fuerzas sobre las ruedas (Martinez, 2009).

**Figura 12**

*Robots omnidireccionales de 3 y 4 llantas.*



*Nota.* Tomado de “*Diseño Mecánico de un Robot Omnidireccional*”, por S. Martinez, 2009, Universidad de la República de Uruguay.

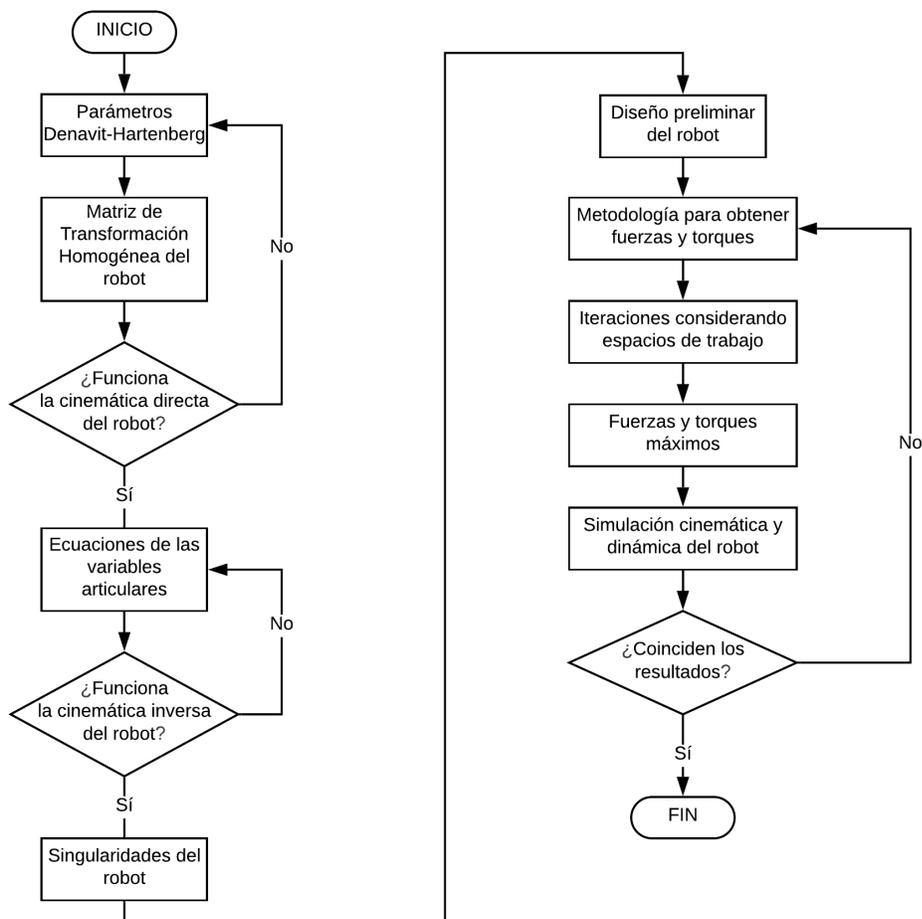
**Dimensionamiento de Robots**

El dimensionamiento de robots conlleva el análisis cinemático y dinámico con el fin de conocer las capacidades físicas de los actuadores, que se requieren para realizar el movimiento de cada grado de libertad del robot.

Existen varias alternativas a seguir para dimensionar un robot, en la Figura 13 se muestra un diagrama de flujo del proceso que se utiliza en el presente trabajo.

**Figura 13**

*Diagrama de flujo del proceso para el dimensionamiento del robot.*



### Impresión 3D

La impresión 3D, también conocida como manufactura aditiva, ha atraído cada vez más la atención alrededor del mundo debido a un gran desarrollo de este tipo de tecnología; trasladándose, de la creación rápida de prototipos de piezas a la producción de elementos de alto valor. Factores como la reducción de costos de materia prima y de mano de obra, reducción de tiempos de producción y la libertad de personalización, son algunas de las ventajas de la impresión 3D en comparación con la fabricación tradicional (Bekas, Hou, Liu, & Panesar, 2019).

### ***Técnicas de Impresión de Manufactura Aditiva***

La manufactura aditiva consiste en un proceso basado en la idea de convertir un modelo digital en un objeto tridimensional sólido. Con el pasar de los años, varias técnicas de impresión se han desarrollado con la característica común de crear un modelo físico capa por capa (Metalmecánica Internacional, 2015). A continuación, se mencionan algunas de las técnicas más usadas en la industria manufacturera.

**Estereolitografía.** La estereolitografía es una técnica de fabricación de sólidos elaborados capa por capa, que utiliza dos elementos indispensables, un rayo láser y un líquido fotosensible; el rayo láser, se enfoca a una superficie libre de un líquido fotosensible para inducir la polimerización del líquido en esa región y transformarlo en un sólido polimerizado (Sun, 2005).

**Sinterización Selectiva por Láser.** La sinterización selectiva por láser (SLS), es un tipo de fusión de lecho de polvo (PBF, por sus siglas en inglés), en la que un lecho de polímero en polvo, resina o metal es conducido parcialmente (sinterizado) o completamente (fundido) por una fuente de calentamiento direccional de alta potencia; lo cual, da como resultado una capa solidificada de polvo fundido (Dizon & Espera, 2018).

**Modelado por Deposición Fundida.** El modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés) es un proceso de manufactura aditiva, en el que se crea un sólido a partir de un diseño asistido por computador (CAD); la creación del sólido, se lo realiza capa por capa con el uso de un filamento de plástico como materia prima (Sereni, 2016).

**Laminación Selectiva por Deposición (SDL).** La técnica de laminación selectiva por deposición (SDL, por sus siglas en inglés), utiliza papel como único material de construcción y es capaz de imprimir en más de un millón de colores; el proceso, se basa en formar sólidos mediante la unión de varias capas de papel, al cual se añaden colores y pegamento; y, se corta de acuerdo a la capa del sólido (Low, y otros, 2017).

### ***Materiales no Convencionales para Impresión 3D***

Tras el surgimiento de las nuevas técnicas de fabricación aditiva, los materiales necesarios para el prototipado de objetos también evolucionan. La impresión 3D abre un nuevo mundo de posibilidades para diseñar y fabricar todo tipo de piezas utilizando materiales no convencionales que se adaptan a las necesidades del usuario; y, ofreciendo grandes ventajas como la creación de formas complejas y la fabricación multimaterial (Jorquera, 2016). Entre los materiales no convencionales, más utilizados en la actualidad, para impresión 3D se encuentran:

**Hormigón.** En lo que se refiere a la fabricación aditiva de piezas, concretamente a la impresión 3D con hormigón, la industria de la construcción y de la arquitectura, se encuentra actualmente en una fase preliminar; aunque, ya existen algunas empresas que desarrollan elementos de hormigón a gran escala, de forma extruida o utilizando impresoras 3D. El hormigón es el material más utilizado en la construcción en todo el mundo; por lo que, su utilización se ha intentado extrapolar de forma masiva a la construcción aditiva (Campillo, 2017).

**Cera.** El proceso de fundición de la cera es, a menudo, utilizado por joyeros y fabricantes de piezas pequeñas con alta calidad; ya que, este material utilizado como molde permite la creación de productos con cualquier material que pueda fundirse. En la actualidad, la impresión 3D con cera no ha sido considerada como indispensable dentro del campo de la manufactura aditiva; pero, si existen trabajos enfocados a robots con dispensadores de cera caliente, siguiendo un código de programación previamente establecido (Bonilla & Dávalos, 2006).

**Mortero de Cemento.** El uso de las impresoras 3D en la construcción, brinda la posibilidad de realizar viviendas utilizando esta nueva tecnología; aunque, el principal limitante para el uso de este tipo de impresoras es el desarrollo de un mortero con materiales locales que se adapte al uso de estos nuevos equipos. Las características deseables del material para la impresión 3D son una combinación de las características del hormigón autocompactante y del mortero proyectado, en el sentido de que debe ser suficientemente fluido para ser bombeado, pero a la vez suficientemente firme para que mantenga su forma al ser extruido por medio de la boquilla. Este requerimiento está directamente relacionado con la evolución de la resistencia mecánica del material y la magnitud de carga aplicada, lo que puede limitar la velocidad del proceso de construcción (Palacios & Velastegui, 2018).

### ***Post-procesadores para Impresión 3D***

Los avances tecnológicos progresan rápidamente en la forma de concebir, diseñar y fabricar los productos que la sociedad actual demanda; y, por ende, la industria moderna se ve en la necesidad de seguir creciendo en el ámbito tecnológico y práctico. Es por esto, que han surgido nuevos métodos de diseño y fabricación para

prototipado rápido, sin olvidar los métodos más tradicionales que todavía siguen siendo los más empleados (Amilibia, 2016).

Los software de diseño y manufactura asistidos por computador (CAD-CAM) tienen como objetivo permitir al diseñador planear distintas estrategias del mecanizado de las piezas en un entorno virtual, seguido de una simulación para verificar un maquinado correcto; y, por último generar el código G&M del cual se encarga el post-procesador (García, 2006).

Un post-procesador es una herramienta que trabaja conjuntamente con el software CAD/CAM, el cual permite convertir las estrategias de maquinado al lenguaje básico de programación de la máquina de control numérico específica. Por otra parte, el programa de control numérico es un conjunto de códigos (compuesto por letras y números) que representan las órdenes de los movimientos dadas a la máquina; tales como, el movimiento de la herramienta o la pieza en los ejes X, Y, Z. Dicho de otra forma, el control numérico debe interpretar las instrucciones contenidas en el programa, convertirlas en señales que accionen los dispositivos de las máquinas y comprobar su resultado (García, 2006).

Los post-procesadores se basan en tres fundamentos:

- **Máquina:** es importante analizar la configuración que permite establecer los parámetros propios de la máquina; tales como, posiciones de la herramienta (efector final) o cuando ésta va de una posición a otra.
- **Control:** se encarga de la configuración de los parámetros para la generación de trayectorias (sean líneas o curvas), subprogramas o ciclos anidados; estas configuraciones son propias de cada fabricante.
- **Código:** se encarga de la traducción de las instrucciones contenidas en el programa a señales de acción para la máquina.

## **Capítulo III**

### **Diseño Mecatrónico**

El capítulo presenta la metodología a emplear para el diseño y validación del presente proyecto, contiene los requerimientos necesarios para que los subsistemas funcionen acorde a las especificaciones planteadas, se mencionan las etapas consideradas para el diseño mecatrónico como tal y finaliza con la forma de implementación de cada subsistema en el concepto general.

#### **Metodología**

El surgimiento de productos innovadores requiere una combinación interdisciplinaria de ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica/electrónica y tecnologías de la información; razón por la cual, la norma VDI 2206 busca reunir todos los requisitos que componen un sistema mecatrónico con el fin de obtener productos de calidad.

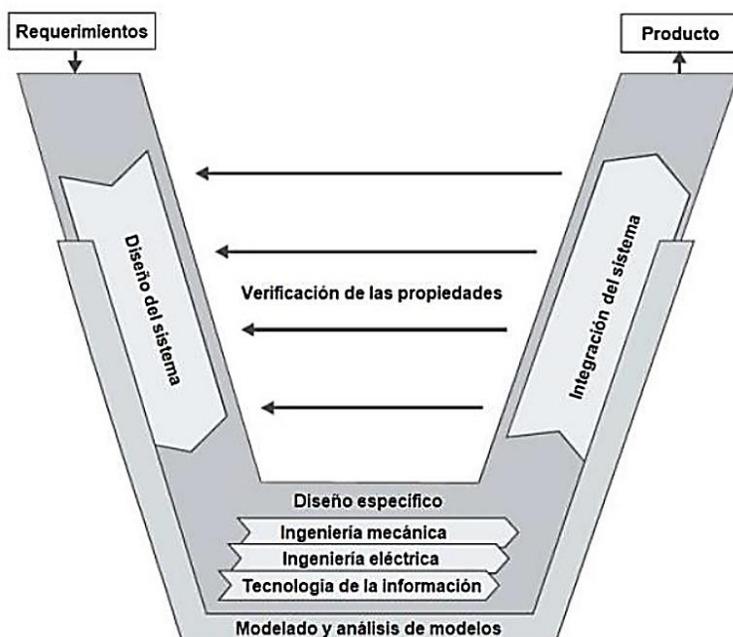
Para el desarrollo del proyecto se utiliza la metodología de diseño de sistemas mecatrónicos propuesta dentro de la norma VDI 2206, misma que está basada en un sistema concurrente (en lugar de secuencial) lo que permite obtener como resultado productos con mayor sinergia. Esta metodología se describe como un modelo flexible que puede ser aplicado para el manejo de sistemas tanto a nivel general como específico (Gausemeier & Moehringer, VDI 2206, 2002).

El objetivo de los sistemas concurrentes es analizar simultáneamente varios requerimientos o puntos de vista que el producto innovador debe tener. La base de la metodología mencionada es el modelo en “V” que se muestra en la Figura 14; la cual, ilustra un enfoque bidireccional, esto quiere decir un enfoque descendente, considerando un diseño detallado del sistema (división en subfunciones), y un enfoque

ascendente, considerando la integración de estas subfunciones al sistema general; lo cual, permite una validación permanente entre los requisitos/funciones especificadas (lado izquierdo) y el sistema virtual/real (lado derecho) (Gausemeier & Moehringer, VDI 2206, 2002).

### Figura 14

Modelo en "V" para el diseño de sistemas mecatrónicos.



Nota. Tomado de "A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems.", por J. Gausemeier & S. Moehringer, 2002, VDI 2206.

