



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA
ROBÓTICA DE TRES DEDOS PARA AMBIENTES Y APLICACIONES
INDUSTRIALES, MEDIANTE MECANISMOS SUB-ACTUADOS
APLICANDO TÉCNICAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA
PARA EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16 DEL LABORATORIO DE
ROBÓTICA INDUSTRIAL EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.**

AUTORES: CRIOLLO SÁNCHEZ, ANDRÉS ISMAEL

REYES MOROCHO, JHOSELYN GIANELLA

DIRECTOR: ING. SINGAÑA AMAGUAÑA, MARCO ADOLFO

LATACUNGA

2019



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA ROBÓTICA DE TRES DEDOS PARA AMBIENTES Y APLICACIONES INDUSTRIALES, MEDIANTE MECANISMOS SUB-ACTUADOS APLICANDO TÉCNICAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA PARA EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16 DEL LABORATORIO DE ROBÓTICA INDUSTRIAL EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA”*** realizado por los señores **Criollo Sánchez, Andrés Ismael** y **Reyes Morocho, Jhoselyn Gianella** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 11 de julio del 2019

Atentamente,

Ing. Marco Singaña Msc.
C.C.: 0501627889



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Criollo Sánchez, Andrés Ismael** y **Reyes Morocho, Jhoselyn Gianella**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA ROBÓTICA DE TRES DEDOS PARA AMBIENTES Y APLICACIONES INDUSTRIALES, MEDIANTE MECANISMOS SUB-ACTUADOS APLICANDO TÉCNICAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA PARA EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16 DEL LABORATORIO DE ROBÓTICA INDUSTRIAL EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA”*** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 22 de julio del 2019

Criollo Sánchez, Andrés Ismael

C.C.: 1718580481

Reyes Morocho, Jhoselyn Gianella

C.C.: 1724996465



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Criollo Sánchez, Andrés Ismael** y **Reyes Morocho, Jhoselyn Gianella**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA ROBÓTICA DE TRES DEDOS PARA AMBIENTES Y APLICACIONES INDUSTRIALES, MEDIANTE MECANISMOS SUB-ACTUADOS APLICANDO TÉCNICAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA PARA EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16 DEL LABORATORIO DE ROBÓTICA INDUSTRIAL EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 22 de julio del 2019

Criollo Sánchez, Andrés Ismael

C.C.: 1718580481

Reyes Morocho, Jhoselyn Gianella

C.C.: 1724996465

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres Carlos y María de Lourdes, quienes con su gran amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, por ser el pilar fundamental de mi vida, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer a las adversidades, son y serán siempre los mejores padres del mundo.

A mis hermanos Carlos, Berenice y Andrea, por estar siempre a mi lado cuando los necesitaba, disfrutando conmigo cada triunfo y lamentando cada derrota; cada una de sus palabras de aliento fueron de apoyo moral para este logro.

Andrés Criollo

Mamita y hermanita, en los primeros momentos de mi etapa universitaria, se me presentaron momentos en los que muchas veces parecía que la única solución era tirar la toalla, y durante el desarrollo de la carrera hubo ciertos momentos en los que todos los apoyos y fuentes de información que tenía a mi mano parecían no ser suficientes. Pero, en esos precisos instantes, tuve la dicha de contar con su apoyo, ustedes me brindaron los consejos y ánimos necesarios para no perder la motivación y llegar a cumplir mi meta. Por eso y más este trabajo que me permite obtener el título de Ingeniera Mecatrónica va dedicado a ustedes.

A mi mamita, quien demuestra día tras día el inmenso amor y confianza que tiene por sus hijas, por siempre encontrar la fortaleza para salir adelante sin importar los obstáculos que se vengan; gracias a Diosito por la madre que me dio no hay palabras en este mundo para agradecerle mamita, esto es por usted y para usted.

A la mejor hermana que la vida me pudo dar, has estado para mí incondicionalmente brindándome tu compañía y amor, a pesar de que el tiempo sigue su paso tu estas cerca de mí ofreciendo todo lo que te sea posible, incluso más que eso.

A mi sobrino, que con sus grandes manifestaciones de amor se convirtió en una importante motivación para este logro, así como ahora tu me acompañas yo tendré la dicha de estar contigo en cada una de tus metas.

Jhoselyn Reyes

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, damos gracias a Dios por permitirnos tener tan buena experiencia dentro de la universidad, por brindarnos la fortaleza y sabiduría necesaria para culminar un peldaño más de nuestras metas.

No hay palabras para expresar el infinito agradecimiento que sentimos con nuestros familiares, por ser el pilar fundamental de nuestras vidas y habernos apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se les pudiese presentar.

Un sincero agradecimiento al director de nuestra tesis Ing. Marco Singaña quien con su experiencia, conocimiento y motivación nos orientó durante todo este tiempo, ganándose nuestra admiración.

En general a todos nuestros profesores a quienes les debemos gran parte de los conocimientos adquiridos, gracias por su enseñanza y consejos. Y de manera especial a los inges de la carrera de Mecatrónica, gracias por fomentar el amor y respeto por el verde amárela.

Es necesario mencionar a nuestros amigos son muchos por eso no los nombramos, pero ustedes saben lo importante que fueron en esta hermosa etapa de provincianos, muchísimas gracias por todo lo vivido hemos demostrado que sembramos una buena y sincera amistad y muy probablemente el tiempo nos permitirá disfrutar de una agradable cosecha.

Es imposible mencionar a todas las personas que fueron participes de nuestro proceso en la universidad, pero de manera individual los tenemos presentes gracias a todos.

Jhoselyn y Andrés

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	
CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación e importancia	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Robótica industrial	7
--------------------------------	---

2.2.	Elementos constitutivos de un robot industrial	7
2.2.1.	Manipulador.....	8
2.2.2.	Actuadores.	9
2.2.3.	Controlador.....	9
2.2.4.	Efactor final	10
2.2.5.	Sensores.....	10
2.3.	Tipos de termoplásticos para impresión en 3D	10
2.3.1.	Ácido Poliláctico (PLA)	11
2.3.2.	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	12
2.3.3.	Tereftalato de polietileno	13
2.3.4.	Fibras de carbono.....	14
2.4.	Diferentes tipos de sensores de presión.....	15
2.4.1.	Sensores de fuerza resistivos (FSR)	15
2.4.2.	Sensores capacitivos.....	16
2.4.3.	Galga extensiométrica.....	17
2.4.4.	Sensor de flexión.....	18
2.4.5.	Sensor óptico	19
2.4.6.	Sensor mioeléctrico	20
2.5.	Herramientas robóticas y sus diferentes tipos	21
2.5.1.	Herramientas robóticas para traslado, colocación y control	21
2.6.	Estrategias innovadoras de control de movimiento de herramientas robóticas	26
2.6.1.	Elastómeros dieléctricos.....	26
2.6.2.	Soft Robot.	27
2.6.3.	Aleaciones con memoria de forma.....	28
2.7.	Prototipos de manos robóticas	29
2.7.1.	Mano DLR.	29

2.7.2.	Mano Marcus.....	30
2.7.3.	Schunk SVH.....	30
2.7.4.	Pinza de area FXCB.....	31

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LA HERRAMIENTA ROBÓTICA

3.1.	Parámetros de diseño mecánico	32
3.1.1.	Tipos de agarre	32
3.1.2.	Mecanismo de 4 barras	34
3.1.3.	Mecanismo doble manivela de Grashof.....	35
3.1.4.	Mecanismo sub-actuado.....	36
3.1.5.	Adaptación de la herramienta con el robot Kuka KR16.....	37
3.1.6.	Fabricación de la herramienta robótica mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM).....	37
3.2.	Diseño mecánico de la herramienta.....	39
3.2.1.	Cálculos para agarre tradicional	40
3.2.2.	Cálculos del mecanismo Sub-actuado.....	54
3.3.	Análisis y validación de diseño	58
3.3.1.	Cálculo de la fuerza	58
3.3.2.	Esfuerzo de Von Mises ejercido en el dedo	59
3.3.3.	Factor de seguridad del dedo	60
3.3.4.	Análisis de Von Mises para el acople	60
3.3.5.	Factor de seguridad del acople de la herramienta	61
3.3.6.	Deformación de los ejes de transmisión de movimiento	62
3.3.7.	Análisis de Von Mises del acople del dedo	62
3.4.	Selección de materiales para la estructura	63

3.5.	Estudio de la resistencia a la compresión del ABS	65
3.5.1.	Ensayo de compresión	66
3.5.2.	Materiales usados para el ensayo mecánico de compresión	67
3.5.3.	Características de fabricación de las probetas.....	68
3.5.4.	Resultados.	69
3.5.5.	Conclusión del ensayo mecánico de compresión	73

CÁPITULO IV

DISEÑO ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

4.1.	Parámetros de diseño electrónico.....	74
4.1.1.	Actuadores	74
4.1.2.	Tarjeta de control.....	75
4.1.3.	Control de agarre de la herramienta	75
4.1.4.	Alimentación.....	75
4.1.5.	Comunicación Kuka KR16 con herramienta robótica.....	75
4.2.	Selección de los elementos electrónicos	75
4.2.1.	Motor.....	77
4.2.2.	Tarjeta de control.....	80
4.3.	Diseño electrónico del sistema de control.....	82
4.3.1.	Etapa de entrada	83
4.3.2.	Etapa de proceso o control	85
4.3.3.	Diagrama electrónico de parte interna de la herramienta.....	86
4.3.4.	Etapa de salida.....	88

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1.	Fabricación de la herramienta	89
5.2.	Ensamble de piezas mecánicas	92
5.3.	Ensamble de los circuitos electrónicos y de control hacia la herramienta	99
5.3.1.	Flujograma..	102
5.3.2.	Código.....	104
5.3.3.	Grado de protección (IP)	104
5.4.	Evaluación experimental del movimiento mecánico y del funcionamiento de la herramienta robótica.....	105
5.5.	Pruebas en ambientes y aplicaciones industriales de la herramienta robótica	109
5.6.	Validación de la hipótesis	115
5.7.	Características técnicas de la herramienta robótica.....	118
5.8.	Análisis económico del proyecto.....	120

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.	Conclusiones.....	122
6.2.	Recomendaciones.....	124

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
--	------------

ANEXOS.....	134
--------------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Características de la estructura de la herramienta robótica</i>	38
Tabla 2. <i>Datos del mecanismo del dedo</i>	55
Tabla 3. <i>Designación de ángulos iniciales y finales</i>	57
Tabla 4. <i>Alternativas de filamentos</i>	63
Tabla 5. <i>Principales características técnicas del ABS</i>	64
Tabla 6. <i>Verificación de la correcta selección del ABS</i>	65
Tabla 7. <i>Resultados del patrón de relleno hexagonal sometido a compresión</i>	69
Tabla 8. <i>Resultados del patrón de relleno rectangular sometido a compresión</i>	70
Tabla 9. <i>Matriz de decisiones</i>	76
Tabla 10. <i>Criterios de selección</i>	79
Tabla 11. <i>Selección de la mejor alternativa</i>	82
Tabla 12. <i>Valores de sensores</i>	85
Tabla 13. <i>Parámetros de impresión 3D</i>	89
Tabla 14. <i>Piezas que conforman la herramienta robótica</i>	93
Tabla 15. <i>Pruebas de apertura y cierre de los dedos</i>	107
Tabla 16. <i>Pruebas de peso máximo</i>	110
Tabla 17. <i>Pruebas de cierre y apertura de la herramienta</i>	112
Tabla 18. <i>Pruebas de transporte de objeto</i>	114
Tabla 19. <i>Datos obtenidos de las pruebas observadas</i>	116
Tabla 20. <i>Datos generales de la herramienta robótica</i>	119
Tabla 21. <i>Datos básicos de la herramienta</i>	119
Tabla 22. <i>Análisis económico</i>	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Robótica aplicada Fuente	7
Figura 2. Elementos constitutivos de un robot	8
Figura 3. Estructura del manipulador	9
Figura 4. Impresiones en 3d con filamento PLA.....	11
Figura 5. Elementos mecánicos impreso en ABS).....	12
Figura 6. Instrumentos de uso alimenticio	13
Figura 7. Impresión 3D en fibras de carbono.....	14
Figura 8. Sensor de fuerza resistivo (FSR)	16
Figura 9. Modelo de un sensor capacitivo	17
Figura 10. Galga extensiométrica	17
Figura 11. Sensor de flexión 2,2”	19
Figura 12. Fotorresistencia LDR)	19
Figura 13. Sensor de musculo mioeléctrico	20
Figura 14. Pinza industrial para paletizado	22
Figura 15. Garra de tres dedos.....	23
Figura 16. Batería de ventosas.....	24
Figura 17. Sistema de visión adaptado a un robot.....	25
Figura 18. Músculos artificiales fabricados con acrilatos	26
Figura 19. Válvula blanda.....	27
Figura 20. Ciclo para cambio de forma	28
Figura 21. Mano DLR.....	29
Figura 22. Mano Marcus.....	30

Figura 23. Schunk SVH	31
Figura 24. Pinza FXCB	31
Figura 25. Tipos de agarre según los puntos de contactó con el objeto	33
Figura 26. Mecanismo de 4 barras generalizado	35
Figura 27. Sección del dedo mostrando mecanismo doble manivela	36
Figura 28. Movimiento de un mecanismo sub-actuad	36
Figura 29. Dedo compuesto por mecanismo de 4 barras sub-actuado	39
Figura 30. Dimensiones generales	40
Figura 31. Variables a calcular de la herramienta	41
Figura 32. Datos del detalle A	42
Figura 33. Datos del detalle B	43
Figura 34. Análisis geométrico de P_1 y P_2	44
Figura 35. Cálculo de θ_1	45
Figura 36. Cálculo de θ_2	46
Figura 37. Mecanismo simplificado del dedo	54
Figura 38. Medidas del dedo	56
Figura 39. Movimiento del mecanismo.....	57
Figura 40. Comprobación de movimiento	58
Figura 41. Diseño CAD de la herramienta.....	58
Figura 42. Deformación total del dedo	59
Figura 43. Factor de seguridad de dedo.....	60
Figura 44. Análisis de Von Mises del acople de la herramienta robótica	61
Figura 45. Factor de seguridad del acople	61

Figura 46. Deformación de los ejes de transmisión de movimiento	62
Figura 47. Análisis de Von Mises del acople del dedo	63
Figura 48. Resultados del ensayo mecánico de compresión	66
Figura 49. Impresora Ender 3.....	68
Figura 50. Patrón de relleno de hexagonal y rectangular a 0° y 90°.....	69
Figura 51. Esfuerzo máximo de compresión (MPa) en cada una de las probetas	71
Figura 52. Fuerza máxima vs deformación, patrón rectangular.....	72
Figura 53. Fuerza máxima vs deformación, patrón hexagonal	72
Figura 54. Motor Nema 17	77
Figura 55. Motor reductor pololu 131:1	78
Figura 56. Arduino uno	80
Figura 57. Arduino nano	81
Figura 58. Sistema general de conexión eléctrica.....	83
Figura 59. Conexión entre el módulo wago y relé.....	84
Figura 60. Componentes electrónicos	86
Figura 61. Diagrama electrónico de la parte interna de la herramienta	87
Figura 62. Vista previa de la impresión 3D	90
Figura 63. Impresión 3D	91
Figura 64. Piezas fabricadas en impresión 3D	91
Figura 65. Mecanizado del eje.....	92
Figura 66. Partes de la estructura final	93
Figura 67. Partes del dedo	95
Figura 68. Dedo ensamblado.....	95
Figura 69. Palma.....	96

Figura 70. Acople dedo.....	96
Figura 71. Pared lateral	97
Figura 72. Acople entre el motor a su mecanismo.....	97
Figura 73. Ensamble final de la herramienta.....	98
Figura 74. Módulo wago y relés	99
Figura 75. Relés.....	100
Figura 76. Cables de alimentación	101
Figura 77. Cable de transmisión	101
Figura 78. Designación de pines al conector DX16	102
Figura 79. Flujograma de funcionamiento	103
Figura 80. Implementación de la herramienta al Robot Kuka KR 16	105
Figura 81. Kuka Control Panel (KCP).....	106
Figura 82. Pruebas de transporte de objetos	113
Figura 83. Pruebas transporte de objetos.....	113
Figura 84. Vista general de la herramienta robótica de tres dedos	118

RESUMEN

En la industria ecuatoriana se encuentran limitantes con respecto a la accesibilidad de herramientas robóticas y así mismo con sus repuestos; la adquisición de estas herramientas se realiza mediante importación elevando su costo; la compatibilidad del efector final con el brazo robótico en ocasiones también se ve afectada. En este proyecto se realizó el diseño y construcción de una herramienta robótica para el brazo robótico Kuka KR16 del laboratorio de robótica industrial, su función es similar a la de una mano humana por lo que se utilizó mecanismos de 4 barras para sus dedos, también se optimizó la función del actuador logrando con esto tener una herramienta con mecanismo sub-actuado. La estructura se fabricó bajo la técnica de modelado por deposición fundida cumpliendo con el objetivo de disminuir el peso; mediante el estudio realizado al filamento ABS el cuál se sometió a ensayos mecánicos de compresión se logró determinar los parámetros de impresión 3D adecuados para que las partes de la estructura cuenten con propiedades mecánicas que favorecen a la resistencia de la herramienta. La disponibilidad de los materiales en el mercado local ayudó a que se implemente sensores de fuerza y de flexión para el control de agarre de los diferentes objetos.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBÓTICA INDUSTRIAL**
- **MECANISMO SUB-ACTUADO**
- **FILAMENTOS ABS**

ABSTRACT

In the Ecuadorian industry there are limitations with respect to the accessibility of robotic tools and also with their spare parts; the acquisition of these tools is done through importation raising its cost; the compatibility of the final effector with the robotic arm is sometimes also affected. In this project, the design and construction of a robotic tool for the Kuka KR16 robotic arm of the industrial robotics laboratory was carried out. Its function is similar to that of a human hand, so 4 bar mechanisms were used for its fingers. The structure was manufactured under the cast deposition modeling technique fulfilling the objective of reducing the weight; by means of the study carried out on the ABS filament which was submitted to mechanical compression tests, it was possible to determine the appropriate 3D printing parameters so that the parts of the structure have mechanical properties that favor the resistance of the tool. The availability of the materials in the local market helped to implement force and bending sensors to control the grip of the different objects.

KEYWORDS:

- **INDUSTRIAL ROBOTICS**
- **SUB-ACTUATED MECHANISM**
- **ABS FILAMENTS**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Planteamiento del problema

En la industria ecuatoriana se encuentran limitantes con respecto a la accesibilidad a herramientas robóticas, ya que no han tenido un avance significativo en aportaciones a la robótica local, además la adquisición del brazo robótico y de sus accesorios se lo realiza de forma separada ya que las herramientas se adquieren dependiendo de la aplicación necesaria, las empresas fabricantes de estas refieren un costo de entre \$8 000 a \$40 000 (ATI, 2015) en marcas conocidas de la industria. En el país no se encuentra un importador directo y mucho menos fabricantes de herramientas robóticas de bajo costo y compatibles con brazos robóticos industriales, por lo que este proyecto busca desarrollar una herramienta robótica utilizando las últimas tendencias tecnológicas y materia prima disponible en el mercado local, logrando reducir costos en la herramienta industrial.

El peso de las herramientas robóticas es grande por lo que afecta la repetibilidad de las tareas de aprehensión y manipulación de objetos, además no existe un control de la cantidad de fuerza que se va aplicar al objeto aprendido disminuyendo precisión y confiabilidad.

Otro problema detectado ha sido la falta de fabricantes de herramientas robóticas incluyendo la dificultad de encontrar repuestos en caso de avería y el precio elevado que

va de la mano, en el Laboratorio de Robótica Industrial no se cuenta con una herramienta terminal que permita manipular objetos de una manera más precisa y que garantice el correcto agarre de las diferentes formas del objeto.

1.2. Antecedentes

El uso de brazos robóticos en la industria se ha incrementado en las últimas décadas, debido a que cumplen funciones que requieren alta precisión. El desarrollo de los sistemas se ha enfocado en mejorar ciertos parámetros como la resistencia para trabajar en diferentes condiciones, independencia en su funcionamiento, la precisión y repetibilidad con la que realiza sus movimientos, entre otras. Un punto esencial de un brazo robótico industrial es su grado de multifuncionalidad, es decir que realice diferentes trabajos logrando así diversas aplicaciones con el uso de diferentes tipos de herramientas.

Desde hace varios años se ha buscado la creación de manipuladores capaces de simular el comportamiento de una mano humana. Actualmente existen manos robóticas capaces de sentir objetos, con casi tantos grados de libertad como una mano humana y capaces de ejercer las mismas fuerzas. (Rodríguez, 2016)

Herramientas robóticas tan sencillas como una pinza robot puede realizar tareas de bastante precisión cuando son realimentados con un sistema de sensores adecuado y controlado mediante algún algoritmo inteligente. Un equipo de investigadores de Siemens ha desarrollado un proyecto que cumple con la interacción humano-robot en entornos industriales.

Dicha mano está basada en una combinación de entradas sensoriales, donde los movimientos individuales de los dedos han sido fusionados y transferidos a un brazo y una mano robótica para realizar tareas específicas en tiempo real. A medida que esta tecnología evoluciona, el aprendizaje automático se utilizará para entrenar a los robots a reconocer comandos cada vez más complejos, asignarles tareas de alto nivel y enseñarles nuevas habilidades. (Blanco, 2017)

No obstante, las herramientas de estos robots están diseñadas para hacer una tarea específica como soldar, cortar, desplazar, etc. con algunas variaciones posibles dependiendo del caso de la producción ya sea una pieza en mal estado, pieza girada, e incluso en ausencia de piezas, es importante realizar diseños que tengan arquitectura abierta o que sean modulares con el fin de que estos sean de fácil adaptabilidad. (NUÑES, 2014)

Para el desempeño de los brazos robóticos industriales son diseñados específicamente para que cumplan características y parámetros de la industria tales como: Resistencia, Durabilidad, Peso máximo, entre otras dichas características hacen que las herramientas y superficies sean más duraderas. También existe otro reto adicional dentro de la industria, la operación a bajas temperaturas, altos porcentajes de humedad y hermetismo. El creciente mercado industrial y el gran campo de aplicación hace que estos equipos no solo tengan que soportar estas condiciones, sino que puedan también ser trasladados sin necesidad de desmontaje o traslado. (Murcia Economía, 2016)

Los controladores de fuerza de los robots industriales permiten modificar trayectorias cartesianas, los más populares tienen esta capacidad desde hace aproximadamente veinte años (Brumovsky, 2010). Sin embargo, robots industriales de última generación pueden no tenerla. Los robots industriales no sólo serán capaces de fabricar productos complejos, sino que también deben ser flexibles para adaptarse a los requisitos individuales y, sobre todo, podrán trabajar en cooperación directa con los seres humanos.

Es primordial que en Ecuador se realicen estudios sobre la fabricación de herramientas para robots industriales, con diferentes tipos de materiales para su construcción, que tengan características muy similares a las herramientas que se venden en el exterior, reduciendo costos y logrando obtener un crecimiento industrial en el país, podemos esperar nuevas áreas de aplicación que ofrecen posibilidades inigualables.

1.3. Justificación e importancia

Entre las principales tareas que realizan los robots industriales, está la manipulación de objetos de diferente forma y tamaño por lo que se requiere una herramienta para el laboratorio de Robótica Industrial que cuente con capacidades como precisión y repetibilidad.

El no contar con una empresa local que sea especializada en brazos robóticos que oferte herramientas robóticas además de repuestos de bajo costo y de adquisición rápida. A partir de este caso, se determinó cuánto costaría la fabricación de una herramienta para el robot Kuka KR16 del Laboratorio de Robótica Industrial que cuente con características de: bajo costo, fácil mantenimiento y montaje, que se desarrolle con tecnología ecuatoriana además de su materia prima.

El proyecto aportará grandes beneficios, uno de ellos es que se construirá la mano robótica mediante modelado por deposición fundida logrando una herramienta de bajo peso y por ende más económica lo primordial de una está mano robótica es poder acoplarla a un brazo robot industrial y con el conjunto desarrollar distintas tareas de aprehensión y manipulación de objetos con diferentes formas y tamaños diversos.

Algo sobresaliente de este proyecto es, que será totalmente construida en el Ecuador de forma general su diseño, construcción e implementación evidenciará muestra de los avances y las técnicas utilizadas en el proyecto.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir una herramienta robótica de tres dedos para ambientes y aplicaciones industriales, mediante mecanismos sub-actuados aplicando técnicas de modelado por deposición fundida para el brazo robótico Kuka KR16 del Laboratorio de Robótica Industrial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

1.4.2. Objetivos específicos

- Investigar el funcionamiento y características técnicas de herramientas industriales de sujeción para brazos robóticos Kuka KR16.
- Estudiar sobre los tipos de sensores para herramientas robóticas.
- Investigar diferentes tipos de termoplásticos para modelado por disposición fundida.