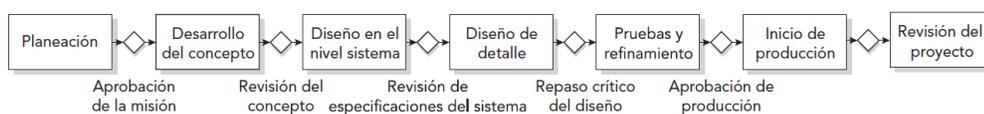
El objetivo del modelo en "V" es diseñar cada uno de los subsistemas planteados pensando en la integración final de todos, logrando obtener un producto innovador de calidad y que cumpla a cabalidad todos los requisitos esperados. El modelo inicia con establecer los requerimientos del proyecto de una manera clara, con su respectiva métrica de evaluación para poder pasar hacia el diseño del sistema;

estableciendo, el concepto más idóneo para solucionar el problema. A continuación, se propone un diseño específico, el cual divide al concepto general en áreas concretas para ser tratadas de forma independiente; pero, con un nivel mayor de minuciosidad. Los resultados del diseño específico se integran a un sistema general para analizar sus interrelaciones y se validan con el fin de comprobar que los requerimientos iniciales han sido cumplidos según lo establecido; de manera posterior, se construyen modelos (prototipos) o a su vez se simula el concepto final para definir los últimos detalles, obteniendo de esta manera el producto final deseado.

Para simplificar el proceso de diseño, y tomando como referencia la Norma VDI 2206, se plantea dividir el proyecto en diferentes etapas con el fin de buscar la mejor alternativa de solución para cada una de ellas; y, posteriormente integrarlas dentro del producto final. Para lo cual, se propone además la aplicación del proceso de diseño y desarrollo de productos (Ulrich & Eppinger, 2013), en donde se plantea el proceso de desarrollo de productos de forma genérica, como consta en la Figura 15.

### Figura 15

*Proceso genérico de diseño y desarrollo de productos.*



*Nota.* Tomado de “*Diseño y desarrollo de productos*”, por K. Ulrich & S. Eppinger, 2013, McGraw Hill.

## Subsistema Mecánico

El subsistema mecánico está compuesto por la plataforma omnidireccional y el brazo robótico de configuración PRR; en esta sección del capítulo, se establece sus requerimientos para su diseño e implementación.

### *Requerimientos*

**Identificación de Necesidades.** Las necesidades del robot que han sido identificadas y deben ser tomadas en cuenta en el diseño del subsistema mecánico se muestran en la Tabla 2; estas necesidades, buscan que la construcción del proyecto implique procesos de manufactura accesibles, fabricación de piezas a bajo costo, fácil ensamblaje y uso de piezas estándar. Se considera un rango de importancia, tomando en cuenta que 1 corresponde a un grado bajo y 5 un grado alto de importancia.

**Tabla 2**

*Identificación de necesidades del subsistema mecánico.*

	<b>Necesidad</b>	<b>Importancia</b>
<b>1</b>	El robot tiene gran área de trabajo	5
<b>2</b>	El robot es liviano	3
<b>3</b>	El robot es estéticamente agradable	2
<b>4</b>	El robot es silencioso	1
<b>5</b>	El robot es fácil de instalar	3
<b>6</b>	El robot soporta impactos	3

**Lista de Métricas.** Las necesidades identificadas anteriormente deben tener una variable con la cual puedan ser evaluadas y cuantificadas, de modo que se pueda determinar su grado de cumplimiento; por lo que, es importante establecer una métrica para cada necesidad planteada; y, esto se puede observar en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Lista de métricas del subsistema mecánico.*

Necesidad		Métrica	Importancia	Unidad
1	1	Área de trabajo	5	mm <sup>2</sup>
2	2	Masa total	3	Kg
3	3	Apariencia agradable	2	Subjetivo
4	4	Nivel de ruido generado	1	dB
5	5	Tiempo de ensamble	3	h
6	6	Resistencia del material al impacto	3	MPa

**Matriz de Necesidades y Métricas.** La matriz de necesidades y métricas establece la relación existente entre los requerimientos del proyecto y su forma de evaluación, esto permite conocer la forma y el grado en la que cada necesidad va a ser resuelta a cabalidad. Esta matriz se evidencia a continuación en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Matriz de necesidades y métricas del subsistema mecánico.*

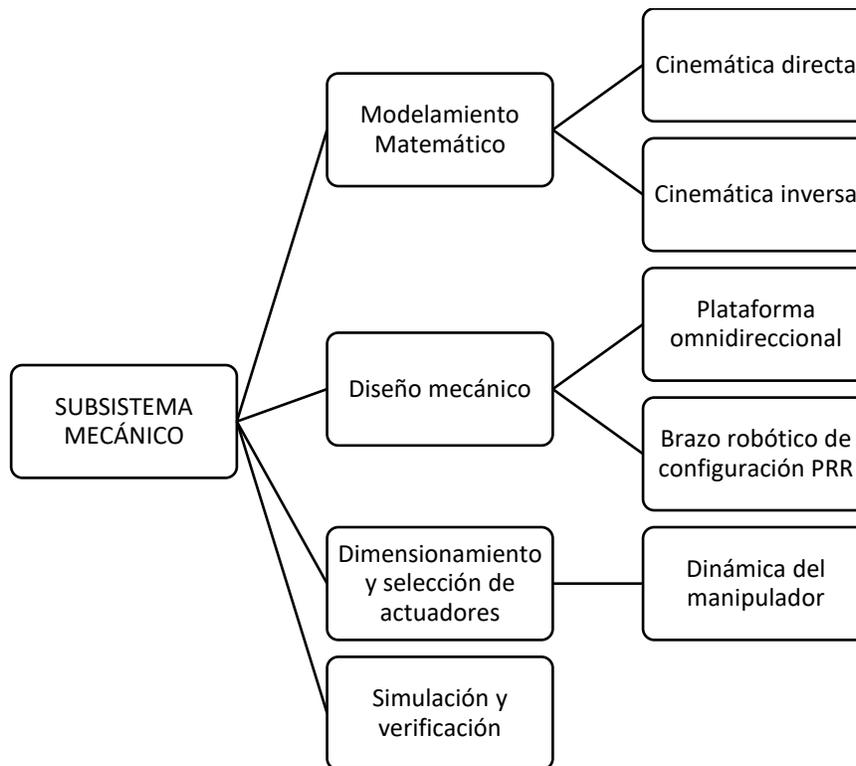
		1	2	3	4	5	6
		<b>Métrica</b>					
		Área de trabajo	Masa total	Apariencia agradable	Nivel de ruido generado	Tiempo de ensamble	Resistencia del material al impacto
<b>Necesidad</b>							
1	El robot tiene gran área de trabajo	●					
2	El robot es liviano		●				
3	El robot es estéticamente agradable			●			
4	El robot es silencioso				●		
5	El robot es fácil de instalar					●	
6	El robot soporta impactos						●

### ***Diseño Mecánico***

El diseño del subsistema mecánico comprende las etapas descritas en la Figura 16. Se realiza el modelamiento matemático para determinar los parámetros geométricos y cinemáticos a partir de un diseño previo; seguido de esto, se propone un diseño CAD de todos los componentes mecánicos que comprende el prototipo del robot, a partir de lo cual se calcula la dinámica del manipulador para obtener un dimensionamiento óptimo de los actuadores y seleccionar los mismos en función de los requerimientos propuestos. Es importante recalcar que el concepto general al ser dividido en dos subsistemas permite un análisis más concreto de cada uno de ellos, considerando a la plataforma omnidireccional como una junta prismática en el eje Y; y, al brazo robótico como un manipulador de 3 grados de libertad; evitando, un análisis más complejo al considerar un solo sistema como un robot de 4 grados de libertad; por último, los dos subsistemas son verificados en un software de simulación para su posterior fabricación.

Figura 16

Componentes del subsistema mecánico.



### Modelamiento Matemático.

**Cinemática Directa.** La cinemática directa de un robot consiste en determinar la posición y orientación del efector final, conociendo los valores de sus variables articulares. Las ecuaciones cinemáticas son obtenidas por medio de la convención de Denavit-Hartenberg detallada en (Reza, 2010). Cada matriz de transformación homogénea  $A_i$  se representa como el producto de cuatro transformaciones básicas, como se muestra en la Ecuación (1).

$$A_i = R_{Z_{i-1}, \theta_i} D_{Z_{i-1}, d_i} D_{X_{i-1}, a_i} R_{X_{i-1}, \alpha_i} \quad (1)$$

En donde R corresponde a una matriz de rotación y D a una matriz de traslación; y, los parámetros  $\theta_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$ ,  $\alpha_i$  están asociados con el eslabón y articulación  $i$  dentro de la cadena cinemática. A continuación, se detallan las transformaciones básicas que componen la matriz de transformación homogénea general.

$$R_{Z_{i-1},\theta_i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$D_{Z_{i-1},d_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D_{X_{i-1},a_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_{X_{i-1},\alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Obteniendo así la matriz de transformación homogénea a emplearse para el análisis de la cinemática del robot.

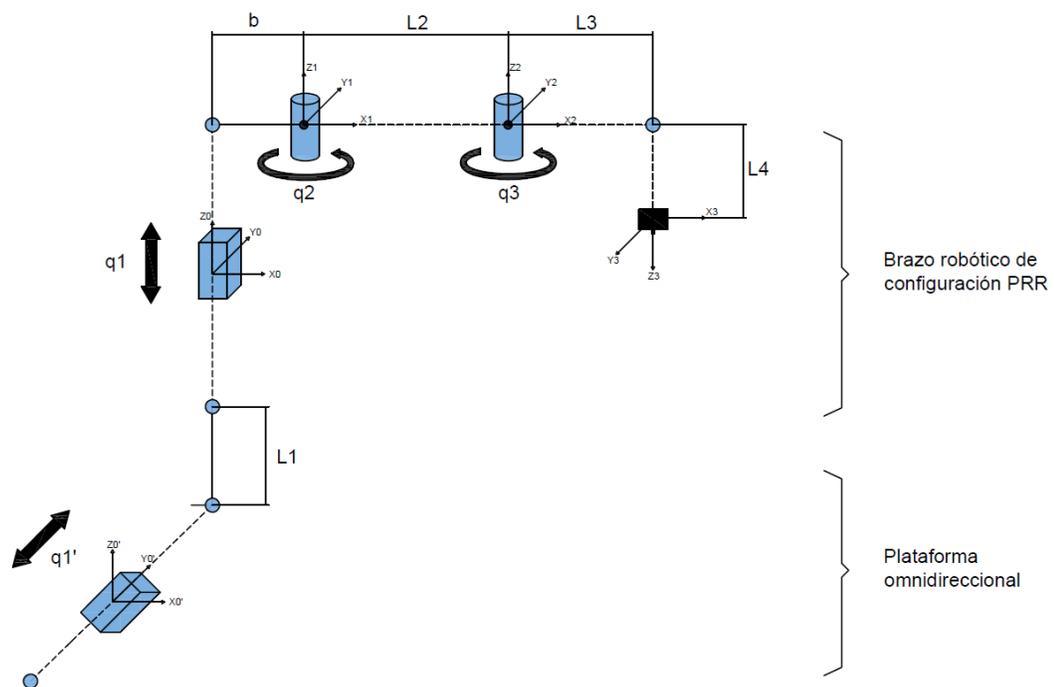
$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

En la Figura 17 se presenta el diagrama de esqueleto que representa de manera simplificada el prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D; en él, se muestra con claridad el desplazamiento de la plataforma omnidireccional y la configuración PRR

del brazo robótico; con ello, se obtienen los parámetros de Denavit-Hartenberg mostrados en la Tabla 5, correspondientes al brazo y necesarios para establecer la matriz de transformación homogénea del prototipo en general; tomando en cuenta, que la plataforma omnidireccional únicamente corresponde a una matriz de traslación, que es añadida a la matriz de transformación homogénea del manipulador de 3 grados de libertad.

**Figura 17**

*Diagrama de esqueleto del prototipo de robot omnidireccional.*



**Tabla 5**

*Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo robótico de configuración PRR.*

	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
$A_1$	0	$L_1 + q_1$	b	0
$A_2$	$q_2$	0	$L_2$	0
$A_3$	$q_3$	$-L_4$	$L_3$	180°

En base a los parámetros establecidos en la Tabla 5 y considerando el desplazamiento de traslación de la plataforma omnidireccional, se obtiene la matriz de transformación homogénea para cada variable articular, con ayuda de la ecuación general mostrada en la Ecuación (6).

$$A_1' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_1' \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 + q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & L_2 \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & L_2 \sin(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & \sin(q_3) & 0 & L_3 \cos(q_3) \\ \sin(q_3) & -\cos(q_3) & 0 & L_3 \sin(q_3) \\ 0 & 0 & -1 & -L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

De esta manera, la matriz de transformación homogénea total del robot omnidireccional se obtiene multiplicando las matrices obtenidas para cada articulación

(Ecuaciones (7) - (10)) y es expresada en la Ecuación (13); en ella, se puede evidenciar la matriz de rotación y las coordenadas correspondientes a X, Y, Z del efector final.

$$T = A_1' * A_1 * A_2 * A_3 \quad (11)$$

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$T = \begin{bmatrix} c(q_2 + q_3) & s(q_2 + q_3) & 0 & L_2 c(q_2) + L_3 c(q_2 + q_3) + b \\ s(q_2 + q_3) & -c(q_2 + q_3) & 0 & q_1' + L_2 s(q_2) + L_3 s(q_2 + q_3) \\ 0 & 0 & -1 & q_1 + L_1 - L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

**Cinemática Inversa.** La cinemática inversa de un robot consiste en determinar el valor de las variables articulares conociendo la posición y orientación del efector final. A pesar de que no existe un método estándar y general para resolver este problema, existen ciertos métodos analíticos y numéricos para su solución. En esta ocasión, se ha considerado utilizar la técnica de transformación inversa y el método geométrico detallado en (Reza, 2010) para resolver únicamente la cinemática inversa correspondiente al brazo robótico. Con respecto a la plataforma omnidireccional, al tratarse de una junta prismática en el eje Y, junto con el brazo robótico forman un sistema redundante; por lo que, el valor de su variable articular estará limitado directamente por la posición del efector final con el propósito de ampliar el espacio de trabajo del brazo.

La técnica de transformación inversa permite hallar los valores de las variables articulares por medio de la inversión de cada matriz de transformación homogénea, como se expresa en la Ecuación (15). Este proceso de inversión se repite hasta que las

ecuaciones resultantes permitan hallar cada una de las variables articulares. Como se observa en la Ecuación (16), únicamente se establecen las filas y columnas necesarias de las matrices correspondientes para formar las ecuaciones.

$$A_1^{-1} * T = A_1^{-1}(A_1 * A_2 * A_3) \quad (14)$$

$$A_1^{-1} * T = A_2 * A_3 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L_1 - q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & P_x \\ a_2 & b_2 & c_2 & P_y \\ a_3 & b_3 & c_3 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & n_1 & o_1 & L_2 c(q_2) + L_3 c(q_2 + q_3) \\ m_2 & n_2 & o_2 & L_2 s(q_2) + L_3 s(q_2 + q_3) \\ m_3 & n_3 & o_3 & -L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

A partir de lo cual, se obtiene la ecuación que permite obtener la variable articular en función de las coordenadas del efector final. A continuación se presentan las 3 ecuaciones resultantes del sistema matricial mostrado anteriormente.

$$P_x - b = L_2 c(q_2) + L_3 c(q_2 + q_3) \quad (17)$$

$$P_y = L_2 s(q_2) + L_3 s(q_2 + q_3) \quad (18)$$

$$P_z - L_1 - q_1 = -L_4 \quad (19)$$

Con esta primera transformación inversa, solo es posible determinar la variable articular  $q_1$ ; por lo que, se emplea la Ecuación (19) para su efecto.

$$q_1 = P_z + L_4 - L_1 \quad (20)$$

A continuación se realiza otra inversión adicional con el fin de obtener la siguiente variable articular a partir de las ecuaciones planteadas.

$$A_2^{-1} * A_1^{-1} * T = A_3 \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} c(q_2) & s(q_2) & 0 & -L_2 - b c(q_2) \\ -s(q_2) & c(q_2) & 0 & b s(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & -L_1 - q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 b_1 c_1 P_x \\ a_2 b_2 c_2 P_y \\ a_3 b_3 c_3 P_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 n_1 o_1 L_3 c(q_3) \\ m_2 n_2 o_2 L_3 s(q_3) \\ m_3 n_3 o_3 -L_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

A continuación se presentan las 3 ecuaciones resultantes del sistema matricial mostrado anteriormente.

$$P_x c(q_2) + P_y s(q_2) - L_2 - b c(q_2) = L_3 c(q_3) \quad (23)$$

$$-P_x s(q_2) + P_y c(q_2) + b s(q_2) = L_3 s(q_3) \quad (24)$$

$$P_z - L_1 - q_1 = -L_4 \quad (25)$$

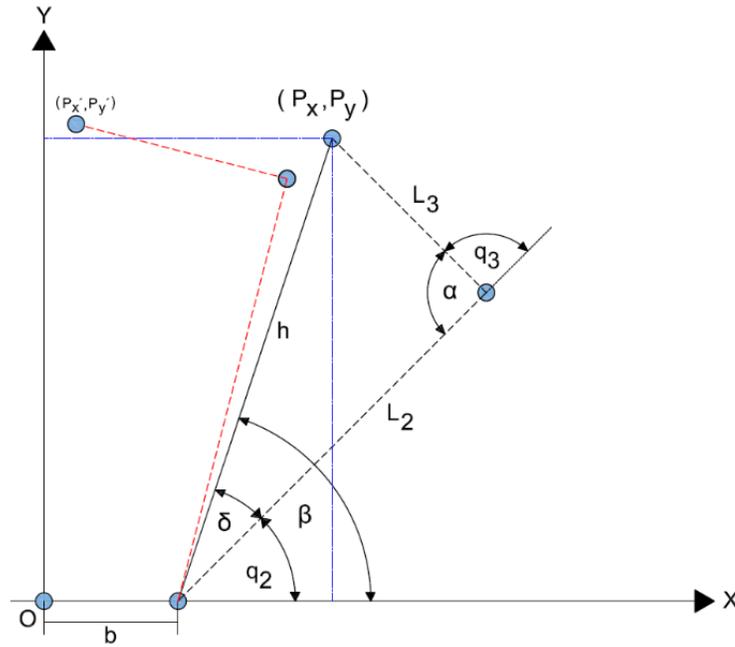
Resolviendo el sistema de ecuaciones formado por las Ecuaciones (23) y (24) se obtiene el resultado de la variable articular  $q_3$  expresada a continuación.

$$q_3 = \cos^{-1} \left( \frac{(P_x - b)^2 + P_y^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \right) \quad (26)$$

Para hallar la variable articular restante  $q_2$  se emplea el método geométrico a partir de la resolución de triángulos; ya que, la geometría del brazo robótico permite utilizar teoremas geométricos y trigonométricos que simplifican las operaciones de cálculo, en la Figura 18 se muestra un esquema del brazo robótico para su análisis geométrico.

**Figura 18**

Esquema del brazo robótico para el análisis geométrico.



A partir de ello, se plantean ecuaciones trigonométricas conjuntamente con la ley de cosenos (Ecuación (29)) y ley de senos (Ecuación (30)) para calcular la variable articular restante.

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x - b}\right) \quad (27)$$

$$\alpha = 180 - q_3 \quad (28)$$

$$h^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos(\alpha)$$

$$h = \sqrt{L_2^2 + L_3^2 + 2L_2L_3 \cos(q_3)} \quad (29)$$

$$\frac{h}{\sin(\alpha)} = \frac{L_3}{\sin(\delta)} \quad (30)$$

$$\frac{h}{\sin(180 - q_3)} = \frac{L_3}{\sin(\delta)}$$

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{L_3 \sin(q_3)}{h}\right) \quad (31)$$

Utilizando las Ecuaciones (27) y (31) se plantea la variable articular  $q_2$  mostrada a continuación.

$$q_2 = \beta - \delta$$

$$q_2 = \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x - b}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{L_3 \sin(q_3)}{h}\right) \quad (32)$$

Es importante mencionar que la variable articular  $q_2$  calculada, está limitada al Primer Cuadrante como se mostró en la Figura 18; por lo que, a continuación se establecen los factores de corrección para los demás cuadrantes.

$$\text{Segundo Cuadrante: } q_2 = 180 + \beta - \delta$$

$$\text{Tercer Cuadrante: } q_2 = 180 + \beta - \delta$$

$$\text{Cuarto Cuadrante: } q_2 = 360 + \beta - \delta$$

***Dinámica del Robot.*** La dinámica es aquella que se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que las mismas generan. En el caso del modelo dinámico de un robot, se busca conocer la relación entre el movimiento del mismo y las fuerzas que se originan. Para calcular la fuerza de cada actuador, es primordial determinar las relaciones dinámicas que gobiernan los movimientos del robot. Estas relaciones son las ecuaciones de fuerza-masa-aceleración y de torque-inercia-aceleración angular (Niku, 2011).

Las ecuaciones dinámicas de un robot pueden ser descritas por diversos métodos, entre los que se destaca Newton-Euler y Euler-Lagrange. El primer método es más fundamental y permite encontrar tanto las ecuaciones dinámicas del robot para determinar las fuerzas y torques necesarios, para que los actuadores muevan al mismo; como también, las fuerzas en cada una de las articulaciones. Mientras que, el segundo método provee únicamente las ecuaciones diferenciales para determinar las fuerzas y torques de los actuadores (Reza, 2010).

Es importante recalcar que la Mecánica Lagrangiana está basada en la diferenciación de los términos de la energía con respecto a las variables del sistema y el tiempo, como se muestra en la Ecuación (33), donde  $L$  corresponde al Lagrangiano,  $K$  es la energía cinética del sistema y  $P$  es la energía potencial del sistema. Para casos simples, esta técnica puede resultar más extensa que la Mecánica Newtoniana; sin embargo, como la complejidad de los sistemas incrementa, la mecánica Lagrangiana resulta relativamente simple de usar (Niku, 2011).

$$L = K - P \tag{33}$$

La Mecánica Lagrangiana está basada en dos ecuaciones generalizadas: una para movimientos lineales (Ecuación (34)) y otra para movimientos rotacionales

(Ecuación (35)), donde  $F_i$  es la sumatoria de todas las fuerzas externas para un movimiento lineal; mientras que,  $T_i$  es la sumatoria de todos los torques externos para un movimiento rotacional y,  $x_i$  y  $\theta_i$  son variables del sistema.

$$F_i = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} \quad (34)$$

$$T_i = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \quad (35)$$

Como se puede observar, las ecuaciones resultantes para un sistema de múltiples grados de libertad resultarían muy extensas y complicadas; ya que, el proceso a ejecutarse mostrado en las Ecuaciones (34) y (35) resulta más complejo a medida que aumenta el número de grados de libertad; y, solamente determinar al Lagrangiano sería un proceso de cálculo muy complicado. Razón por la cual, para el cálculo de la dinámica del brazo robótico de configuración PRR se opta por utilizar el proceso generalizado planteado por (Niku, 2011) para la obtención de fuerzas y torques en cada articulación (ya sea que realice un movimiento lineal o rotacional). La ecuación general de movimiento para un robot multi-ejes que resume el autor se expresa en la Ecuación (36).

$$T_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + I_{i(act)} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (36)$$

Donde:

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^n \text{Trace}(U_{pj} J_p U_{pi}^T) \quad (37)$$

Y junto a la segunda derivada de la variable articular correspondiente  $\ddot{q}_j$  forman el primer término de la Ecuación (36) y representa los términos de aceleración-inercia. A continuación se detallan las ecuaciones para calcular cada factor de la Ecuación (37).

$$U_{ij} = \frac{\partial {}^0T_i}{\partial q_j} = \frac{\partial (A_1 A_2 \dots A_j \dots A_i)}{\partial q_j} = A_1 A_2 \dots Q_j A_j \dots A_i \quad j \leq i \quad (38)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz})_i & I_{xy}_i & I_{xz}_i & m_i \bar{x}_i \\ I_{xy}_i & \frac{1}{2}(I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})_i & I_{yz}_i & m_i \bar{y}_i \\ I_{xz}_i & I_{yz}_i & \frac{1}{2}(I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})_i & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (39)$$

Es importante mencionar que existen 2 matrices  $Q_i$ , que siempre son constantes y se utilizan en la ecuación (38), todo depende si la junta en consideración es rotacional o prismática.

$$Q_i(\text{rotacional}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad Q_i(\text{prismática}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

El segundo término de la Ecuación (36) representa la inercia del actuador junto con la segunda derivada de la variable articular en cuestión; mientras que, la tercera parte abarca los términos de aceleración centrífuga y coriolis. A continuación se detallan las ecuaciones para calcular el tercer término de la Ecuación (36), considerando que  $q_j$  y  $\dot{q}_k$  corresponde a la primera derivada de las variables articulares correspondientes.

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^n \text{Trace}(U_{pjk} J_p U_{pi}^T) \quad (41)$$

Donde:

$$U_{ijk} = \frac{\partial U_{ij}}{\partial q_k} \quad (42)$$

El cuarto término de la Ecuación (36) describe los efectos de la gravedad sobre el sistema. Y se calcula como se plantea en la Ecuación (43); cabe mencionar, que  $\bar{r}_p$  representa el vector posición del centro de masa del eslabón con respecto al centro de rotación.

$$D_i = \sum_{p=i}^n -m_p g^T U_{pi} \bar{r}_p \quad (43)$$

A partir de lo expuesto anteriormente, la ecuación general de movimiento que describe la fuerza o torque para el brazo robótico de configuración PRR es la siguiente:

$$\begin{aligned} T_i = & D_{i1} \ddot{q}_1 + D_{i2} \ddot{q}_2 + D_{i3} \ddot{q}_3 + I_{i(act)} \ddot{q}_i + D_{i11} \dot{q}_1^2 \\ & + D_{i22} \dot{q}_2^2 + D_{i33} \dot{q}_3^2 + D_{i12} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + D_{i13} \dot{q}_1 \dot{q}_3 \\ & + D_{i21} \dot{q}_2 \dot{q}_1 + D_{i23} \dot{q}_2 \dot{q}_3 + D_{i31} \dot{q}_3 \dot{q}_1 + D_{i32} \dot{q}_3 \dot{q}_2 + D_i \end{aligned} \quad (44)$$

Considerando que los términos  $D_{ijk}$  y  $D_{ikj}$  son equivalentes, se obtiene un total de 3 ecuaciones (Ecuaciones (45)-(47)) que describen la fuerza y torques respectivamente, en cada una de las articulaciones del brazo robótico.

$$\begin{aligned}
F_1 = & D_{11}\ddot{q}_1 + D_{12}\ddot{q}_2 + D_{13}\ddot{q}_3 + I_{1(act)}\ddot{q}_1 + D_{111}\dot{q}_1^2 \\
& + D_{122}\dot{q}_2^2 + D_{133}\dot{q}_3^2 + 2 * D_{112}\dot{q}_1\dot{q}_2 \\
& + 2 * D_{113}\dot{q}_1\dot{q}_3 + 2 * D_{123}\dot{q}_2\dot{q}_3 + D_1
\end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned}
T_2 = & D_{21}\ddot{q}_1 + D_{22}\ddot{q}_2 + D_{23}\ddot{q}_3 + I_{2(act)}\ddot{q}_2 + D_{211}\dot{q}_1^2 \\
& + D_{222}\dot{q}_2^2 + D_{233}\dot{q}_3^2 + 2 * D_{212}\dot{q}_1\dot{q}_2 \\
& + 2 * D_{213}\dot{q}_1\dot{q}_3 + 2 * D_{223}\dot{q}_2\dot{q}_3 + D_2
\end{aligned} \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
T_3 = & D_{31}\ddot{q}_1 + D_{32}\ddot{q}_2 + D_{33}\ddot{q}_3 + I_{3(act)}\ddot{q}_3 + D_{311}\dot{q}_1^2 \\
& + D_{322}\dot{q}_2^2 + D_{333}\dot{q}_3^2 + 2 * D_{312}\dot{q}_1\dot{q}_2 \\
& + 2 * D_{313}\dot{q}_1\dot{q}_3 + 2 * D_{323}\dot{q}_2\dot{q}_3 + D_3
\end{aligned} \tag{47}$$

A partir de las 3 ecuaciones anteriores y con las propiedades físicas y geométricas de cada eslabón que se detallan en la Tabla 6, se obtienen los valores máximos de fuerza y torques para cada articulación que se utilizarán para la selección de los actuadores; todo esto, con ayuda de un algoritmo en Matlab que permite realizar un proceso iterativo que se representa en el diagrama de flujo expuesto en la Figura 19; y, además permite obtener de manera gráfica la fuerza y los torques aplicados en cada articulación por medio de movimientos cíclicos, como se muestra en la Figura 20, dentro del volumen de trabajo del manipulador, estas gráficas resultantes de fuerza y torques, se pueden evidenciar en las figuras presentadas a continuación (Figura 21-Figura 23).