- Diseñar el sistema mecánico de la herramienta robótica.
- Seleccionar la estrategia más adecuada para la funcionalidad de la herramienta.
- Diseñar el sistema de control.
- Construir la herramienta robótica.
- Adaptabilidad de la herramienta con el sistema neumático del brazo robótico industrial Kuka KR16.
- Desarrollar programas de control de movimiento de la herramienta.
- Implementar la herramienta al brazo robótico industrial Kuka KR16.
- Realizar pruebas de funcionalidad de la herramienta robótica en el laboratorio de Robótica Industrial.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Robótica industrial

La definición de Robótica Industrial de acuerdo a la norma ISO 8373 se encuentra como “Manipulador multifuncional, controlado automáticamente, reprogramable en tres o más ejes, que puede estar fijo o móvil para uso en aplicaciones de automatización industrial” (Asociación Española de Robótica y Automatización, 2016)

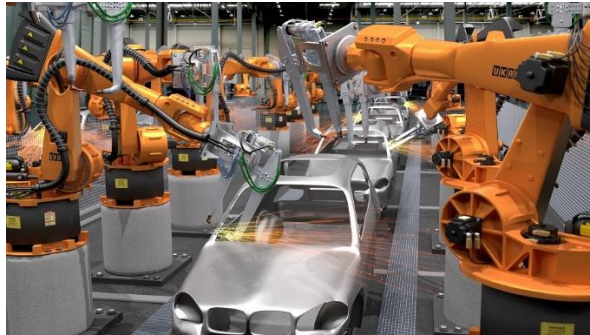


Figura 1. Robótica aplicada
Fuente: (Votimum, 2015)

Un ejemplo del campo aplicativo de manipuladores multifuncionales es el que se visualiza en la Figura 1.

2.2. Elementos constitutivos de un robot industrial

Como se aprecia en la Figura 2, los elementos que conforman un robot industrial son:

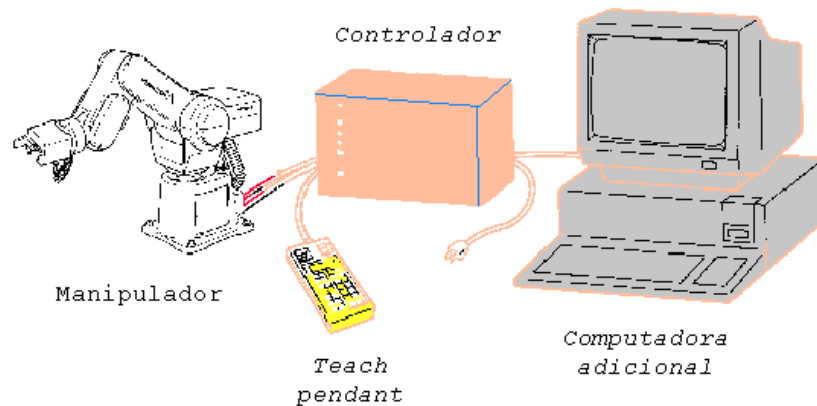


Figura 2. Elementos constitutivos de un robot industrial

Fuente: (Robótica y mecatrónica, 2017)

- Manipulador o brazo mecánico
- Actuadores
- Controlador
- Efecto terminal o herramienta robótica
- Sensores

2.2.1. Manipulador

Es el conjunto de elementos mecánicos que permiten el movimiento del efector terminal. En la estructura interna del manipulador se encuentran ubicados muchas veces los elementos motrices, engranajes y transmisiones que soportan el movimiento de las cuatro partes, que por lo general conforman el manipulador. (Universidad de Santiago de Chile, 2016)

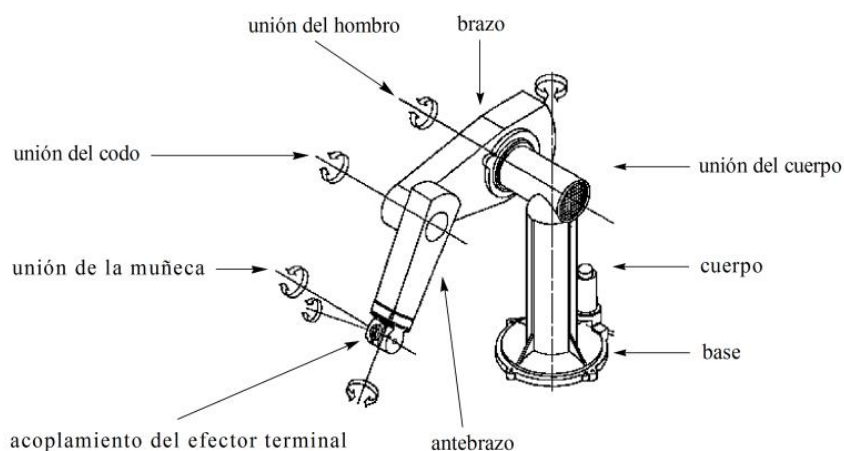


Figura 3. Estructura del manipulador
Fuente: (Universidad de Santiago de Chile, 2016)

Como se indica en la Figura 3, la base, cuerpo, brazo y antebrazo son los elementos rígidos del manipulador los cuales constituyen los eslabones, que están conectados por juntas (articulaciones), permitiendo un movimiento relativo de los eslabones vecinos.

2.2.2. Actuadores

Son los encargados de producir el movimiento de las articulaciones, ya sea en forma directa o por medio de cables, poleas, cadenas, etc. (Universidad de Santiago de Chile, 2016)

2.2.3. Controlador

Es el dispositivo encargado de regular el movimiento de todos de los elementos del manipulador, y de realizar los cálculos y procesamiento de la información. La complejidad del control varía según los parámetros que se gobiernan. (Universidad de Santiago de Chile, 2016)

2.2.4. Efector final

Según (ARQHYS, 2015) “Un efector final puede ser visto como parte del robot que interactúa con el ambiente de trabajo”. En muchas ocasiones el robot ha de realizar operaciones que no consisten en manipular objetos, sino que una herramienta se utilizaría como efector final en aplicaciones en donde se exija al robot realizar alguna operación en la pieza de trabajo.

2.2.5. Sensores

Los sensores dotan al robot industrial de la capacidad de dar respuestas ante cambios inesperados en las condiciones de trabajo, como es el caso, de los paros frente a obstáculos. (BF México, 2016)

Esta parte es esencial en otro de los objetivos de la automatización: detectar las condiciones del ambiente de forma automática, relacionándose con su entorno de forma natural y constante.

2.3. Tipos de termoplásticos para impresión en 3D

Un polímero es un compuesto que consiste en moléculas de cadena larga, cada molécula está hecha de unidades repetitivas que se conectan entre sí, en base a su comportamiento térmico se clasifican como termoplástico, elastómero y termoestable. Los termoplásticos son polímeros que, al someterlos a un calentamiento progresivo se reblandecen y funden en un proceso que puede ser reversible. (ROSALES, 2015)

En la actualidad existe una amplia variedad de termoplásticos que se emplean en impresiones 3D, aunque el mercado del filamento termoplástico está en continuo

desarrollo y surgen materiales nuevos continuamente. Cualquier impresora de bajo coste suele funcionar con termoplásticos como el PLA o ABS, PA, HIPS y otros.

2.3.1. Ácido Poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico es biodegradable, se fabrica a partir de materias primas renovables, como el almidón de maíz. Es uno de los materiales con los que se puede imprimir más fácilmente, además de que una de sus características es el leve encogimiento luego de la impresión 3D, razón por la cual las plataformas calefactadas no son necesarias en la utilización de este material. Al imprimir con PLA en una impresora FDM/FFF las temperaturas no deben ser muy altas, entre 190°C a 230°C. (3D natives, 2018)



Figura 4. Impresiones en 3d con filamento PLA
Fuente (Impresoras 3D, 2018):

El PLA es más difícil de manipular dada su elevada velocidad de enfriamiento y solidificación. Es importante mencionar que puede deteriorarse o estirarse al contacto con el agua. Sin embargo, este material, en general traslúcido, es utilizado por la mayoría de las máquinas de deposición fundida y se encuentra en una amplia variedad de colores, como se puede visualizar en la Figura 4, una gama de impresiones con el filamento PLA.

2.3.2. Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

El ABS es un material plástico procedente del petróleo, tiene una temperatura de impresión de entre 230°C y 260 °C, y puede tolerar temperaturas muy bajas (-20 °C) y muy elevadas (80 °C). Además de su gran resistencia, es un material reutilizable y puede ser soldado con procesos químicos. Sin embargo, no es biodegradable y se encoge en contacto con el aire, razón por la cual la plataforma de impresión se debe precalentar con el fin de evitar el despliegue de las piezas. Se recomienda, la utilización de una impresora 3D con una estructura cerrada para limitar las emisiones de partículas que se desprenden al utilizar este material. (3D natives, 2018)

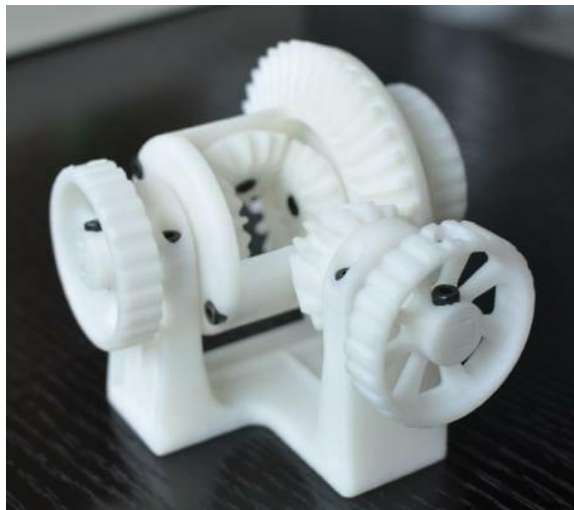


Figura 5. Elementos mecánicos impreso en ABS
Fuente: (Impresoras 3D, 2018)

Actualmente al ABS se puede encontrar en elementos mecánicos como se enseña en la Figura 5, además de una amplia gama de aplicaciones como piezas de automoción, piezas industriales inclusive es empleado en carrocería de los automóviles, los electrodomésticos o las carcasas de los móviles. Este filamento pertenece a la familia de

los plásticos térmicos, contiene una base de elastómeros a base de polibutadieno que lo hace más flexible y resistente a los choques.

2.3.3. Tereftalato de polietileno

Como indica (Impresoras 3D, 2018) el filamento PET está hecho de petróleo crudo, gas y aire. Este es comúnmente visto en las botellas de plástico desechables. Es el filamento ideal para piezas destinadas al contacto alimentario, es semirrígido y con una buena resistencia. Para obtener los mejores resultados al imprimir con PET es necesario alcanzar temperaturas de entre 75-90°C. Comúnmente comercializado como un filamento traslucido, existen variantes como PETG, PETE, y el PETT. Es un filamento que no libera ningún olor durante la impresión y es 100% reciclable.



Figura 6. Instrumentos de uso alimenticio
Fuente: (Impresoras 3D, 2018)

Esta variedad de filamento es muy favorable para hacer: envases de alimentos, botellas, entre otras como se muestra en la Figura 6.

Entre sus ventajas están:

- Presenta alta transparencia, incluso siendo el filamento de color.
- Alta resistencia al desgaste y corrosión.

- Buena resistencia química y térmica.
- Resistente a impactos.
- Resiste a esfuerzos permanentes (flexibilidad).
- Baja absorción de humedad.
- En el uso doméstico, permite “cocción en microondas”

2.3.4. Fibras de carbono

Los filamentos que incluyen fibras de carbono han ido adquiriendo cada vez más popularidad dentro de la industria 3D. El motivo de su gran demanda es su increíble resistencia manteniendo en las piezas fabricadas un peso inferior en comparación con otros materiales. Los filamentos con estas características incluyen pequeñas fibras de carbono en un material base que puede ser PLA, PETG, Nylon, ABS, o Policarbonato, mejorando las propiedades de cada uno. Los ajustes de impresión suelen ser los requeridos por su material base, aunque es importante contar con un hardware adecuado ya que las fibras de carbono pueden provocar la obstrucción de las boquillas de impresión. (3D natives, 2018)



Figura 7. Impresión 3D en fibras de carbono
Fuente: (3D natives, 2018)

Las impresiones de fibras de carbono como la que se indica en la Figura 7, poseen dos características sobresalientes ser súper resistente y ultra ligero.

2.4. Diferentes tipos de sensores de presión

Se entiende que un sensor es un dispositivo que está capacitado para detectar acciones o estímulos externos y responder en consecuencia, estos aparatos pueden transformar las magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas. En la industria se puede encontrar una amplia gama de sensores para diferentes magnitudes físicas como: fuerza, temperatura, presencia movimiento etc.

Los sensores de fuerza que se emplean para la comprobar o medir la cantidad de presión que se ejerce en un control o ensayo. Estos sensores de fuerza transforman la magnitud mecánica en magnitud eléctrica, fuerza ejercida en voltaje.

2.4.1. Sensores de fuerza resistivos (FSR)

El sensor de fuerza resistivo (FSR) es un dispositivo de película de polímero que presenta una disminución de la resistencia cuando aumenta la fuerza aplicada a la superficie activa. Su sensibilidad a la fuerza está optimizada para uso en el control por toque humano de dispositivos electrónicos. Los FSR no son células de carga o galgas extensiométricas, aunque tengan propiedades similares; estos FSR no son adecuados para medidas de precisión. (Luis Carrion, 2009)



Figura 8. Sensor de fuerza resistivo (FSR)

Fuente: (Heptro, 2015)

En la Figura 8, se puede observar un sensor de fuerza resistivo tipo circular, por lo general en aplicaciones de agarre, se suele colocar los FSR encima de unas láminas de un material elástico, con el fin de que al detectar una flexión en la membrana el sensor cambia su resistencia interna. Este sensor está fabricado de 2 capas separadas por un espaciador, cuanto más se presiona, hace que la resistencia disminuya. Cuando no es presionado, su resistencia es de aproximadamente 20 M Ω . Su rango de presión varía de 30 gramos a 1 Kg. Por lo que basta con ponerlo en un divisor de tensión, para poder medir la salida en voltaje con algún ADC. (Heptro, 2015)

2.4.2. Sensores capacitivos

El sensor capacitivo es un interruptor electrónico que trabajan sin contacto. Estos sensores aprovechan el efecto que tienen los materiales como el papel, vidrio, plástico, aceite, agua, así como de los metales, de aumentar la capacidad del sensor cuando se encuentran dentro del campo eléctrico generado.