**Tabla 6***Propiedades físicas y geométricas de los eslabones del brazo robótico.*

Propiedades	Eslabones		
	1	2	3
masa [g]	1190.55	1395.17	677.49
$I_{xx}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	425702369.56	769889.42	3108196.91
$I_{yy}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	438950368.71	4131547.5	7453983.79
$I_{zz}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	21060074.03	3761510.85	4340018.62
$I_{xy}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	4.05	-11915.69	7214.89
$I_{yx}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	4.05	-11915.69	7214.89
$I_{xz}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	-42305969.64	901145.72	-2836716.25
$I_{zx}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	-42305969.64	901145.72	-2836716.25
$I_{yz}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	6.8	-1411.05	-10093.96
$I_{zy}$ [g*mm <sup>2</sup> ]	6.8	-1411.05	-10093.96
$\bar{x}$ [mm]	-47.29	48.22	52.92
$\bar{y}$ [mm]	0	-0.13	-0.23
$\bar{z}$ [mm]	424.47	16.49	-47.49
$L_1$ [mm]	58.71	-	-
$L_2$ [mm]	-	182.87	-
$b$ [mm]	-	92.1	-
$L_3$ [mm]	-	-	106.01
$L_4$ [mm]	-	-	65

Figura 19

Diagrama de flujo del proceso iterativo para el cálculo de fuerza y torques.

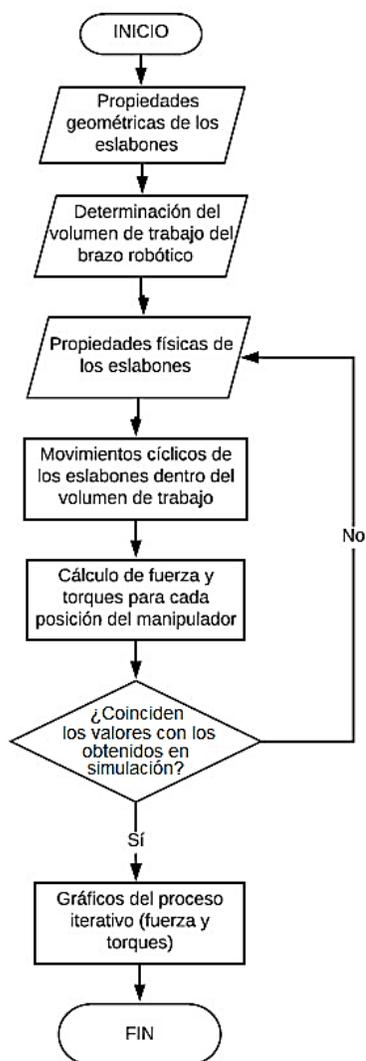
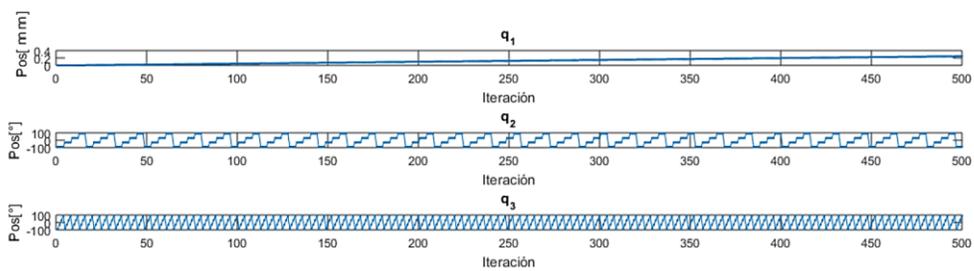


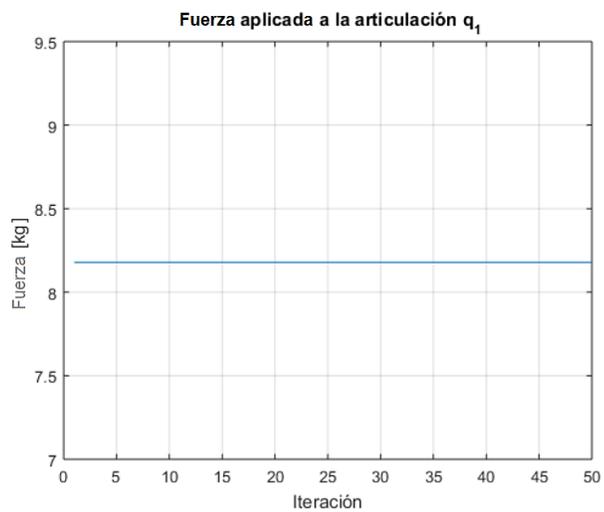
Figura 20

Posiciones de las variables articulares para el cálculo de valores máximos.

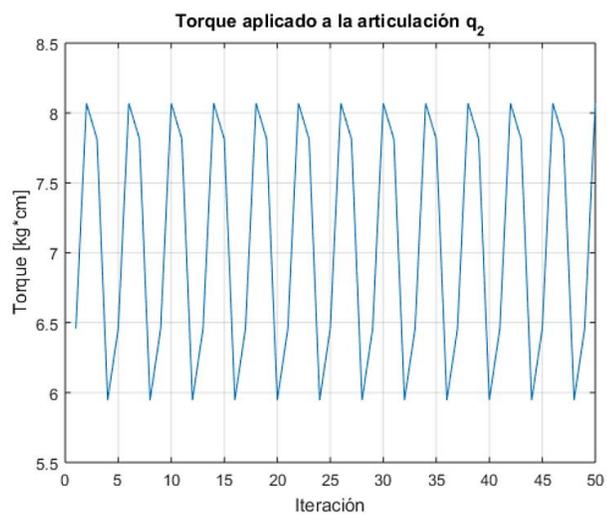


**Figura 21**

*Fuerza aplicada en la variable articular  $q_1$ .*

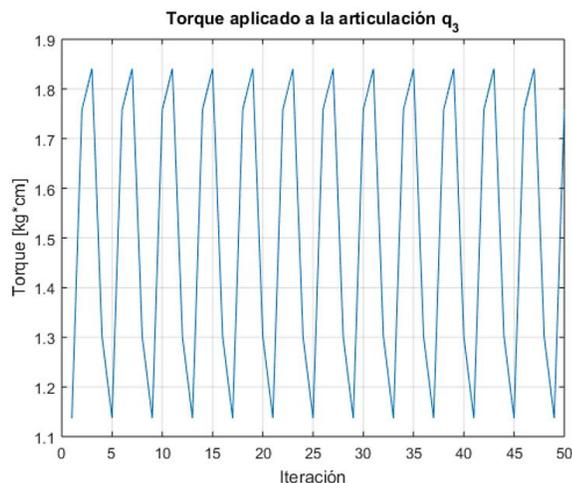
**Figura 22**

*Torque aplicado en la variable articular  $q_2$ .*



**Figura 23**

*Torque aplicado en la variable articular  $q_3$ .*



Los valores máximos obtenidos, después de realizar el proceso iterativo, se toman de las gráficas correspondientes y se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Resultados de fuerza y torques máximos.*

Articulación	Valor máximo
$q_1$	8.1788 [kgf] → 80.21 [N]
$q_2$	8.0687 [kg*cm] → 0.79 [N-m]
$q_3$	1.8408 [kg*cm] → 0.18 [N-m]

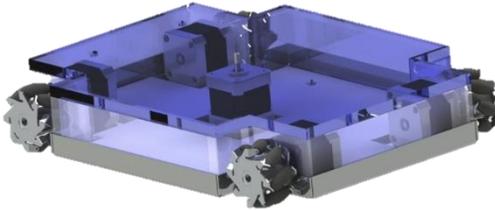
**Diseño Mecánico.** El diseño mecánico del robot se basa en la arquitectura del producto y en el método de diseño para manufactura (Ulrich & Eppinger, 2013). La arquitectura del producto en este proyecto pretende conseguir una arquitectura modular;

y, el diseño para manufactura busca optimizar el uso de recursos, reduciendo principalmente costos de producción.

Una arquitectura modular implica la división del producto en bloques, los cuales deben activar uno o pocos elementos funcionales del producto; y, las interacciones entre ellos se encuentran bien definidas (Ulrich & Eppinger, 2013). Como se muestra en la Tabla 8, el robot se divide en bloques para una mayor facilidad de construcción; y así, sus piezas sean de fácil remplazo en caso de existir modificaciones; considerando además, un análisis de pesos de los materiales escogidos y una optimización topológica de las piezas impresas en 3D.

**Tabla 8**

*Arquitectura modular del robot.*

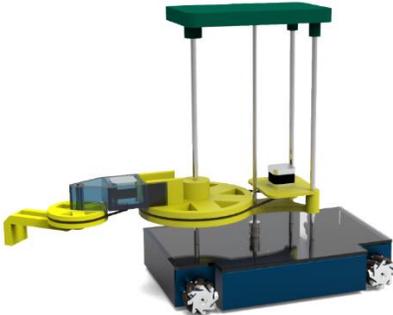
Elemento del robot	Bloques
<p><b>Base omnidireccional</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chasis metálico</li> <li>• Ruedas omnidireccionales</li> <li>• Motores</li> <li>• Estructura de acrílico</li> </ul>	
<p><b>Eslabón 1</b></p>	

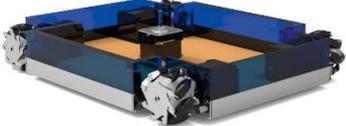
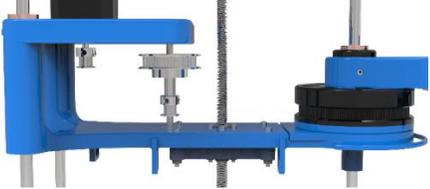
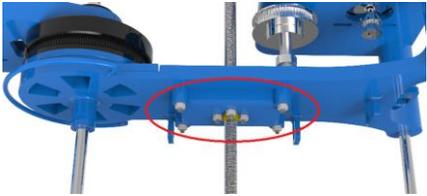
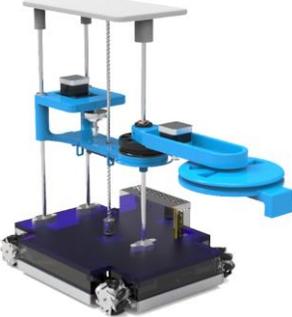
Elemento del robot	Bloques
Eslabón 2	
Eslabón 3	

Como producto del análisis y las interacciones propias del proceso de diseño se obtuvo un prototipo final cuya evolución y mejoras pueden apreciarse en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Evolución y mejoras del diseño mecánico.*

Descripción	Ilustración
<p>Primer prototipo realizado, sin estructura metálica de soporte, transmisión directa de velocidad y sin optimizar topológicamente las piezas impresas en 3D.</p>	

Descripción	Ilustración
<p>Se optó por utilizar chapa metálica como estructura de soporte, aumentando la capacidad de resistencia de todo el prototipo y así evitar deformaciones en su base.</p>	
<p>Se implementó una caja reductora con una relación de transmisión igual a 29.06 con el objetivo de incrementar el torque del motor. La caja reductora consta de 2 pares de ruedas dentadas con relaciones de transmisión de 3.75 y 7.75 respectivamente.</p>	
<p>Se implementó un soporte de tuerca en el tornillo sinfín con el objetivo de tener un mejor acople con el eslabón.</p>	
<p>Se incorporaron ranuras en los eslabones donde se apoyan los motores, para poder templar las bandas de una manera más efectiva.</p>	
<p>Prototipo final basado en diseño para la manufactura, tomando en consideración canales necesarios para el cableado y una optimización topológica en cada una de las piezas impresas en 3D.</p>	

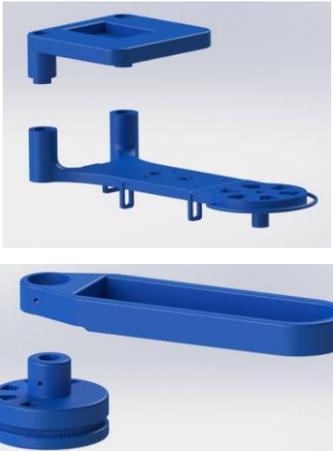
La reducción de costos de producción del robot se enfoca en operaciones como:

- Rediseño de las piezas del robot para facilitar operaciones de manufactura.
- Rediseño de las piezas del robot para facilitar operaciones de ensamblaje.
- Uso de piezas estandarizadas.
- Procesos de manufactura accesibles.