El modelo de sensor capacitivo que se observa en la Figura 9, consta de un condensador que genera un campo eléctrico. Este condensador forma parte de un circuito resonador, de manera que cuando un objeto se acerca a este campo, la capacitancia aumente y el circuito empieza a resonar. (Mecafenix, 2017)

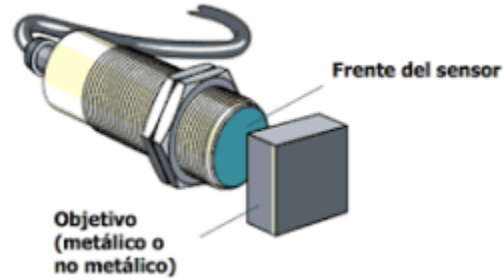


Figura 9. Modelo de un sensor capacitivo
Fuente: (Mecafenix, 2017)

2.4.3. Galga extensiométrica

Una galga extensiométrica o extensómetro es un sensor, que mide la deformación, presión, carga, par, posición, etc. y se basa en el efecto piezo resistivo, que es la propiedad que tienen los materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos.

La funcionalidad de estos sensores se da cuando se aplica una fuerza externa a un objeto estacionario, se produce tensión y estrés sobre él. El estrés se define como las fuerzas internas de resistencia del objeto, y la tensión se define como el desplazamiento y la deformación que se producen. (Omega, 2017)

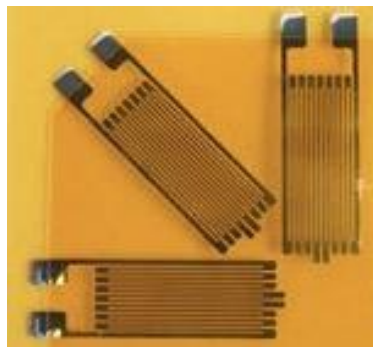


Figura 10. Galga extensiométrica
Fuente: (Omega, 2017)

Las galgas extensiométricas que se visualizan en la Figura 10, consisten normalmente en una lámina y un conductor eléctrico, la base de una galga extensiométrica está hecha de una lámina de poliamida, sobre la cual se aplica una capa de Constantán, este elemento es una aleación, generalmente formada por un 55 % de cobre y un 45 % de níquel (Cu55Ni45) y se caracteriza por tener una resistencia eléctrica constante en un amplio intervalo de temperatura. (Mecafenix, 2017)

2.4.4. Sensor de flexión

Este sensor puede detectar la flexión de un material en una dirección, teniendo múltiples aplicaciones y pudiéndose usar con Arduino o Raspberry Pi; básicamente este sensor es una resistencia que cambia su valor en función del nivel de flexión. Cuando esta es nula la resistencia es 25K Ohm, cuando la flexión es máxima, es decir se ha doblado en un ángulo de 90° la resistencia aumenta hasta 100K Ohm. (Omega, 2017)

En la figura 11, se puede observar el sensor de flexión 2,2", la denominación de pulgadas es por la longitud del área de sensado; los pines del conector tienen un espaciado de 0.1", se pueden conectar a la entrada analógica de un microcontrolador (con una resistencia pull-up) o una entrada digital con un condensador de 0.1uF. (MCI Electronics, 2017)



Figura 11. Sensor de flexión 2,2”
Fuente: (Adash, 2016)

2.4.5. Sensor óptico

Un sensor óptico o también llamado fotoeléctrico es capaz de detectar una presencia o algún objeto a distancia, a través del cambio de intensidad de luz. Debido a que estos dispositivos se basan en la cantidad de luz detectada o reflectividad de los objetos, es posible detectar casi todos los tipos de materiales, por ejemplo: vidrio, metal, plástico, madera y líquidos.

Entre la variedad de los sensores ópticos se encuentran los LDR, son muy útiles en robótica para regular el movimiento de los robots y detener su movimiento cuando van a tropezar con un obstáculo o bien disparar alguna alarma. (Educa lab, 2016)



Figura 12. Fotorresistencia LDR
Fuente: (Brico geek, 2015)

En la Figura 12, se aprecia que la LDR es un sensor muy pequeño y sencillo de utilizar. También sirven para regular la iluminación artificial en función de la luz natural.

2.4.6. Sensor mioeléctrico

El sensor mioeléctrico detecta el potencial de acción que activa las células musculares mediante electrodos unidos a la piel. Mientras más fuerza ejecute un músculo mayor será el voltaje leído por el sensor. Las señales pueden ser analizadas para detectar anomalías y el nivel de activación o para analizar la biomecánica del movimiento de un humano o un animal. Su señal también puede ser utilizada para controlar diferentes equipos, como las prótesis. (Tdrobotica, 2015)



Figura 13. Sensor de musculo mioeléctrico

Fuente: (Tdrobotica, 2015)

El sensor de músculos mioeléctrico que se indica en la Figura 13, mide, filtra, rectifica y amplifica la actividad eléctrica de un músculo y produce una señal análoga que puede ser fácilmente leída por un microcontrolador. (Tdrobotica, 2015)

2.5. Herramientas robóticas y sus diferentes tipos

Las herramientas robóticas también son conocidas como efectores finales, en robótica el término de efector final se emplea para describir cualquier objeto o dispositivo sujetado a la brida del robot (la muñeca) diseñado para interactuar con el medio ambiente que sirve para realizar alguna tarea o aplicación particular como soldadura por puntos, soldadura por arco, pintura por pulverización, operaciones de taladro, paletizado, empacado, carga, descarga entre otras.

Según (Rogelio, 2018) las herramientas que se usan en robótica industrial tendrán muchas modificaciones y adaptaciones en función del área de trabajo a llevar a cabo, de modo que en cada caso indicará una aplicación usual, si bien existen multitud de adaptaciones y aplicaciones. Igualmente existe la posibilidad de aplicaciones donde la herramienta puede ser intercambiable y un mismo robot industrial se utilice para varios procesos llevando a cabo el cambio de herramienta final.

2.5.1. Herramientas robóticas para traslado, colocación y control

A continuación, se hará una breve descripción de algunos efectores finales que se emplean en aplicaciones de traslado, colocación y control. Esto ayudará a tener una idea más clara, de la variedad de opciones de prototipos de herramientas robóticas, gracias al desarrollo de nuevas tecnologías en la elaboración de materiales, mecanismos, actuadores y sensores.

En el entorno del almacenaje como la distribución de materiales en procesos de fabricación el uso de robots permite el manejo de diferentes tipos de cargas y pesos, así como la colocación espacial con una exactitud adecuada.

a. Pinza

Se trata de la herramienta más convencional que se utiliza en un brazo robótico, con esta herramienta se puede agarrar distintos elementos para poder tomarlos y depositarlos de una a otra ubicación. En función de las dimensiones de las piezas, así como los materiales y las fuerzas que se ejercen al tomar los elementos, estos pueden ser de distintos materiales, volúmenes y pesos. (Rogelio, 2018)



Figura 14. Pinza industrial para paletizado
Fuente: (EK roboter, 2016)

Como aplicación principal de la pinza se puede poner como ejemplo el tomar distintos productos y colocar dentro de una caja o colocar en una posición predeterminada llevando a cabo un paletizado como indica la Figura 14.

b. Garra de tres dedos

Este tipo de elementos terminales de robot resultan imprescindibles cuando hay que agarrar una gran variedad de piezas, pues necesitaremos una garra versátil y capaz de adaptarse a cualquier superficie. Obviamente, su mayor complejidad hace que doble el

precio de la garra de dos dedos, un ejemplo de uso de estas garras puede ser la manipulación de tubos largos, ya que se puede mejorar su alineación y eficacia en los giros rápidos. También existen garras de dedos minúsculos y sin articular, mucho más baratos, adecuados para tomar objetos cilíndricos pequeños. (Mario, 2018)



Figura 15. Garra de tres dedos
Fuente: (Sergio, 2017)

El modelo que se encuentra en la Figura 15, se compone de un mecanismo situado en los dedos, gracias a esto la pinza es capaz de manipular objetos con cualquier forma de manera sencilla. Se utiliza cuando es necesaria una gran versatilidad para el agarre de los objetos.

c. Ventosa

El uso de ventosas como herramienta final permite al robot coger elementos de muy diversas formas y volúmenes. La energía utilizada en este sistema de agarre es producida

por una bomba de vacío, usando para la recogida unas ventosas de succión acopladas a la garra.

Según el área disponible para la succión se necesita de una ventosa, si el espacio y el peso del elemento son reducidos, o de varias en caso contrario como por ejemplo para levantar planchas de acero. En los casos donde es necesario recoger muchos elementos a la vez se debe utilizar una batería de ventosas. (MEKKAM, 2015)

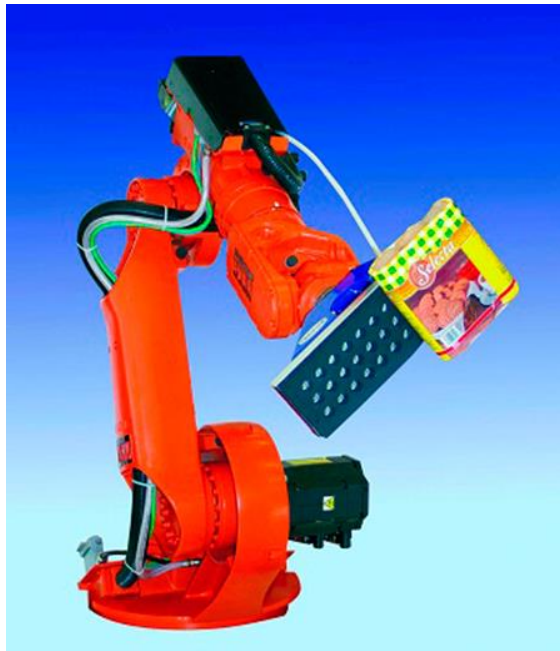


Figura 16. Batería de ventosas

Fuente: (Rogelio, 2018)

En la Figura 16, se observa una batería de ventosas generalmente se emplea esta herramienta robótica cuando se tiene mucha producción y se requiere gran velocidad en el paletizado.

d. Cámara de visión

En ocasiones los procesos de fabricación finalizan con una tarea de control de calidad la cual requiere comprobar visualmente la buena ejecución de distintos procesos llevados

a cabo, este proceso de calidad en ocasiones se hace a un muestreo de piezas fabricadas, pero cuando es necesario hacerlo a todas piezas por el nivel de calidad exigido conlleva un tiempo elevado.

Es en este caso en el que la aplicación de un sistema de visión adaptado a un robot cómo se presenta en la Figura 17, este sistema puede reducir el tiempo de inspección, además actualmente se ha avanzado mucho en reconocimiento de visión lo que permite que todo el proceso de visión y comprobación se pueda automatizar. En este caso se consigue mediante la aplicación de robots que el proceso de control de calidad no suponga un cuello de botella para el total de la fabricación.



Figura 17. Sistema de visión adaptado a un robot

Fuente: (Rogelio, 2018)

2.6. Estrategias innovadoras de control de movimiento de herramientas robóticas

Para contar con un efectivo control de movimiento es necesario emplear actuadores, estos deben usarse para manipular las partes elementales de la estructura mecánica, ya que ejercen fuerzas y momentos sobre las partes de un robot haciendo que éstas se muevan además tienen que ser controlados con rapidez y precisión. Los actuadores que se utilizan actualmente son de tipo hidráulicos, neumáticos y eléctricos.

2.6.1. Elastómeros dieléctricos

Los elastómeros dieléctricos (DE) son los polímeros electro-activos que presentan respuestas más rápidas y elevado grado de deformación mecánica (de 10 a 300%), con baja histéresis, a las altas densidades de energía disponibles (superiores a los 8 MJ/m³), además son relativamente baratos, ligeros, mecánicamente robustos y escalables. (Jimenez A, 2015)

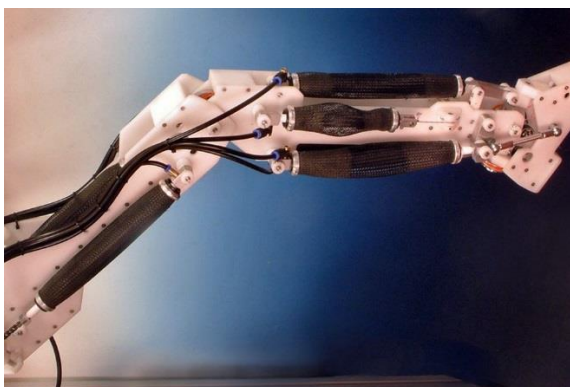


Figura 18. Músculos artificiales fabricados con acrilatos

Fuente: (Hisour, 2017)

Los elastómeros más populares son: acrilato, silicona, poliuretanos, elastómero cristal líquido. Debido a sus buenas características en cuanto a deformación este tipo de

actuador cuentan con aplicaciones de interés público en diversos sectores, tales como robótica, en el sector industrial, en micro válvulas o brazos articulados, sector electrónico, o versiones más potentes de estos actuadores podrían desarrollarse como extremidades protésicas. (Jimenez A, 2015)

2.6.2. Soft Robot

Soft Robot es el término que se le atribuye a robots con características morfológicas y constitutivas no convencionales. Los robots suaves ofrecen un mecanismo más poderoso para interactuar de una manera fácil y efectiva con el entorno real, el diseño de su morfología está relacionado con el reino animal en el cual se encuentra un sin número de cuerpos con estructuras suaves y deformables, pero a la vez robustas. Es por ello que las aplicaciones desarrolladas, hasta el momento como la de la Figura 19, están orientadas a la interacción directa y segura con los seres humanos, la locomoción en ambientes no estructurados y el agarre robusto y eficaz de objetos. (Medina J, 2014)



Figura 19. Válvula blanda
Fuente: (Medina J, 2014)

2.6.3. Aleaciones con memoria de forma

Las aleaciones de memoria de forma son materiales metálicos que poseen la capacidad de recordar una forma determinada. Esta transformación de una forma a otra, responde a impulsos térmicos que pueden ser generados a partir de impulsos eléctricos.

En la Figura 20, se visualiza efecto de memoria de forma, se produce entre dos fases, una de alta y otra de baja temperatura (austenítica y martensítica).

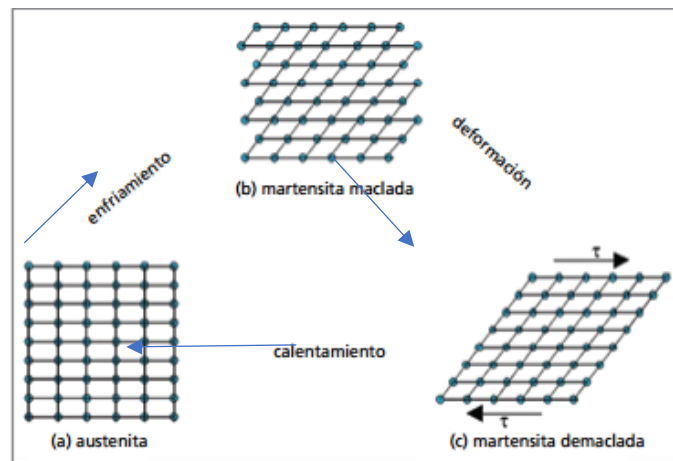


Figura 20. Ciclo para cambio de forma

Fuente: (Villar, 2010)

Cuando este material se encuentra en frío, o por debajo de su temperatura de transformación, tiene un límite elástico muy bajo y se puede deformar con bastante facilidad en cualquier forma nueva, que se mantendrá. Sin embargo, cuando el material se calienta por encima de su temperatura de transformación experimenta un cambio en la estructura de cristal que hace que se vuelva a su forma original. Si la aleación se encuentra con cualquier resistencia durante esta transformación, puede generar fuerzas muy grandes. Este fenómeno ofrece un mecanismo único para el accionamiento remoto. (Paulina, 2018)

2.7. Prototipos de manos robóticas

En este apartado se describirá brevemente algunos prototipos de manos robóticas impresas en 3D, igualmente diferentes modelos de herramientas robóticas industriales de peso ligero que se comercializan. Esto ayuda a tener ideas más claras de los diferentes materiales, mecanismos, actuadores y sensores que pueden contribuir con el proyecto.

2.7.1. Mano DLR

Como se ve en la Figura 21, la mano DLR, se realizó en el centro aeroespacial alemán; la cual consta de cuatro dedos con un total de catorce grados de libertad. Para su movimiento se utilizaron motores DC y cada dedo dispone de sensores de posición, fuerza y temperatura. Gracias a estos sensores, esta mano presenta un gran rendimiento en el agarre y manipulación de objetos. (Quinayás, 2010)



Figura 21. Mano DLR
Fuente: (Quinayás, 2010)

2.7.2. Mano Marcus

Este modelo se observa en la Figura 22, está compuesto de tres dedos incluyendo el pulgar. Solamente posee dos grados de libertad y está acondicionado con servomotores; posee sensores de efecto Hall, para determinar la posición del pulgar para el agarre de objetos, y un sensor de fuerza en el dedo pulgar, para limitar la fuerza al momento del contacto con los elementos que se desea manipular. (Quinayás, 2010)

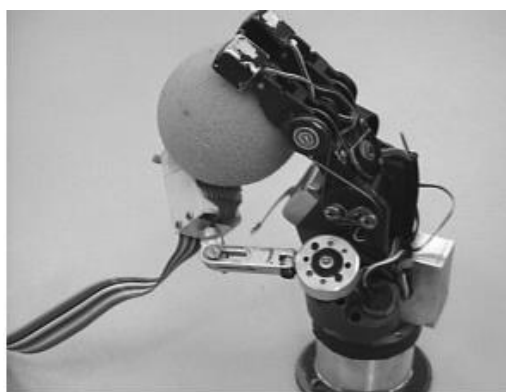


Figura 22. Mano Marcus
Fuente: (Quinayás, 2010)

2.7.3. Schunk SVH

La mano SVH presentada en la Figura 23, es de la empresa alemana Schunk, es una mano robótica avanzada con 5 dedos que reproduce de manera semejante los 20 grados de libertad que tiene la mano humana. La mano incorpora toda la electrónica dentro de su estructura cuenta con sensores táctiles en los dedos y una superficie elástica que asegura el agarre de objetos. La muñeca de la mano no dispone de ningún movimiento, pero está completamente preparada para acoplarse a brazos robóticos. (Trolle, 2016)



Figura 23. Schunk SVH
Fuente: (Trolle, 2016)

2.7.4. Pinza de area FXCB

Schmalz es una empresa alemana que ofrece una gama de paquetes completos que están optimizados para su robot Kuka, entre las herramientas robóticas que fabrica se encuentra la pinza de área FXCB mostrada en la Figura 24, la misma que tiene estructura ligera, las partes de la misma vienen en juego y su montaje al robot es sencillo. Esto significa que la solución de agarre preconfigurada está lista para su uso en un período de tiempo extremadamente corto. (Schmalz, 2018)



Figura 24. Pinza FXCB
Fuente: (Schmalz, 2018)

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LA HERRAMIENTA ROBÓTICA

3.1. Parámetros de diseño mecánico

En este capítulo se pretende describir de forma rápida los parámetros o requisitos generales con los que debe contar la herramienta robótica para lograr su funcionamiento; además se va a buscar alternativas de materiales existentes en el mercado ecuatoriano para ponerlos en uso en este proyecto; en primer lugar, es necesario precisar y delimitar las funciones que se pretende realice la herramienta tomando en cuenta el medio en el que se va a implementar.

3.1.1. Tipos de agarre

La herramienta robótica consta de una palma, tres dedos y en cada uno de ellos tiene dos falanges en total son 6 grados de libertad. Debido al uso del sistema sub-actuado, se consigue que los dedos se adapten a la forma de los objetos, con lo que es posible que la herramienta robótica tome fácilmente los objetos que se encuentran en el laboratorio de Robótica Industrial tales como piezas uniformes, pedazos de madera, piezas cilíndricas y piezas no uniformes; se estableció que la herramienta realice dos tipos de agarre, el tradicional y a detalle, esto se determinó gracias a la comparación de los agarres que realiza una mano humana.

a. Agarre tradicional

Este tipo de agarre se usa para objetos medianos o grandes, para poder tomar dichos elementos es necesario utilizar los 3 dedos ya que esto dará mayor estabilidad a la pieza en el momento de sujeción; se estima que la herramienta envuelve al objeto cuando la circunferencia del mismo está rodeada en más del 50 %.

Como se señala en la Figura 25, los tipos de agarre según los puntos de contacto de la herramienta con el objeto pueden ser 5,4,3 o 2 puntos; la destreza que tiene la herramienta para agarrar los objetos de diferentes tamaños, tiene que ver con las dimensiones de la palma, las falanges y de los límites de los ángulos de los grados de libertad.

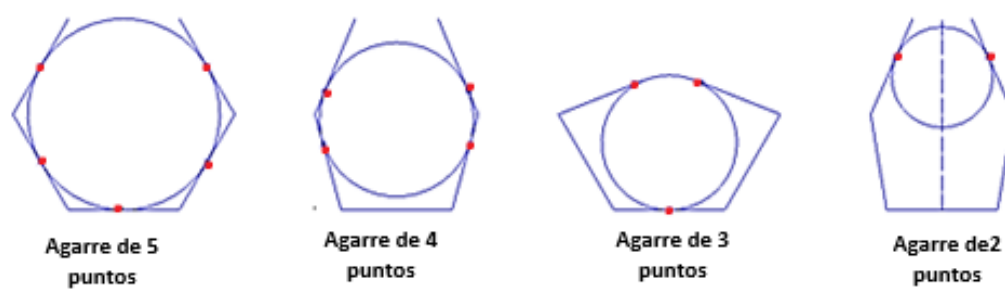


Figura 25. Tipos de agarre según los puntos de contacto con el objeto
Fuente: (Gert, 2011)

Se provee un agarre de cinco puntos siempre y cuando el objeto tenga puntos de unión con las superficies de todas las falanges y de la palma. Dado el caso de que no haya contacto con la palma, se tendrá unión en cuatro puntos únicamente. En el caso de tres puntos de contacto, estarán implicadas las falanges distales y la palma. Finalmente, cuando se da un agarre con unión de dos puntos se hará contacto entre el objeto y las falanges distales.

b. Agarre a detalle

En este tipo de agarre se tiene que cumplir con dos características de equilibrio fundamentales, para el funcionamiento de la herramienta robótica.

- Debe existir equilibrio geométrico
- Equilibrio de fuerzas

3.1.2. Mecanismo de 4 barras

Para lograr el movimiento deseado de los grados de libertad (GDL) o articulaciones de la herramienta, se requiere implementar un mecanismo que permita tener movimientos semejantes a los de los dedos humanos, esto para que se pueda manipular los diferentes objetos de la forma adecuada. El mecanismo de 4 barras es el más adecuado para este proyecto, porque permite la transmisión de movimiento a partir de barras rígidas que se encuentran conectadas de tal forma que se puede describir una trayectoria deseada, este mecanismo es uno de los más utilizados en el diseño de prótesis de mano.

Como se percibe en la Figura 26, se tiene el modelo general de un mecanismo de 4 barras, el cual está integrado por tres barras móviles y una fija. Es necesario aplicar la Ley de Grashof para definir el tipo de movimiento que se realizara con el mecanismo.

La ley de Grashof se aplica únicamente para mecanismos de 4 barras ; Grashof afirma que “un mecanismo de cuatro barras tiene al menos una articulación de revolución completa, si y solo si la suma de las longitudes de la barra más corta y la barra más larga es menor o igual que la suma de las longitudes de las barras restantes”. (Mecapedia, 2019)

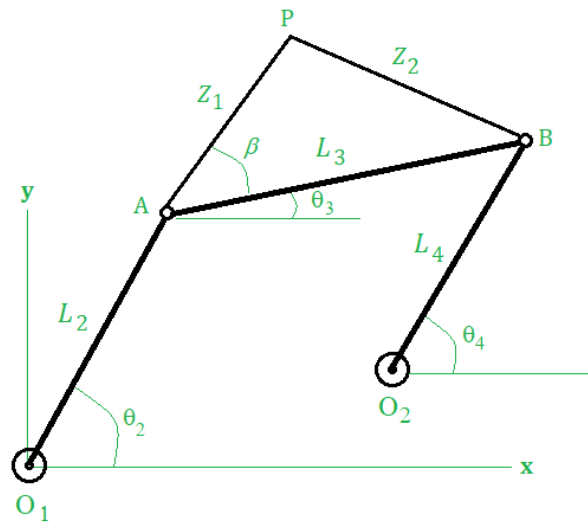


Figura 26. Mecanismo de 4 barras generalizado
Fuente: (Castro, 2017)

3.1.3. Mecanismo doble manivela de Grashof

Un mecanismo de 4 barras en configuración doble manivela hace posible el giro acoplado de la articulación AD con la articulación AP. De esta forma, cuando la articulación AP realiza un giro de 47 grados, la articulación AD también realiza otro giro de la misma magnitud y sentido.

La Figura 27, muestra una sección del dedo con el mecanismo descrito en movimiento.