A continuación se muestra en la Tabla 10, cada una de las operaciones a considerar del diseño para manufactura y su forma de aplicación en el proyecto.

**Tabla 10**

*Diseño para manufactura.*

Operación	Descripción	Ilustración
Rediseño de las piezas del robot para facilitar operaciones de manufactura	Evitar el uso de apoyos adicionales en la impresión 3D	

Operación	Descripción	Ilustración
Rediseño de las piezas del robot para facilitar operaciones de ensamblaje	Llevar a cabo un ensamblaje modular y facilitar el intercambio de piezas en caso de ser necesario	
Uso de piezas estandarizadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poleas (caja reductora)</li> <li>• Ejes guía</li> <li>• Tornillo sin fin</li> <li>• Elementos de sujeción (pernos, arandelas y tuercas)</li> </ul>	 
Procesos de manufactura accesibles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torneado convencional</li> <li>• Corte con plasma</li> <li>• Doblado de láminas</li> <li>• Impresión 3D</li> </ul>	

**Dimensionamiento y Selección de Actuadores.** El proceso de dimensionamiento y selección de actuadores se aplica tanto en la plataforma omnidireccional como en el brazo robótico. Para la plataforma se empleó una calculadora online de (Society of Robots, 2014); la cual, permite ingresar datos como el

diámetro y número de ruedas, masa a mover, velocidad y aceleración deseada y eficiencia; es decir, propiedades físicas y geométricas del robot, de modo que se obtiene el valor de torque aproximado que debe tener cada actuador. En la Figura 24 se muestra el proceso mencionado de manera detallada. Es importante recalcar que esta calculadora está basada en los conceptos de dinámica de la Society of Robots, más concretamente en la calculadora RMF (Robot Motor Factor); la cual, es utilizada en una variedad de proyectos que han sido presentados en conferencias como: IEEE Robotics & Automation Society, Conference Alerts y ASME conferences (Society of Robots, 2013).

### Figura 24

*Dimensionamiento de actuadores para la plataforma omnidireccional.*

Cantidad de motores	<input type="text" value="4"/>	
Peso que el robot tiene que mover	<input type="text" value="10"/>	Kilogramo ▾
Velocidad requerida	<input type="text" value="5"/>	cm/s ▾
Aceleración requerida	<input type="text" value="0.5"/>	m/s <sup>2</sup> ▾
Diámetro de la rueda	<input type="text" value="5"/>	Centímetro ▾
Velocidad del motor	<input type="text" value="70"/>	rpm ▾
Eficiencia del motor	<input type="text" value="75"/>	%
Torque del motor	<input type="text" value="3.72972"/>	Kilogramo ▾ Centímetro ▾

*Nota.* Tomado de “*RMF CALCULATOR*”, por Society of Robots, 2014, ([http://www.societyofrobots.com/RMF\\_calculator.shtml](http://www.societyofrobots.com/RMF_calculator.shtml)).

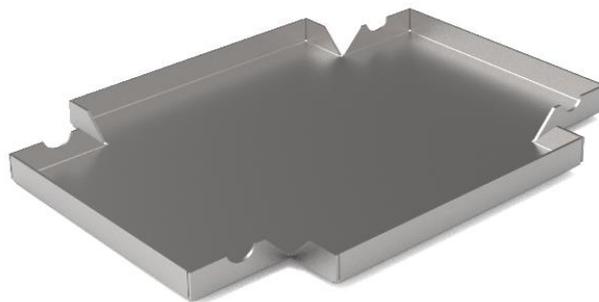
Para el dimensionamiento del brazo robótico se considera el proceso mostrado en la sección de Modelamiento Matemático, cuyos valores de fuerza y torque necesarios para la selección de actuadores se muestran en la Tabla 7.

### ***Implementación***

**Plataforma Omnidireccional.** La plataforma omnidireccional consta de una base de aluminio de 3 [mm] de espesor, cuyas dimensiones se detallan en el Anexo de Planos Mecánicos, se utilizó una de las planchas de aluminio más comerciales, se hizo un análisis de peso y resistencia, para escoger el espesor más óptimo con el fin de evitar deformaciones al momento de montar todo el prototipo; y, se llevaron a cabo dos procesos de manufactura: corte con plasma y doblado de láminas; lo cual, dio como resultado una estructura de soporte como se muestra en la Figura 25.

### **Figura 25**

*Base metálica de la plataforma omnidireccional.*



En cuanto a las ruedas de la plataforma se consideran el uso de ruedas tipo mecanum, como se muestra en la Figura 26, tomando en cuenta las ventajas que estas

presentan en comparación con otras ruedas omnidireccionales, considerando lo descrito en el capítulo 17 del Manual de Robótica (Bruno & Oussama, 2007).

### **Figura 26**

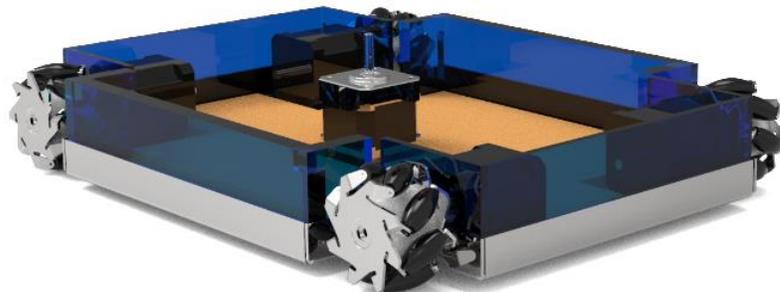
*Rueda omnidireccional tipo mecanum.*



Para la cubierta lateral de la base de aluminio, se utiliza acrílico transparente con espesores y dimensiones que se detallan en el Anexo de Planos Mecánicos y, como parte final de la plataforma omnidireccional se utiliza una plancha de MDF, con el fin de cubrir en la parte superior a la base, obteniendo el primer subsistema del robot como se ilustra en la Figura 27.

### **Figura 27**

*Plataforma omnidireccional: primer subsistema del robot.*



**Brazo Robótico de Configuración PRR.** El proceso de impresión 3D de los componentes del brazo robótico se realizó en una impresora Tevo Tornado (All3DP, 2017), cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 11; el software utilizado, es Simplify 3D (Simplify3D, 2019); y, los parámetros de impresión junto a los tiempos requeridos para cada una de las piezas se presentan en la Tabla 12 y Tabla 14, respectivamente.

**Tabla 11**

*Especificaciones técnicas impresora Tevo Tornado.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tecnología de impresión	Fused Deposition Modeling (FDM)
Diámetro de filamento	1.75 mm
Diámetro de extrusor	0.5 mm
Resolución	0.1 mm
Velocidad máxima de impresión	150 mm/s
Volumen de trabajo	300 x 300 x 400 mm

**Tabla 12**

*Parámetros de impresión 3D.*

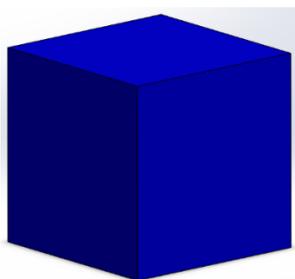
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Material	PLA
Altura de capa	0.25 mm
Grosor de la pared	2 mm
Densidad de relleno	40 %
Velocidad de impresión	75 mm/s

Es importante mencionar que se realizaron ensayos de compresión en una máquina de ensayos universales, utilizando probetas impresas en 3D como se muestra en la Figura 28, para analizar el espesor de la pared y el porcentaje de relleno más

óptimo para la impresión de las partes del prototipo, tomando en cuenta una relación de peso y resistencia. En la Tabla 13 se detallan las pruebas llevadas a cabo, y como resultado se obtiene que los valores más adecuados son: un espesor de 2 [mm] con 40% de relleno.

### Figura 28

*Probeta impresa en 3D.*

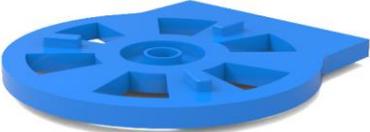
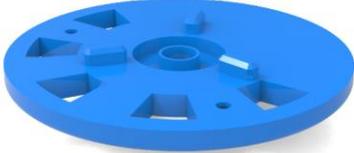


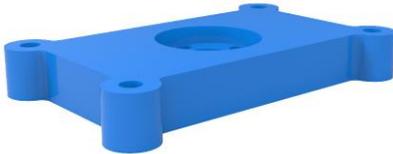
**Tabla 13**

*Ensayos de compresión de probetas impresas en 3D.*

Espesor [mm]	% de relleno	Fuerza máxima [g]	Peso [g]	Peso/Fuerza ( $\times 10^{-3}$ )
2	20	1084	5.53	5.10148
2	30	1174	6.02	5.12777
<b>2</b>	<b>40</b>	<b>1360</b>	<b>6.48</b>	<b>4.76471</b>
3	20	1272	6.77	5.32233
3	30	1436	7.09	4.93733
3	40	1472	7.28	4.94565
4	20	1456	7.58	5.20604
4	30	1564	7.78	4.97442
4	40	1650	8.01	4.85455

**Tabla 14***Tiempos de impresión a detalle.*

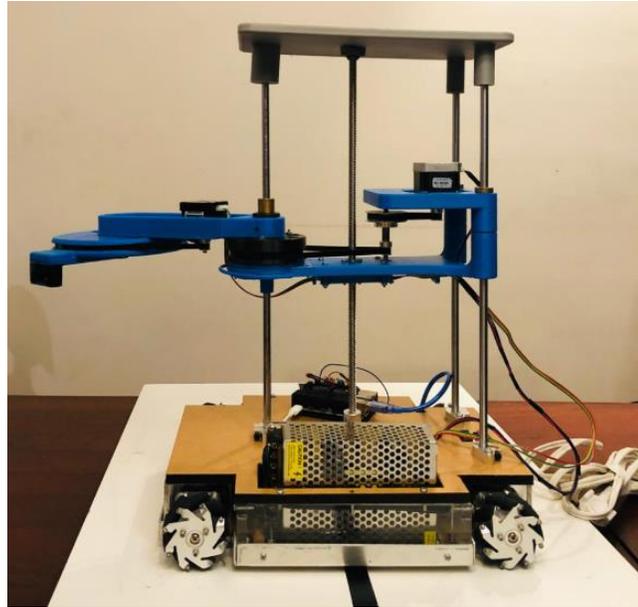
<b>Pieza</b>	<b>Tiempo de impresión</b>	<b>Material depositado</b>	<b>Diseño CAD</b>
Eslabón 2 1/6	8h 50min	185 g	
Eslabón 2 2/6	2h 35 min	70 g	
Eslabón 2 3/6	4h 15 min	90 g	
Eslabón 2 4/6	3h 50min	81 g	
Eslabón 2 5/6	2h 45min	75 g	
Eslabón 2 6/6	6h 05min	125 g	

Pieza	Tiempo de impresión	Material depositado	Diseño CAD
Eslabón 3 1/2	8h 10min	154 g	
Eslabón 3 2/2	2h 05min	60 g	
Soporte Tuerca (eje roscado)	4h 40min	95 g	
Casco	6h 30min	135 g	
<b>Total</b>	<b>49h 45min</b>	<b>1070 g</b>	

El subsistema mecánico implementado se presenta en la Figura 29.

**Figura 29**

*Implementación del subsistema mecánico.*

**Subsistema Electrónico y/o Eléctrico**

El subsistema electrónico y/o eléctrico está compuesto por la etapa de potencia, etapa de control y la etapa correspondiente al accionamiento de actuadores; en esta sección, se determinan los requerimientos para su diseño e implementación.

***Requerimientos***

**Identificación de Necesidades.** Las necesidades del robot que han sido identificadas y deben ser tomadas en cuenta en el diseño del subsistema electrónico y/o eléctrico se muestran en la Tabla 15; estas necesidades, buscan obtener un sistema modular y de bajo costo. Se considera un rango de importancia, tomando en cuenta que 1 corresponde a un grado bajo y 5 un grado alto de importancia.

**Tabla 15**

*Identificación de necesidades del subsistema electrónico y/o eléctrico.*

	<b>Necesidad</b>	<b>Importancia</b>
<b>1</b>	El sistema electrónico tiene un sistema modular	3
<b>2</b>	El robot es fácil de conectar	3
<b>3</b>	Solución de bajo costo	4
<b>4</b>	El intercambio de piezas electrónicas del robot es sencillo	3
<b>5</b>	El robot trabaja por largos períodos de tiempo	3
<b>6</b>	Compatible con plataforma ROS	5

**Lista de Métricas.** Con el fin de cuantificar y evaluar el cumplimiento de cada necesidad identificada en la sección previamente mencionada, se establecen métricas para cada necesidad; las cuales, se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16**

*Lista de métricas del subsistema electrónico y/o eléctrico.*

	<b>Necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Importancia</b>	<b>Unidad</b>
<b>1</b>	1	Número de módulos del sistema electrónico	3	Unidades
<b>2</b>	2, 4	Número de conexiones necesarias para que el robot funcione	3	Unidades
<b>3</b>	3	Costo	4	\$
<b>4</b>	4	Número de piezas electrónicas intercambiables	3	Unidades
<b>5</b>	5	Duración de la fuente de energía	3	h
<b>6</b>	6	Sistema operativo del robot	5	Subjetivo

**Matriz de Necesidades y Métricas.** La matriz de necesidades y métricas establece la relación existente entre los requerimientos del proyecto y su forma de evaluación. Esta matriz, correspondiente al subsistema electrónico y/o eléctrico, se evidencia a continuación en la Tabla 17.

Tabla 17

Matriz de necesidades y métricas del subsistema electrónico y/o eléctrico.