Donde:

- la barra **d** es fija.
- la barra **a** es impulsora.
- las barras **c** y **b** son seguidoras.
- se cumple la igualdad $d + a > c + b$ y $a = c$

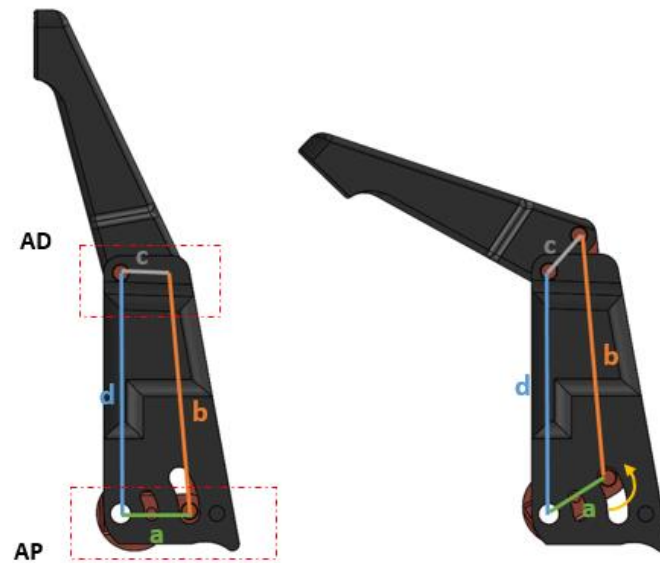


Figura 27. Sección del dedo mostrando mecanismo doble manivela

3.1.4. Mecanismo sub-actuado

El mecanismo de 4 barras permite que también se suministre a la herramienta robótica el principio de un mecanismo sub-actuado, el cual se puede observar en la Figura 28, dicho sistema es aquel que permite contar con mayor número de grados de libertad que de actuadores, al hacer uso de este sistema se disminuye el peso y el costo de la herramienta que se ha diseñado, ya que optimizamos el trabajo que realizará el actuador.

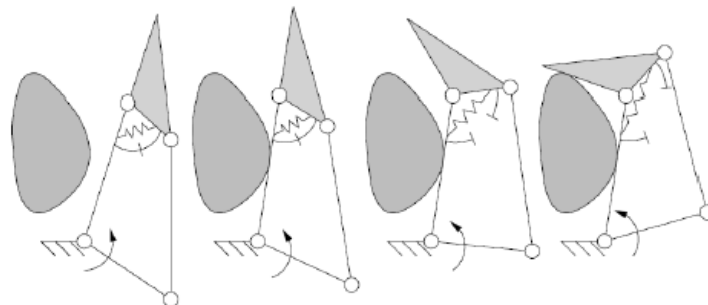


Figura 28. Movimiento de un mecanismo sub-actuado
Fuente: (Gert, 2011)

A causa del mecanismo sub-actuado se puede conseguir la adaptabilidad de los dedos de la herramienta robótica a la forma de los objetos agarrados; para alcanzar esto se deberá dimensionar las barras del mecanismo de tal manera que cumplan con los requerimientos de los objetos que se encuentran en el laboratorio de Robótica Industrial.

3.1.5. Adaptación de la herramienta con el robot Kuka KR16

Se debe buscar la mejor alternativa que permita la adaptación entre la herramienta robótica y la parte de la muñeca del robot Kuka KR16; los parámetros que se consideran en este aspecto son: la facilidad de montar y desmontar la herramienta, buena sujeción, peso de la herramienta.

3.1.6. Fabricación de la herramienta robótica mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Bajo la técnica de modelado por deposición fundida se pretende fabricar las piezas que componen la estructura de la herramienta robótica, la dosificación de material plástico fundido brinda la facilidad de fabricar una amplia variedad de objetos que van desde los más sencillos hasta aquellos que cuentan diferentes detalles; entre las características de impresión 3D que aportaran un aspecto beneficioso al proyecto están: utilizan materiales duraderos, las piezas fabricadas cuentan con estabilidad en sus propiedades mecánicas a través del tiempo, calidad de las impresiones, bajo costo, reducción de tiempo de fabricación, se pueden producir piezas de diferentes volúmenes.

Los principales filamentos que se usan en la industria son livianos y resistentes al oxido. De este amplio grupo se destacan los termoplásticos como el ABS y PET, así

mismo las aleaciones de aluminio, nylon, titanio, fibra de carbono e incluso filamentos orgánicos como la madera utilizados en prótesis.

En la Tabla 1, se describe las características que debe cumplir cada parte de la herramienta; del mismo modo se presentan alternativas de distintos filamentos para constatar cuál cuenta con más ventajas para el proyecto.

Tabla 1.

Características de la estructura de la herramienta robótica

Parte de la estructura	Requerimiento	Opciones
Palma	Resistencia a golpes	<ul style="list-style-type: none"> • ABS • PET • Fibra de carbono • Madera • ASA
	Fácil de maquinar	
	Ligero	
	Resistencia mecánica	
	Resistencia a altas T°	
Dedos	Resistencia a la humedad	<ul style="list-style-type: none"> • ABS • PET • Fibra de carbono • Madera • ASA
	Resistencia al impacto	
	Fácil de maquinar	
	Durabilidad alta	
	Resistente al calor	
	Liviano	
Ejes	Resistentes	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminio • Titanio • Acero • Acero inoxidable
	Livianos	
	Durabilidad alta	
	Silenciosos	
	Livianos	
Tapa de la herramienta robótica	Resistente al calor	<ul style="list-style-type: none"> • ABS • PET • ASA
	Alta durabilidad	
	Liviana	
	Resistencia al impacto	

3.2. Diseño mecánico de la herramienta

El diseño de la herramienta robótica consta de tres partes fundamentales, la primera es el acople de la herramienta al robot, será la parte encargada del montaje y desmontaje de toda la herramienta, así mismo cuenta con una palma que estará anexada a tres dedos Figura 29, estos a su vez estarán formados por dos falanges, la distal y proximal; para conocer las dimensiones de cada una de estas partes se debe tomar en cuenta las medidas y peso de los objetos que se ubican en el laboratorio de Robótica Industrial, tomando en cuenta esta consideración se ha decidido limitar el agarre de objetos que tengan un máximo diámetro 150 mm y un peso de 4 000 gramos .

Se van a desarrollar los parámetros de diseño con un peso superior, esta suposición se va a efectuar ya que se requiere que los objetos no se deslicen; como se estableció anteriormente el mecanismo generador de trayectoria que se va a implementar es un mecanismo de 4 barras que a su vez será sub-actuado.

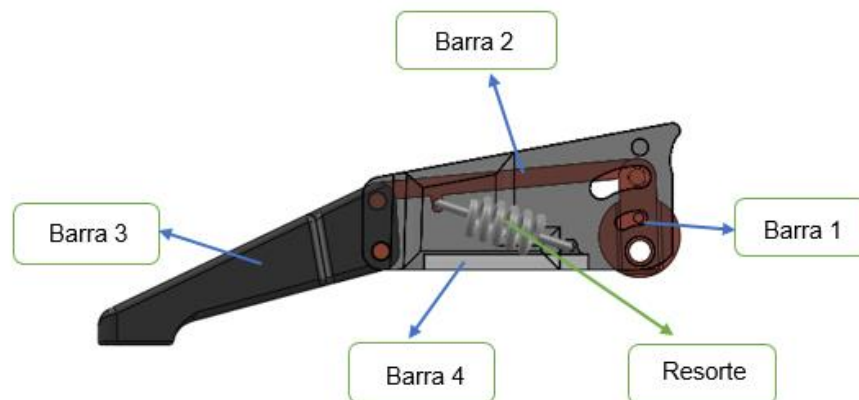


Figura 29. Dedo compuesto por mecanismo de 4 barras sub-actuado

En la Figura 30, se presenta el diseño que tienen los dedos de la herramienta Robótica, como se observa el mecanismo consta de 4 barras, cuyas medidas se determinan más adelante, de igual manera cuenta con un resorte el cuál facilitará el retorno de la barra 3.

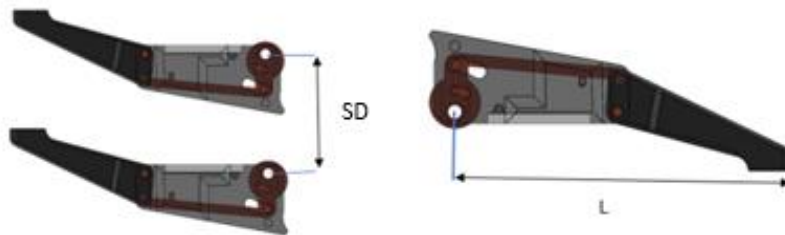


Figura 30. Dimensiones generales

La separación entre los dedos (SD) debe ser la razonable como para poder agarrar los objetos. Respecto a las medias de las falanges y ancho de los dedos se referenciará las medidas de un dedo estándar.

3.2.1. Cálculos para agarre tradicional

Como se explicó anteriormente el agarre normal cuenta con cinco tipos de agarre el de 5,4,3 o 2 puntos de contacto; en los cálculos para el agarre normal se van a definir las dimensiones de los dedos, se analizará el agarre de 5 puntos de contacto ya que a causa poseer más puntos de contacto presenta un mayor equilibrio y también posibilita la disminución de los cálculos de diseño. Partiendo de esto, se obtiene las longitudes estimadas de L1, L2 y L3; los objetos del laboratorio de Robótica Industrial se encuentran en un rango $L3 \leq r_{obj} \leq 75 \text{ mm}$; visualizar la Figura 31, para reconocer los datos descritos.

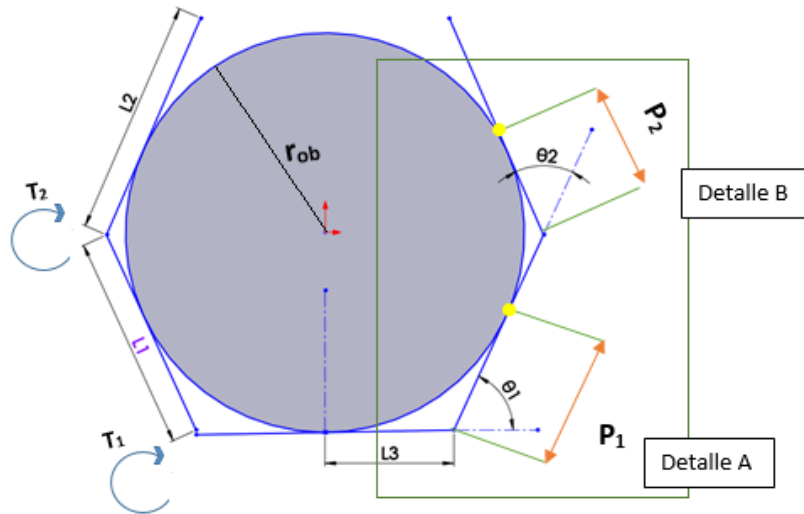


Figura 31. Variables a calcular de la herramienta

Se iniciarán los cálculos a partir de las ecuaciones de cierre del mecanismo; es indispensable empezar desde aquí ya que es la base del estudio cinemático de cualquier mecanismo. Empleando relaciones geométricas se encuentran los ángulos que son semejantes y las medidas que se necesitan para obtener las componentes de cada vector que constituye polígono formado por el mecanismo.

En la Figura 32, se indica que, para la falange proximal, es decir la parte siguiente a la palma se asigna el detalle A, a continuación, se realizan sumas de vectores y se obtiene la siguiente ecuación:

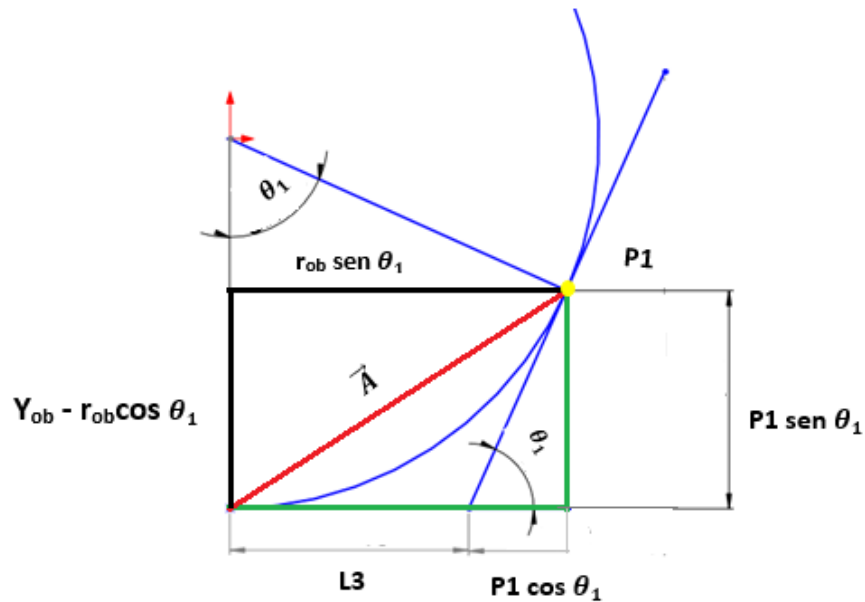


Figura 32. Datos del detalle A

$$\vec{A} = (L_3 + P_1 \cos \theta_1) \vec{x} + (P_1 \sin \theta_1) \vec{y} \quad \text{Ecu. 1}$$

$$\vec{A} = (r_{ob} \sin \theta_1) \vec{x} + (Y_{ob} - r_{ob} \cos \theta_1) \vec{y} \quad \text{Ecu. 2}$$

Al igualar los componentes en 'x' y en 'y' resulta la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} L_3 + P_1 \cos \theta_1 \\ P_1 \sin \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{ob} \sin \theta_1 \\ Y_{ob} - r_{ob} \cos \theta_1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecu. 3}$$

En la Ecu. 3, el punto P_1 es el lugar donde se existe contacto entre el objeto y la falange proximal; Y_{ob} es la distancia que hay entre el centro del objeto y la palma. En el desarrollo del análisis Y_{ob} es igual al r_{oj} , ya que se está considerando un agarre de 5 puntos.

Para la falange distal Figura 33, se va a obtener ecuaciones semejantes a las anteriores; se puede observar P₂, es el punto de contacto entre el objeto y la falange distal.

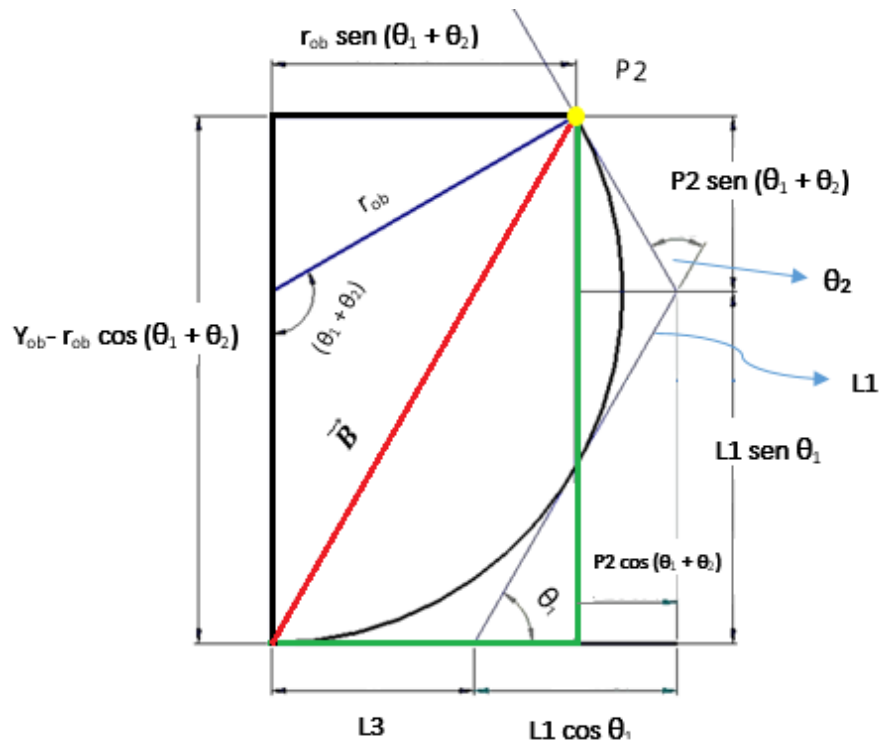


Figura 33. Datos del detalle B

$$\vec{B} = (L_3 + L_1 \cos \theta_1 + P_2 \cos(\theta_1 + \theta_2))\vec{x} + (L_1 \sin \theta_1 + P_2 \sin(\theta_1 + \theta_2))\vec{y} \quad \text{Ecu. 4}$$

$$\vec{B} = (r_{ob} \sin(\theta_1 + \theta_2))\vec{x} + (Y_{ob} - r_{ob} \cos(\theta_1 + \theta_2))\vec{y} \quad \text{Ecu. 5}$$

Al igualar los componentes en 'x' y en 'y' resulta la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} L_3 + L_1 \cos \theta_1 + P_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \sin \theta_1 + P_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{ob} \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ Y_{ob} - r_{ob} \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad \text{Ecu. 6}$$

Observando la Figura 34, se puede definir geoméricamente que $P_1=L_3$ y $P_2=L_1-L_3$

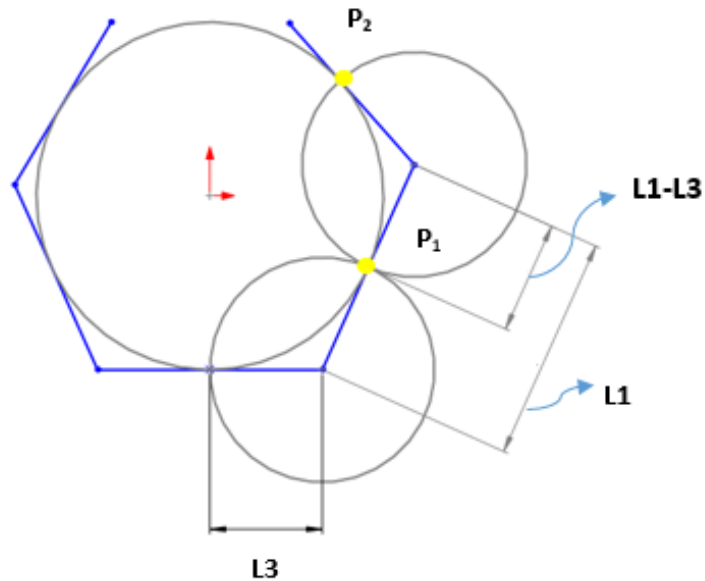


Figura 34. Análisis geométrico de P_1 y P_2

Siempre y cuando se tenga un agarre de 5 puntos de contacto se deberá satisfacer que:

$$L_3 \leq L_1 \leq L_3 + L_2 \quad \text{Ecu. 7}$$

Asimismo, para que un objeto quede envuelto, se establece que: $\theta_1 + \theta_2 \geq \pi/2$; para conocer el valor de estos ángulos se debe aplicar la ley de cosenos.

Para θ_1 :

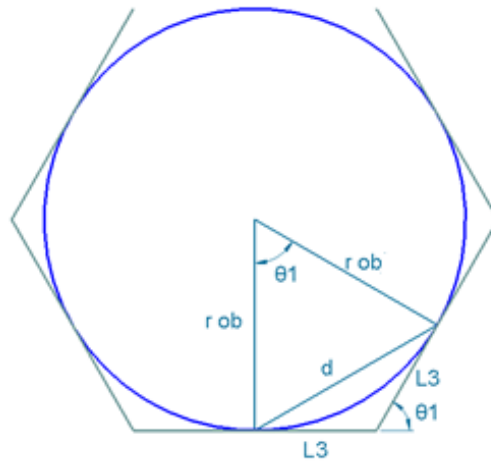


Figura 35. Cálculo de θ_1

$$d^2 = 2r_{ob}^2 - 2r_{ob}^2 \cos \theta_1 \quad (I)$$

$$d^2 = 2L_3^2 - 2L_3^2 \cos(180 - \theta_1) \quad (II)$$

Aplicando la identidad trigonométrica:

$$\cos(A - B) = \cos(A) * \cos(B) + \text{sen}(A) * \text{sen}(B)$$

Se tiene:

$$\cos(180 - \theta_1) = \cos(180) * \cos(\theta_1) + \text{sen}(180) * \text{sen}(\theta_1)$$

$$\cos(180 - \theta_1) = -1 * \cos(\theta_1) + 0 * \text{sen}(\theta_1)$$

$$\boxed{\cos(180 - \theta_1) = -\cos(\theta_1)} \quad (III)$$

Reemplazando en (III) en (II)

$$d^2 = 2L_3^2 + 2L_3^2 \cos(\theta_1) \quad (IV)$$

Igualando (I) y (IV)

$$(I) = (IV)$$

$$2r_{ob}^2 - 2r_{ob}^2 \cos\theta_1 = 2L_3^2 + 2L_3^2 \cos(\theta_1)$$

$$2r_{ob}^2 - 2L_3^2 = 2r_{ob}^2 \cos\theta_1 + 2L_3^2 \cos(\theta_1)$$

$$r_{ob}^2 - L_3^2 = \cos\theta_1(r_{ob}^2 + L_3^2)$$

Despejando $\cos\theta_1$:

$$\cos\theta_1 = \frac{r_{ob}^2 - L_3^2}{r_{ob}^2 + L_3^2}$$

Ecu. 8

Para θ_2 :

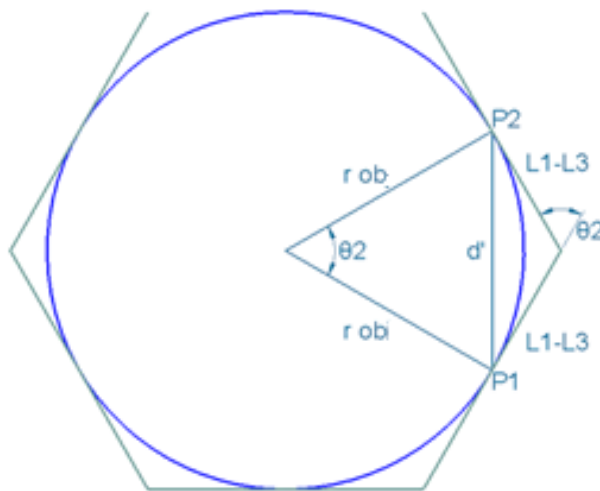


Figura 36. Cálculo de θ_2

De la misma manera se aplica la ley de cosenos

$$d'^2 = 2r_{ob}^2 - 2r_{ob}^2 \cos\theta_2 \quad (V)$$

$$d'^2 = 2(L_1 - L_3)^2 - 2(L_1 - L_3)^2 \cos(180 - \theta_2) \quad (VI)$$

Aplicando la identidad trigonométrica:

$$\cos(A - B) = \cos(A) * \cos(B) + \text{sen}(A) * \text{sen}(B)$$

Se tiene:

$$\cos(180 - \theta_2) = \cos(180) * \cos(\theta_2) + \text{sen}(180) * \text{sen}(\theta_2)$$

$$\cos(180 - \theta_2) = -1 * \cos(\theta_2) + 0 * \text{sen}(\theta_2)$$

$$\boxed{\cos(180 - \theta_2) = -\cos(\theta_2)} \quad (VII)$$

Reemplazando en (VII) en (VI)

$$d'^2 = 2(L_1 - L_3)^2 + 2(L_1 - L_3)^2 \cos(\theta_2) \quad (VIII)$$

Igualando (V) y (VIII)

$$(V) = (VIII)$$

$$2r_{ob}^2 - 2r_{ob}^2 \cos\theta_2 = 2(L_1 - L_3)^2 + 2(L_1 - L_3)^2 \cos(\theta_2)$$

$$2r_{ob}^2 - 2(L_1 - L_3)^2 = 2r_{ob}^2 \cos\theta_2 + 2(L_1 - L_3)^2 \cos(\theta_2)$$

$$r_{ob}^2 - (L_1 - L_3)^2 = \cos\theta_2 (r_{ob}^2 + (L_1 - L_3)^2)$$

Despejando $\cos\theta_2$:

$$\cos\theta_2 = \frac{r_{ob}^2 - (L_1 - L_3)^2}{r_{ob}^2 + (L_1 - L_3)^2} \quad \text{Ecu. 9}$$

Por último, para conseguir la ecuación que va a definir el mayor tamaño que va a tener el objeto que se pueden sostener, se reemplazará la Ecu. 8 y también la condición antes mencionada que $\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$, en la Ecu. 6.

Reemplazando se obtiene:

$$L_3 + L_1 \cos\theta_1 + P_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) = r_{ob} \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$L_3 + L_1 \left(\frac{r_{ob}^2 - L_3^2}{r_{ob}^2 + L_3^2} \right) + P_2 \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = r_{ob} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$L_3 + L_1 \left(\frac{r_{ob}^2 - L_3^2}{r_{ob}^2 + L_3^2} \right) + P_2 * (0) = r_{ob} * (1)$$

$$L_3 + L_1 \left(\frac{r_{ob}^2 - L_3^2}{r_{ob}^2 + L_3^2} \right) = r_{ob}$$

Sacando mínimo común múltiplo (MCM)

$$\frac{L_3 * (r_{ob}^2 + L_3^2) + L_1 * (r_{ob}^2 - L_3^2)}{r_{ob}^2 + L_3^2} = r_{ob}$$

Multiplicación de términos:

$$L_3(r_{ob}^2 + L_3^2) + L_1(r_{ob}^2 - L_3^2) = r_{ob}(r_{ob}^2 + L_3^2)$$

$$L_3 r_{ob}^2 + L_3^3 + L_1 r_{ob}^2 - L_1 L_3^2 = r_{ob}^3 + r_{ob} L_3^2$$

Igualando a 0 la ecuación:

$$L_3 r_{ob}^2 + L_3^3 + L_1 r_{ob}^2 - L_1 L_3^2 - r_{ob}^3 - r_{ob} L_3^2 = 0$$

Agrupando términos con factor común

$$r_{ob}^3 - (L_3 + L_1)r_{ob}^2 + L_3^2 r_{ob} + L_1 L_3^2 = 0 \quad \text{Ecu. 10}$$

Para facilitar la resolución de la Ecu. 10 se ingresó la ecuación cúbica a un software de resolución matemático, arrojando el siguiente resultado:

$$r_{ob} \leq \frac{1}{2} \left(L_1 + \sqrt{L_1^2 - 4L_3^2 + 4L_3 L_1} \right)$$

Como se ha mencionado varias veces los cálculos se están desarrollando para el agarre de 5 puntos de contacto, en consecuencia, de esto el radio del objeto será el mismo que el radio máximo que puede tomar la herramienta robótica.