		1	2	3	4	5	6
		Número de módulos del sistema electrónico	Número de conexiones necesarias para que el robot funcione	Costo	Número de piezas electrónicas intercambiables	Duración de la fuente de energía	Sistema operativo del robot
Necesidad	Métrica						
1	El sistema electrónico tiene un sistema modular	•					
2	El robot es fácil de conectar		•				
3	Solución de bajo costo			•			
4	El intercambio de piezas electrónicas del robot es sencillo		•		•		
5	El robot trabaja por largos períodos de tiempo					•	
6	Compatible con plataforma ROS						•

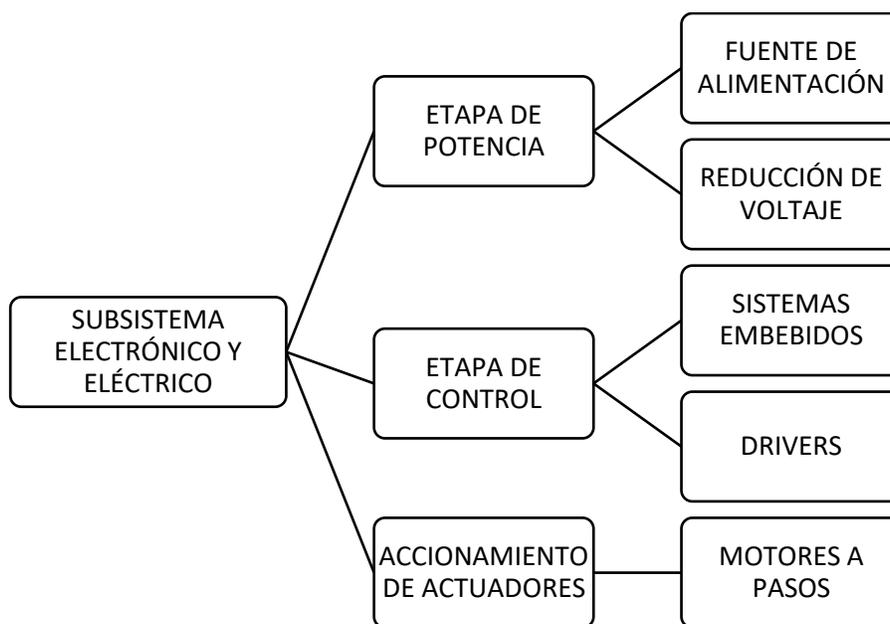
### Diseño Electrónico y/o Eléctrico

El diseño del subsistema electrónico y/o eléctrico comprende las etapas descritas en la Figura 30. Se busca garantizar una correcta alimentación para los componentes de control y potencia, considerando los parámetros de voltaje y corriente requeridos. Los componentes de control, que involucra la tarjeta de procesamiento y

drivers, se implementan tomando en consideración los requerimientos de procesamiento de datos y las características técnicas de cada uno de ellos; con el fin, de garantizar un funcionamiento óptimo y precautelar la vida útil de los dispositivos. Se realizan los acondicionamientos necesarios para garantizar la compatibilidad entre la tarjeta de procesamiento y los actuadores seleccionados, a través de placas de circuitos modulares (shields).

### Figura 30

*Componentes del subsistema electrónico y eléctrico.*



**Selección de Actuadores.** Considerando los cálculos obtenidos en el modelamiento matemático del subsistema mecánico; es posible, escoger un modelo de motor que cumpla con los requerimientos de torque; tanto para, la plataforma omnidireccional como para el brazo robótico; y, de esta forma tener un correcto funcionamiento del sistema general.

Tanto los motores que permiten el movimiento de la plataforma, como los motores que permiten el movimiento del manipulador son motores a pasos; esto, debido a los requerimientos expuestos en la Tabla 18. Los motores utilizados en el prototipo se describen en la Tabla 19.

**Tabla 18**

*Requerimientos de los motores del robot.*

REQUERIMIENTOS	Plataforma omnidireccional	Brazo robótico
Torque de detención	•	•
Control por posición		•
Alcanzar una posición mayor a 360°	•	•

**Tabla 19**

*Motores utilizados en el prototipo.*

	Denominación	Especificaciones Técnicas	Ilustración Gráfica
<b>PLATAFORMA OMNIDIRECCIONAL</b>	ALTN1728D63	Motor bipolar compacto doble eje Dimensiones: 51x51x51 [mm] Ángulo de paso: 1.8 ° Voltaje nominal: 12 [V] Corriente nominal: 1.5 [A] Par de retención: 0.59 [N-m]	

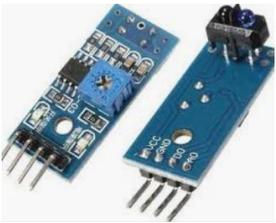
	Denominación	Especificaciones Técnicas	Ilustración Gráfica
<b>BRAZO ROBÓTICO</b>	17HS4401	Dimensiones: 42x42x40 [mm] Ángulo de paso: 1.8 ° Diámetro del eje: 5 [mm] Corriente nominal: 1.7 [A] Número de fases: 2 Par de retención: 0.39 [N-m]	
	KS42STH40-1204A	Operación bipolar de 4 hilos Dimensiones: 42x42x40 [mm] Diámetro del eje del motor: 5 [mm] Ángulo de paso: 1.8 ° Corriente de fase: 1.2 [A] Par de retención: 0.4 [N-m]	
	42BYGH34-0400A	Dimensiones: 42x42x34 [mm] Ángulo de paso: 1.8 ° Voltaje nominal: 12 [V] Corriente nominal: 0.4 [A] Número de fases: 2 Par de retención: 0.28 [N-m]	

**Sistema de Alimentación de Voltaje.** Una vez seleccionados los motores óptimos para el prototipo de robot omnidireccional, se conocen los requerimientos de potencia del sistema. En base a los requerimientos de voltaje y corriente se seleccionan los componentes electrónicos detallados en la Tabla 20, que son aptos para el funcionamiento del robot.

**Tabla 20**

*Lista de componentes electrónicos.*

Componente	Especificaciones Técnicas	Ilustración Gráfica
Fuente de alimentación (transformador)	Voltaje de entrada: 110/220 [V] AC Voltaje de salida: 12 [V] DC Corriente de salida: 10 [A]	

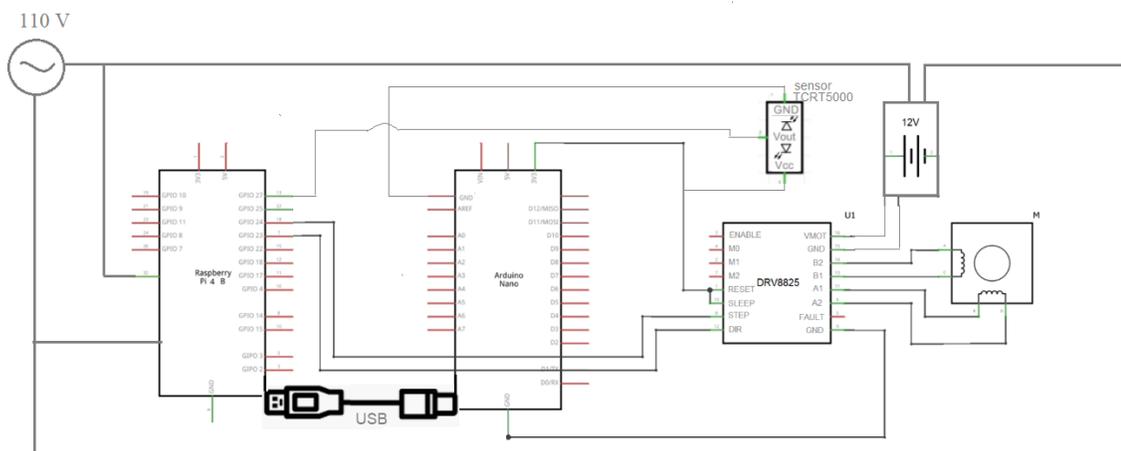
Componente	Especificaciones Técnicas	Ilustración Gráfica
Raspberry Pi 4 Modelo B	Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72 (ARM v8) SoC de 64 bits a 1.5 [GHz] Memoria: LPDDR4 de 4 [GB] 40 pines de propósito general 2 puertos USB 3.0 2 puertos USB 2.0 2 puertos micro HDMI LAN, Bluetooth 5.0, BLE, Gigabit Ethernet Alimentación: 5 [V] a través del conector USB-C (mínimo 3 [A])	
Arduino Nano	Voltaje de operación: 5 [V] Voltaje de entrada: 7-12 [V] Entradas/Salidas digitales: 14 Entradas analógicas: 8 Canales PWM: 6 Consumo de energía: 19 [mA]	
CNC Shield V3	Alimentación: 12–36 [V] DC Jumpers para control de micro-stepping Compatible con Pololu A4988 y DRV8825 2 conexiones para finales de carrera Soporte para 4 ejes (X,Y,Z,A) Control de motores a pasos de hasta 2.5 [A] por bobina Fusible en placa	
DRV8825	Voltaje de operación: 8.2-45 [V] Voltaje lógico: 3.3 [V]-5 [V] DC Corriente de salida: 1.5 [A] por fase (máximo 2.2 [A]) Microstepping: full, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32 Sin protección de polaridad	
Módulo sensor infrarrojo TCRT5000	Alimentación: 3-5 [V] DC Distancia de operación recomendada: 2.5 [mm] Corriente máxima de colector: 100 [mA] Montaje tradicional Through-Hole Detector: fototransistor	

A partir de los componentes detallados anteriormente, se diseña el esquema electrónico para el control de los motores de cada variable articular. En la Figura 31 se

muestra el esquema de conexión para un motor a pasos utilizando el driver DRV8825, el cual se generaliza para todos los motores del robot.

**Figura 31**

*Esquema de conexión electrónico y/o eléctrico simplificado.*



### **Implementación**

Todos los componentes electrónicos mostrados anteriormente, excepto el microcontrolador, son alojados en el interior de la plataforma omnidireccional utilizando una base aislante de modo que se eviten posibles cortocircuitos; así mismo, se toman en cuenta las recomendaciones del fabricante acerca de la fuente de alimentación; por lo que, se mantiene la parte de ventilación totalmente abierta, colocando la fuente en forma vertical de modo que no exista un sobrecalentamiento; en cuanto a los motores y drivers, se pudo evidenciar que no existe ningún tipo de calentamiento al momento de realizar las pruebas de funcionamiento; es por esto, que se garantiza un funcionamiento correcto de todos los componentes electrónicos. La implementación del subsistema electrónico y/o eléctrico se muestra en la Figura 32.

**Figura 32**

*Implementación del subsistema electrónico y eléctrico.*

**Subsistema TIC**

El subsistema TIC está compuesto por la etapa de comunicación, control, interfaz HMI y lo referente a la arquitectura Ros; en esta sección, se determinan los requerimientos para su diseño e implementación.

***Requerimientos***

**Identificación de Necesidades.** Las necesidades del robot que han sido identificadas y deben ser tomadas en cuenta en el diseño del subsistema TIC se muestran en la Tabla 21; estas necesidades, buscan obtener un sistema amigable con el usuario, susceptible a modificaciones en cuanto a la programación, con buena conectividad entre los componentes y que disponga modos de operación similares a los

de un robot industrial. Se considera un rango de importancia, tomando en cuenta que 1 corresponde a un grado bajo y 5 un grado alto de importancia.

**Tabla 21**

*Identificación de necesidades del subsistema TIC.*

	<b>Necesidad</b>	<b>Importancia</b>
<b>1</b>	Interfaz Humano-Máquina amigable con el usuario	4
<b>2</b>	El robot es fácil de programar	2
<b>3</b>	No se pierde la conexión con facilidad	5
<b>4</b>	Modos de operación similares a un robot industrial	3
<b>5</b>	Diseño con fines de aprendizaje	4

**Lista de Métricas.** Las necesidades identificadas anteriormente deben tener una variable con la cual puedan ser evaluadas y cuantificadas; de modo que, se pueda determinar su grado de cumplimiento; por lo que, es importante establecer una métrica para cada necesidad planteada dentro del subsistema TIC; y esto, se puede observar en la Tabla 22.

**Tabla 22**

*Lista de métricas del subsistema TIC.*

	<b>Necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Importancia</b>	<b>Unidad</b>
<b>1</b>	1	Capacidad de manejo del HMI	4	Subjetivo
<b>2</b>	2	Capacidad de interpretar el código de programación	2	Subjetivo
<b>3</b>	3	Capacidad del sistema para mantener una buena conectividad	5	Subjetivo
<b>4</b>	4	Facilidad de operación	4	Subjetivo
<b>5</b>	5	Potencial didáctico	4	Subjetivo

**Matriz de Necesidades y Métricas.** La matriz de necesidades y métricas establece la relación existente entre los requerimientos del proyecto y su forma de evaluación. Esta matriz correspondiente al subsistema TIC se evidencia a continuación en la Tabla 23.

**Tabla 23**

*Matriz de necesidades y métricas del subsistema TIC.*

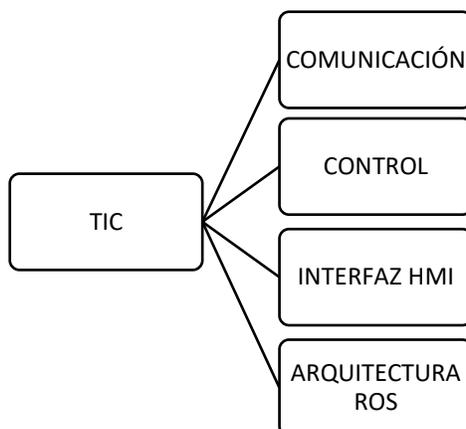
		1	2	3	4	5
<b>Métrica</b>						
		Capacidad de manejo del HMI				
		Capacidad de interpretar el código de programación				
		Capacidad del sistema para mantener una buena conectividad				
		Facilidad de operación				
		Potencial didáctico				
<b>Necesidad</b>						
1	Interfaz Humano-Máquina amigable con el usuario	●				
2	El robot es fácil de programar		●			
3	No se pierde la conexión con facilidad			●		
4	Modos de operación similares a un robot industrial				●	
5	Diseño con fines de aprendizaje					●

## Diseño TIC

El diseño del subsistema TIC comprende las etapas descritas en la Figura 33. Se busca garantizar un correcto sistema de comunicación entre los dispositivos, un sistema de control general capaz de satisfacer las necesidades planteadas, una Interfaz Humano-Máquina (HMI) que permita a cualquier usuario manipular el prototipo de robot y, una arquitectura modular que esté sujeta a modificaciones en caso de ser necesario.

**Figura 33**

*Componentes del subsistema TIC.*

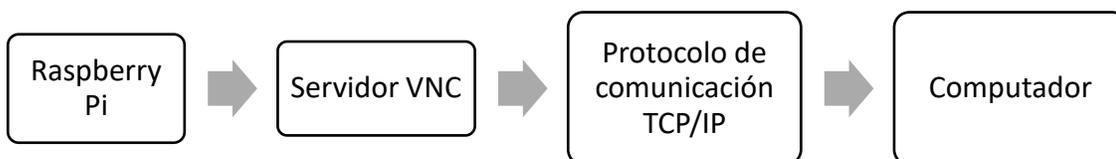


**Comunicación.** Como es de conocimiento general, la tarjeta Raspberry Pi 4 utiliza periféricos externos para su funcionamiento; por lo que, en el proyecto se ha considerado utilizar un servidor VNC para la visualización y control de los procesos ejecutados en la tarjeta de una manera remota desde un computador, con el objetivo de simplificar el número de periféricos requeridos para la programación y manipulación de la plataforma robótica. Los softwares utilizados son VNC Viewer y VNC Server, como visualizador y servidor, respectivamente (Real Vnc, 2018). En la Figura 34 se detalla el

proceso ejecutado para la comunicación entre la tarjeta de procesamiento y el computador.

### Figura 34

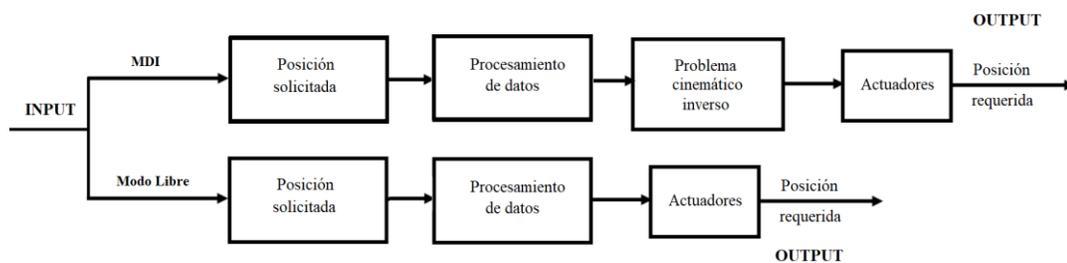
*Comunicación Raspberry Pi-Computador.*



**Control.** El prototipo de robot desarrollado cuenta con un sistema de control en lazo abierto. En la Figura 35, se presenta el sistema de control del robot; en donde, se selecciona el modo de operación del mismo, seguido de esto se ingresa la posición que se requiere que el robot alcance, se ejecuta el procesamiento de datos, se resuelve el problema cinemático inverso para el caso del modo MDI, se envía la información requerida para el movimiento de los actuadores y para finalizar se obtiene la posición requerida.

### Figura 35

*Sistema de control del robot.*



**Interfaz HMI.** La interfaz HMI se compone de una pantalla principal y dos ventanas secundarias. La pantalla principal se muestra en la Figura 36 y brinda la posibilidad de seleccionar entre los dos modos de operación existentes: Modo Libre y MDI (Manual Data Input); los cuales, son detallados a continuación.

**Figura 36**

*Interfaz HMI: Pantalla principal.*



La pantalla secundaria “Modo Libre” se ilustra en la Figura 37 y es aquella que permite posicionar tanto a la plataforma omnidireccional como al brazo robótico; es decir, permite mover al robot hacia adelante, atrás, derecha e izquierda, por medio del movimiento de la plataforma, a una velocidad controlada en un rango de 0 a 100 [mm/s]; y en cuanto al brazo, permite posicionar las 3 articulaciones independientemente; es decir, permite un movimiento vertical (Eje Z) de todo el manipulador robótico, y el movimiento rotacional de los eslabones del robot; cabe recalcar que, el movimiento se lo realiza en proporciones establecidas por el usuario dentro de su espacio articular.

**Figura 37**

*Interfaz HMI: Pantalla secundaria-Modo Libre.*



La pantalla secundaria “MDI (Manual Data Input, por sus siglas en inglés)” se muestra en la Figura 38 y es aquella que permite el ingreso de código G de forma paulatina; es decir, línea tras línea, de modo que el robot realice el movimiento solicitado y esté a la espera del siguiente comando; analizando, si se encuentra en la capacidad de ejecutar el movimiento, únicamente con el brazo robótico o requiere del movimiento de la plataforma para llegar a las coordenadas solicitadas.

**Figura 38**

*Interfaz HMI: Pantalla secundaria-MDI.*

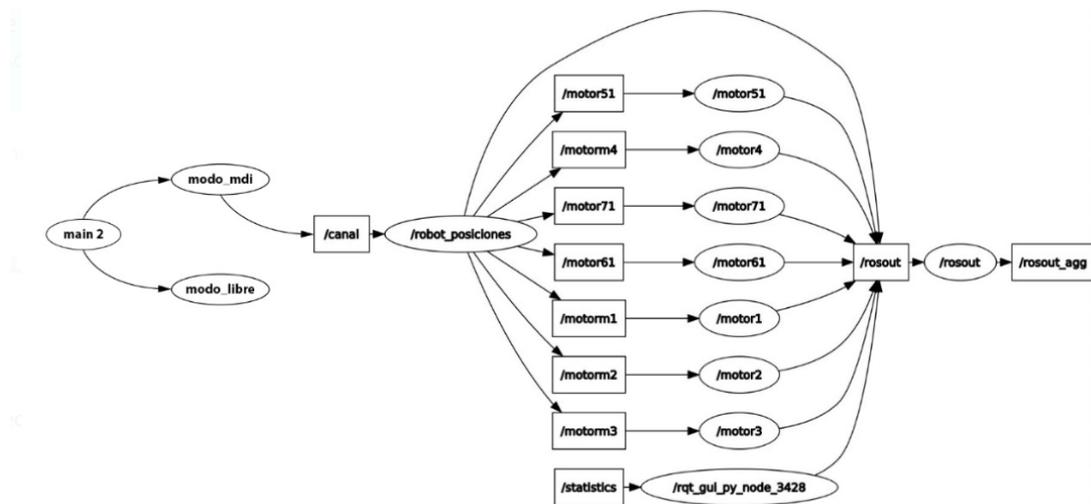


**Arquitectura ROS.** La arquitectura utilizada en el proyecto se fundamenta en una programación jerárquica modular basada en software libre; y, se desarrolla sobre la plataforma de ROS Melodic en el Sistema Operativo Ubuntu Mate 18.04 (Bionic). Esta arquitectura se utiliza debido a que el Sistema Operativo Robótico (ROS) es un conjunto de herramientas, bibliotecas y convenciones que tienen como objetivo simplificar la tarea al momento de crear un sistema robusto complejo dentro de una plataforma robótica (ROS, 2019).

A continuación se muestra el diagrama de nodos necesario para cada uno de los modos de operación del robot. Es importante mencionar que cuando cada uno de los nodos se encuentra en ejecución, envían y reciben información específica a través de canales de comunicación designados para tal efecto. En la Figura 39 se representa la interacción de todos los nodos que componen el prototipo de robot omnidireccional con sus respectivos canales de comunicación.

Figura 39

Diagrama de nodos general del robot.



## **Capítulo IV**

### **Pruebas y Resultados**

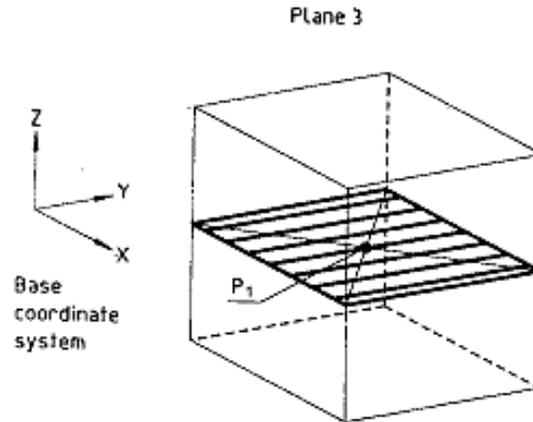
#### **Evaluación de Rendimiento del Robot**

Con el objetivo de evaluar el rendimiento del robot, se utiliza la Norma ISO 9283:1998 “Criterios de rendimiento y métodos de prueba relacionados a robots industriales manipuladores”; la cual, define diferentes tipos de pruebas destinadas principalmente para desarrollar y verificar especificaciones de robots de manera individual. Para el prototipo de robot desarrollado se realizan pruebas de exactitud y repetibilidad de posición (International Organization for Standardization, 1998).

La Norma ISO 9283:1998 expresa que se debe determinar un plano de trabajo en el cuál el robot va a ser puesto a prueba; debido a la configuración del robot, se utiliza el plano XY para evaluarlo, como se observa en la Figura 40; el eje Z, es evaluado de acuerdo a conceptos generales de exactitud y repetibilidad, ya que el robot no puede orientarse hacia el plano ZY.

## Figura 40

*Plano de trabajo.*



*Nota.* Tomado de “*Manipulating Industrial Robots - Performance criteria and related test methods*”, por International Organization for Standardization, 1998.

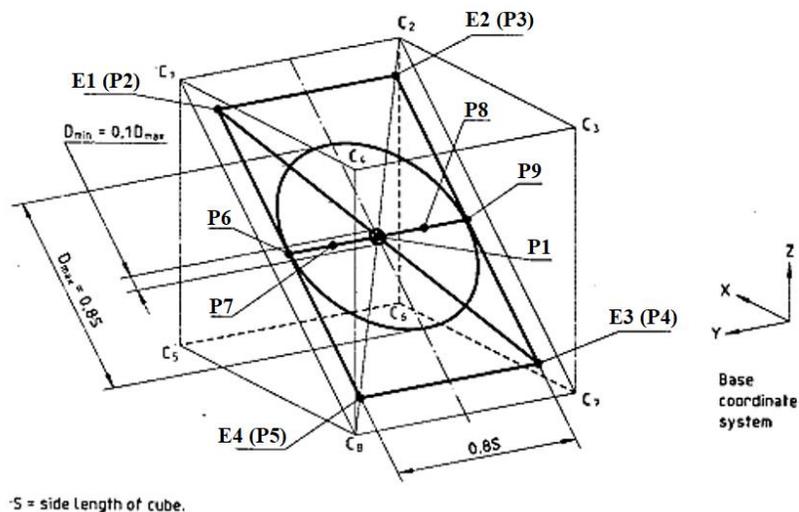
### ***Pruebas de Exactitud de Posición***

Las pruebas de exactitud de posición se dividen en dos partes, exactitud de posición en el plano XY y exactitud de posición en el eje Z.

**Prueba de Exactitud de Posición en el Plano XY.** La exactitud de posición se define como la diferencia entre una posición enviada por comando y el baricentro de la posición alcanzada (International Organization for Standardization, 1998). Para la prueba se realizan movimientos desde P1, P2, P3, P4, P5, P1 como se identifica en la Figura 41, se debe cumplir esta trayectoria y evaluar el último punto de ésta, es decir P1.

Figura 41

Trayectoria de prueba.



Nota. Tomado de "Manipulating Industrial Robots - Performance criteria and related test methods", por International Organization for Standardization, 1998.

Para cuantificar la exactitud de posición del robot, la norma expresa las fórmulas detalladas a continuación (Ecuaciones (48)-(51)) y, para una mejor comprensión se muestra la Figura 42.

$$AP_P = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (48)$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c) \quad (49)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c) \quad (50)$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad (51)$$

Donde:



Donde:

$Z_c$ : es la posición enviada por comando

$Z_i$ : es la posición alcanzada por el robot

n: número de posiciones alcanzadas por el robot

### **Pruebas de Repetibilidad de Posición**

Las pruebas de repetibilidad de posición se dividen en dos partes, repetibilidad de posición en el plano XY y repetibilidad de posición en el eje Z.

**Prueba de Repetibilidad de Posición en el Plano XY.** La repetibilidad representa el grado de coincidencia entre la posición obtenida después de n repeticiones hacia la misma posición de comando en la misma dirección (International Organization for Standardization, 1998).

La repetibilidad de posición  $RP_l$  representa el radio de la esfera, cuyo centro es el baricentro con coordenadas  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ ; a continuación, se muestran una serie de fórmulas propuestas por la Norma ISO 9283:1998, con el fin de evaluar la repetibilidad de posición.

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l \quad (56)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (57)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (58)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n - 1}} \quad (59)$$

**Prueba de Repetibilidad en el Eje Z.** La repetibilidad expresa, en términos generales, la capacidad de reproducción de las posiciones; para el caso del eje Z del robot, se envían varias posiciones por comando y se mide la posición alcanzada; para calcular la repetibilidad, se hace uso de la siguiente fórmula expresada en la Ecuación (60) (Solé, 2011).

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_c)^2}{n}} \quad (60)$$

Donde:

$Z_c$ : es la posición enviada por comando para desplazamiento en el eje Z

$Z_i$ : es la posición alcanzada por el robot

n: número de posiciones enviadas por comando

## Resultados

Como se mencionó en la Sección de Evaluación de Rendimiento del Robot, se realizaron dos tipos de pruebas; la primera, para evaluar la exactitud y repetibilidad del robot en el plano XY, cuyos datos tomados se muestran en la Tabla 24; y, la segunda prueba se refiere a evaluar la exactitud y repetibilidad del desplazamiento del robot a lo largo del eje Z, como se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 24**

*Datos tomados de posición en la prueba de exactitud y repetibilidad (plano XY).*

<b>No.</b>	<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>Z [mm]</b>
1	308,72	1,58	25,60
2	308,72	2,94	25,60
3	309,50	4,10	25,60
4	310,42	3,92	25,60
5	309,72	2,00	25,60
6	309,66	3,26	25,60
7	309,72	2,86	25,60
8	309,72	2,80	25,60
9	312,36	2,70	25,60
10	308,88	4,52	25,60
11	309,62	0,46	25,60
12	312,16	4,22	25,60
13	312,90	5,62	25,60
14	312,52	5,52	25,60
15	312,48	4,98	25,60
16	309,94	5,76	25,60
17	309,96	5,60	25,60
18	309,82	6,28	25,60
19	310,20	5,20	25,60
20	310,04	5,20	25,60
21	312,60	4,82	25,60
22	311,44	1,32	25,60
23	312,40	4,14	25,60
24	311,08	3,58	25,60
25	311,24	1,82	25,60
26	311,72	4,30	25,60
27	310,58	1,72	25,60
28	312,06	4,22	25,60
29	311,90	3,76	25,60
30	312,06	3,40	25,60

**Tabla 25**

*Datos tomados de posición en la prueba de exactitud y repetibilidad (eje Z).*

No.	Zc [mm]	Zi [mm]	No.	Zc [mm]	Zi [mm]
1	15	15,14	16	105	106,40
2	21	20,84	17	99	99,14
3	27	26,84	18	93	93,18
4	33	32,16	19	87	87,14
5	39	38,20	20	81	81,54
6	45	43,74	21	75	75,42
7	51	51,20	22	69	69,12
8	57	56,76	23	63	62,72
9	63	62,32	24	57	57,02
10	69	69,78	25	51	50,50
11	75	75,66	26	45	44,98
12	81	81,00	27	39	39,46
13	87	87,16	28	33	33,88
14	93	93,70	29	27	28,00
15	99	101,14	30	21	20,76

Aplicando las fórmulas descritas anteriormente se obtienen los siguientes resultados del desempeño del robot concerniente a temas de exactitud y repetibilidad; los cuales, se muestran en las siguientes tablas de resultados. Como se observa en la Tabla 26, la exactitud en el eje Z es cero debido a que en esta prueba no se modificó la altura de la posición solicitada por comando.

**Tabla 26**

*Resultados de exactitud de posición sobre el plano XY.*

Variable	Valor
<b>Apx</b>	0,804 [mm]
<b>Apy</b>	3,657 [mm]
<b>Apz</b>	0,000 [mm]
<b>App</b>	<b>3,744 [mm]</b>

**Tabla 27**

*Resultados de repetibilidad de posición sobre el plano XY.*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
<b>RPL</b>	$\pm 3,333$ [mm]

**Tabla 28**

*Resultados de exactitud y repetibilidad del desplazamiento a lo largo del eje Z.*

<b>Repetibilidad</b>	<b>Exactitud</b>
0,486 [mm]	0,163 [mm]

### **Análisis Financiero**

La Tabla 29, que se muestra a continuación, contiene el análisis financiero de lo que involucra el costo de fabricación del prototipo robótico; cabe recalcar, que ciertos valores considerados varían de acuerdo al entorno en el que se pueda replicar el proyecto, como es el caso del tiempo de impresión 3D del brazo robótico y la mano de obra para los diversos procesos de manufactura.

**Tabla 29**

*Análisis financiero.*

<b>ELEMENTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
Estructura metálica de soporte	1	30,00	30,00
Base de acrílico	1	40,00	40,00
Ruedas mecanum	4	30,00	120,00
Motor NEMA 17 Doble Eje	4	22,95	91,80
Impresión Brazo Robótico	1	90,00	90,00
Motor NEMA 17 - KS42STH40	1	20,00	20,00
Motor NEMA 17 - 17HS4401	1	25,00	25,00
Motor NEMA 17 - 42BYGH34	1	15,75	15,75
Tornillo sinfín 400mm	1	22,00	22,00
Eje 8mm x 400mm	3	7,00	21,00

<b>ELEMENTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
Polea de aluminio 16 dientes	3	3,50	10,50
Polea de aluminio 60 dientes	1	10,00	10,00
Banda dentada [m]	3	3,50	10,50
Rodamiento rígido de bolas	3	4,50	13,50
Imán de neodimio	2	4,10	8,20
Elementos de sujeción	-	-	20,00
Raspberry Pi 4 Modelo B	1	110,00	110,00
Case Raspberry Pi 4	1	18,00	18,00
Fuente de alimentación	1	25,00	25,00
CNC Shield V3	2	8,00	16,00
Driver DRV8825	4	5,00	20,00
Módulo sensor infrarrojo TCRT5000	3	2,00	6,00
Arduino nano	1	8,00	8,00
Componentes electrónicos varios	-	-	10,00
<b>TOTAL</b>			<b>761,25</b>

## Capítulo V

### Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro

#### Conclusiones

- Se determinó la cinemática del brazo robótico mediante los parámetros de Denavit-Hartenberg; y, la dinámica del mismo mediante el método general planteado por (Niku, 2011); así también, se realizó un proceso iterativo para establecer el torque necesario para el movimiento de cada articulación.
- El valor de aceleración en el cálculo de la dinámica del brazo robótico, de configuración PRR, tiene una gran influencia en el valor del torque del motor necesario para mover cada articulación.
- Los motores a pasos trabajan en un rango de frecuencias, dependiendo de su voltaje de alimentación; la frecuencia aplicada al motor, es directamente proporcional a la velocidad del mismo. Los motores seleccionados no alcanzan la velocidad deseada para las articulaciones rotacionales del robot; por lo que, fue necesario realizar un sistema de reducción de velocidad mediante el uso de poleas.
- Debido a las exigencias de consumo de corriente, se utilizó como fuente de alimentación la toma de 110 voltios; para que, dentro de la plataforma se rectifique el voltaje a distribuirse dependiendo de los requerimientos de cada elemento.
- Se programó el seguimiento de trayectoria en línea recta del brazo robótico, mediante la determinación de la ecuación de la recta entre dos puntos y la división de la longitud de la línea en varios segmentos.

- La programación mediante nodos permite el intercambio de información entre los mismos con la finalidad de realizar más de una acción simultáneamente; ya que, el seguimiento de trayectoria, exige que los motores de las articulaciones rotacionales del brazo deben accionarse al mismo tiempo.
- La sincronización del brazo robótico con la plataforma omnidireccional está orientada a la ampliación del espacio de trabajo en el eje Y; por lo que, el robot al recibir una orden de movimiento mayor a su espacio de trabajo, utiliza la plataforma para cambiar su sistema de referencia y poder cumplir con la orden.

### **Recomendaciones**

- Tener en consideración que las dimensiones del actuador final que se acople al extremo del robot, afectan de manera directa al cálculo de la cinemática de éste; por lo que, se debe adicionar el valor de estas dimensiones en las variables de cálculo.
- Considerar el uso de ABS en lugar de PLA como material de los componentes mecánicos, con el fin de incrementar la vida útil de los mismos.
- Se recomienda establecer una zona definida para el trabajo del robot; en la cual, se puedan incorporar sensores que permitan un mejor control del desplazamiento de la plataforma omnidireccional.
- Definir un correcto volumen de trabajo del robot; ya que, de esto dependerá que la sincronización entre el brazo robótico y la plataforma omnidireccional funcione de manera adecuada; para que, cuando el brazo no alcance una posición solicitada, sea soportado por el movimiento de la plataforma y permita cumplir a cabalidad las órdenes recibidas.

- Se recomienda implementar un sistema de lazo cerrado en el control de los actuadores del brazo robótico, a fin de poder guardar las posiciones finales de cada articulación; y, de esta forma al momento de encender el robot no tener inconvenientes con su posición actual.

### **Trabajo Futuro**

El prototipo de robot desarrollado tiene el potencial para ser aplicado en diversos campos; así como también, se propone enfocar el interés en incrementar ciertas funcionalidades del mismo, tales como:

- Adaptación del prototipo robótico a un software comercial para impresión 3D.
- Estimación de la posición del robot por medio de odometría, en lugar de seguimiento de línea.
- Implementación del prototipo a una plataforma de robótica colaborativa.

## Bibliografía

- Aguirre, B., & Moyano, C. (2019). *Diseño e implementación de un sistema multirobot descentralizado para realizar trabajo colaborativo con aplicaciones logísticas, flexibles y escalables*. Sangolquí.
- All3DP. (2017). Obtenido de <https://all3dp.com/es/1/tevo-tornado-impresora-3d-analysis/>
- Amilibia, D. (2016). *Ingeniería inversa en formación profesional. Escaneado 3D, prototipado rápido, programación CAM y fabricación de pieza mecánica*. Universidad Pública de Navarra.
- Barrientos, A., & Peñín, L. (2007). *Fundamentos de Robótica*. Madrid: McGraw Hill.
- Bekas, D. G., Hou, Y., Liu, Y., & Panesar, A. (2019). 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 179.
- Bernal, D., & Yépez, J. (2014). *Diseño y fabricación de un prototipo de plataforma móvil omnidireccional para la empresa SIMYM - Servicios Industriales Mecánicos y Mecatrónicos*. Sangolquí.
- Bonilla, J., & Dávalos, S. (2006). *Prototipo de impresora para modelos 3D en cera*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Bruno, S., & Oussama, K. (2007). *Handbook of Robotics*. Stanford: Springer.
- Campillo, M. (2017). *Prefabricación en la arquitectura: Impresión 3D en hormigón*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Dizon, J. R., & Espera, A. H. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20(5), 44-67.
- García, J. (2006). *Tecnología avanzada del diseño y manufactura asistidos por computador - CAD/CAM*. Colombia: Universidad Autónoma del Caribe.

- Gausemeier, J., & Moehring, S. (2002). *VDI 2206 - A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems*. IFAC Proceedings Volumes.
- Gómez, S. (2016). *Impresión 3D (Teoría y Aplicaciones)*. Marcombo.
- González, D., & Verdugo, A. (2018). *Diseño e implementación de una arquitectura IoT para robótica colaborativa*. Sangolquí.
- Heredia, P. (2018). *Impresora 3D por estereolitografía para el laboratorio de simulación y centro de mecanizado CNC de la Universidad Técnica del Norte*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- International Organization for Standardization. (1998). *Manipulating Industrial Robots - Performance criteria and related test methods*.
- ISO. (2007). *International Vocabulary of Metrology*. Geneva.
- Jorquera, A. (2016). *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- Lazea, G., & Lupu, E. (2001). *Aspects on path planning for mobile robots*. Technical University of Cluj-Napoca Automation Department.
- Lipson, H. (2012). *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Wiley.
- Low, Z.-X., Chua, Y. T., Ray, B. M., Mattia, D., Metcalfe, I. S., & Petterson, D. A. (2017). Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of Membrane Science*, 523, 596-613.
- Maldonado, G. (2012). *Diseño, construcción y programación de una máquina de control numérico aplicada al prototipado rápido de modelado por deposición fundida de material para el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Internacional del Ecuador*. Quito: Universidad Internacional del Ecuador.
- Marques, L., Williams, R., & Zhou, W. (2017). A mobile 3D printer for Cooperative 3D Printing. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 16.

- Martinez, S. (2009). *Diseño Mecánico de un Robot Omnidireccional*.
- Metalmecánica Internacional. (Junio de 2015). *Manufactura aditiva*. Obtenido de <http://www.metalmeccanica.com/temas/Manufactura-aditiva,-una-tecnologia-revolucionaria-para-la-fabricacion-de-herramientas+105380>
- Niku, S. (2011). *Introduction to Robotics. Analysis, Control, Applications*. California: Wiley.
- Ollero, A. (2001). *Robótica. Manipuladores y robots móviles*. Barcelona: Marcombo.
- Palacios, M., & Velastegui, L. (2018). *Mortero de cemento-arcillas para impresoras 3D*. Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana.
- Real Vnc. (2018). Obtenido de <https://www.realvnc.com/es/connect/download/viewer/>
- Reza, J. (2010). *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control*. New York: Springer.
- ROS. (2019). Obtenido de <https://www.ros.org/about-ros/>
- Ruiz, G. (2017). *Implementación de un sistema multicabezal a una impresora 3D*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Sereni, J. (2016). Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. *10*(10), 69-91.
- Simplify3D. (2019). Obtenido de <https://www.simplify3d.com/>
- Society of Robots. (s.f.). Obtenido de [http://www.societyofrobots.com/mechanics\\_dynamics.shtml](http://www.societyofrobots.com/mechanics_dynamics.shtml)
- Society of Robots. (2013). *Robot Conference List*. Obtenido de [http://www.societyofrobots.com/robot\\_conference.shtml](http://www.societyofrobots.com/robot_conference.shtml)
- Society of Robots. (2014). *RMF CALCULATOR*. Obtenido de [http://www.societyofrobots.com/RMF\\_calculator.shtml](http://www.societyofrobots.com/RMF_calculator.shtml)
- Solé, A. C. (2011). *INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL*. Barcelona: Alfaomega.

Sun, C. (2005). Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic.

*Sensors and Actuators A*, 121(1), 113-120.

Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. Pennsylvania:

McGraw Hill.

Vélez, M. (2017). KOALA 3D: Impresora 3D capaz de fabricar objetos de altura mayor

que su propia altura. *Universidad de Chile*, 106.

## **Anexos**

### **Planos Mecánicos**