Entonces:

$$r_{ob,máx} \leq \frac{1}{2} \left(L_1 + \sqrt{L_1^2 - 4L_3^2 + 4L_3 L_1} \right) \quad \text{Ecu. 11}$$

Se derivada la Ecu. 11 con respecto a L3, con el fin de optimizar el máximo valor o medida de la palma (L3).

$$\frac{d}{dL_3} = \frac{d}{dL_3} \left(\frac{1}{2} L_1 \right) + \frac{d}{dL_3} \left(\frac{1}{2} \sqrt{[(L_1^2 - 4L_3^2 + 4L_3 L_1)]} \right)$$

$$\frac{d}{dL_3} = 0 + \frac{1}{2} \times \frac{\frac{d}{dL_3}((L_1^2 - 4L_3^2 + 4L_3L_1))}{2\sqrt{[(L_1^2 - 4L_3^2 + 4L_3L_1)]}}$$

$$\frac{d}{dL_3} = \frac{1}{2} \times \frac{((-8L_3^2 + 4L_1))}{2\sqrt{[(L_1^2 - 4L_3^2 + 4L_3L_1)]}}$$

Se iguala a 0 la función derivada para encontrar los puntos críticos de la función, es decir, $r'_{ob}=0$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{-8L_3 + 4L_1}{2\sqrt{L_1^2 - 4L_3^2 + 4L_3L_1}} \right) = 0$$

Despejando L1:

$$-8L_3 + 4L_1 = 0 * \frac{\sqrt{L_1^2 - 4L_3^2 + 4L_3L_1}}{\frac{1}{2}}$$

$$-8L_3 + 4L_1 = 0$$

$$L_3 = \frac{L_1}{2}$$

Ecu. 12

De la Ecu. 12 se despeja L1

$$L_1 = 2L_3$$

Reemplazando 'L1' en Ecu. 11

$$r_{ob,máx} \leq \frac{1}{2} \left(2L_3 + \sqrt{2L_3^2 - 4L_3^2 + 4L_3 \cdot 2L_3} \right)$$

$$r_{obj,max} \leq \frac{1}{2} \left(2L_3 + \sqrt{4L_3^2 - 4L_3^2 + 8L_3^2} \right)$$

Sumando términos semejantes

$$r_{obj,max} \leq \frac{1}{2} (2L_3 + \sqrt{8}L_3)$$

Agrupando términos semejantes

$$r_{obj,max} \leq \frac{1}{2} (2 + \sqrt{8})L_3$$

Despejando L3

$$\frac{2(r_{obj,max})}{(2 + \sqrt{8})} \leq L_3$$

Debido a lo establecido que el diámetro máximo de objetos será de 150 mm, se reemplaza $r_{obj,max} = 75mm$ y se obtiene el valor de L3.

$$\frac{2(75)}{(2 + \sqrt{8})} \leq L_3$$

$$L_3 \geq 31.06$$

Se incrementa un 5% del valor obtenido, para que el resultado sea fiable.

$$L_3 \geq 32.61$$

$$L_1 \geq 65.22$$

Se parte de Ecu.8 y Ecu.9 para calcular los valores de θ_1 y θ_2 :

Reemplazando los valores se obtiene:

Para θ_1 :

$$\cos\theta_1 = \frac{r_{ob}^2 - L_3^2}{r_{ob}^2 + L_3^2}$$

$$\cos\theta_1 = \frac{75^2 - 32.61^2}{75^2 + 32.61^2}$$

$$\cos\theta_1 = 0,68$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}(0,68)$$

$$\theta_1 = 47^\circ$$

Para θ_2 :

$$\cos\theta_2 = \frac{r_{ob}^2 - (L_1 - L_3)^2}{r_{ob}^2 + (L_1 - L_3)^2}$$

$$\cos\theta_2 \leq \frac{75^2 - (65.22 - 32.61)^2}{75^2 + (65.22 - 32.61)^2}$$

$$\cos\theta_2 \leq 0,68$$

$$\theta_2 \leq \cos^{-1}(0,68)$$

$$\theta_2 \leq 47^\circ$$

Se debe poner la condición, que el valor de θ_1 y θ_2 sean menores o iguales a 47° , ya que, en el agarre a detalle se estima que la falange distal se mantenga lo menos flexionada posible, esto para poder tomar objetos pequeños.

Para los ángulos $\theta_{1,1}$ y $\theta_{2,1}$: el radio del objeto será igual al radio del objeto que tenga menor tamaño, es decir $r_{ob}=r_{ob, \min}=L_3$

Reemplazando datos en $\cos\theta_{1,1}$ y $\cos\theta_{2,1}$

$$\cos\theta_{1,1} \geq \frac{r_{ob}^2 - L_3^2}{r_{ob}^2 + L_3^2}$$

$$\cos\theta_{1,1} \geq \frac{32.61^2 - 32.61^2}{32.61^2 + 32.61^2}$$

$$\theta_{1,1} \geq 90^\circ$$

Se coloca la condición de mayor o igual que 90 grados para los ángulos $\theta_{1,1}$ y $\theta_{2,1}$, debido a que, en el agarre de detalle, se puede obtener un incremento del ángulo al momento de tomar objetos pequeños.

$$\cos\theta_{2,1} \geq \frac{r_{ob}^2 - (L_1 - L_3)^2}{r_{ob}^2 + (L_1 - L_3)^2}$$

$$\cos\theta_{2,1} \geq \frac{32,61^2 - (65.22 - 32.61)^2}{32,61^2 + (65.22 - 32.61)^2}$$

$$\cos\theta_{2,1} \geq 90^\circ$$

Los valores que se han obtenido, aun no son definitivos. Estos pueden variar dependiendo del resto de condiciones que se ha planteado. Se dará preferencia a las condiciones que logren un buen funcionamiento del mecanismo.

Para calcular la longitud total del dedo se suma L_1 y L_2 , el dato obtenido anteriormente indica que $L_1 \geq 65.22$, se aproxima a 66 mm para mantener la estética del

diseño. La longitud total del dedo se toma como referencia de (Lopesino, 2018), quien dice que el valor máximo promedio de un dedo medio es 125 mm; con base en esto se asume que $L = 125 \text{ mm}$

Entonces:

$$L = L_1 + L_2$$

$$L_2 = L - L_1$$

$$L_2 = 125 - 66$$

$$L_2 = 59 \text{ mm}$$

3.2.2. Cálculos del mecanismo Sub-actuado

Como primer paso, se analizará el número de grados de libertad que existen en el diseño.

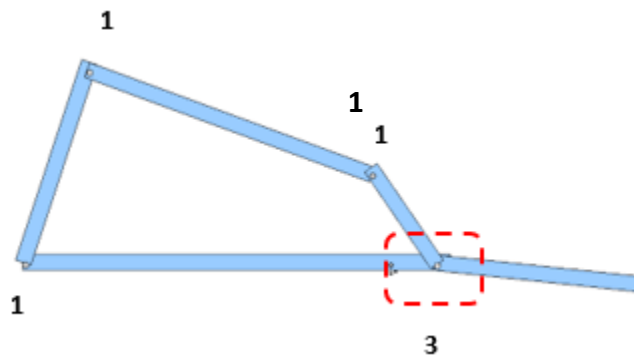


Figura 37. Mecanismo simplificado del dedo

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

Ecu. 13

Donde:

- m = grados de libertad
- n = número de eslabones
- j_1 = uniones simples (1 grado de libertad)
- j_2 = uniones medias (2 grados de libertad)

Tabla 2.*Datos del mecanismo del dedo*

Datos del mecanismo	
n	5
j_1	5
j_2	0

Reemplazando datos de la Tabla 2, en la Ecu. 13, se tiene que

$$m = 3(5 - 1) - 2 * 5 - 0$$

$$m = 2$$

El mecanismo presenta dos grados de libertad. Por lo general esto significaría que se necesita 2 actuadores para mover el mecanismo, pero al ser un mecanismo sub-actuado, solo se utilizará 1 actuador.

Utilizando las consideraciones de (Lopesino, 2018) mencionadas en los cálculos anteriores para el diseño del dedo, se tiene que el eslabón de entrada $a=30$ y $L=105$.

Donde:

- Eslabón de entrada $a = 30$
- Longitud total = 125
- Longitud del eslabón b

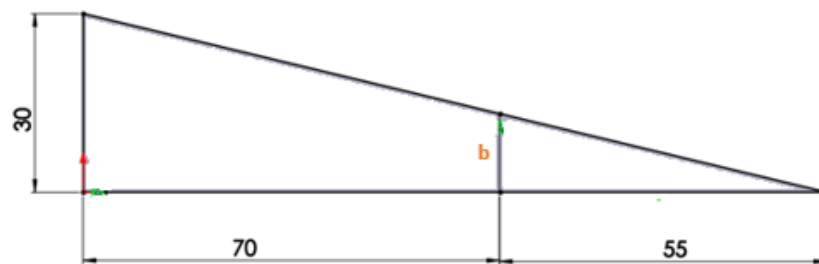


Figura 38. Medidas del dedo

Se realiza semejanza de triángulos

$$\frac{30}{125} = \frac{b}{55}$$

$$b = 13.6$$

En la Tabla 3, se detalla los ángulos del movimiento del mecanismo de 4 barras; los subíndices, i y f significan inicial y final respectivamente.

Tabla 3.
Designación de ángulos iniciales y finales

Ángulo	Nombre
$\theta_{a,i}$	Ángulo a inicial
$\theta_{a,f}$	Ángulo a final
$\theta_{b,i}$	Ángulo b inicial
$\theta_{b,f}$	Ángulo b final

En la Figura 39, en la parte **a)** se observa el mecanismo de forma inicial y **b)** al aplicar movimiento en el ángulo $\theta_{a,i}$, se observa los demás ángulos que conforman en mecanismo varían también; de esta forma se genera cambio de posición de los eslabones que constituyen el mecanismo.

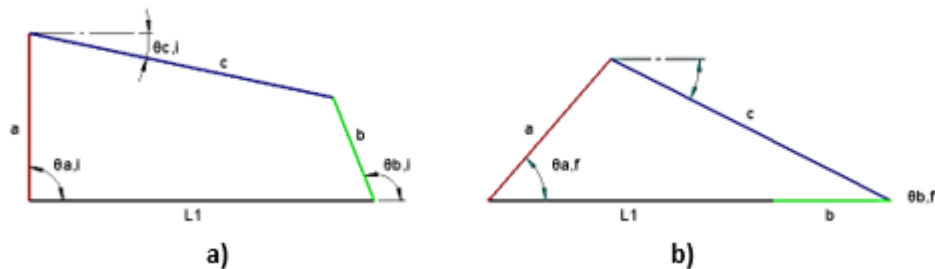


Figura 39. Movimiento del mecanismo

En la Figura 40, se comprueba mediante software lo mencionado anteriormente; se varía $95,81^\circ$ en $\theta_{b,i}$ den el eslabón b.

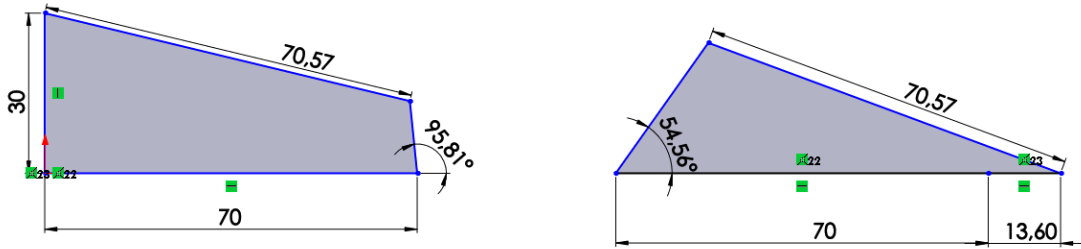


Figura 40. Comprobación de movimiento

A continuación, en la Figura 41, visualiza el diseño CAD de la herramienta aplicando todos los cálculos obtenidos



Figura 41. Diseño CAD de la herramienta

3.3. Análisis y validación de diseño

3.3.1. Cálculo de la fuerza

Se define que la masa de los objetos que se encuentra en el laboratorio está alrededor de 4 kg, a razón de este valor se calcula el peso máximo que puede tomar la herramienta robótica.

$$P = m * g$$

Reemplazando datos

$$P = 4 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$P = 39.2 \approx 40 \text{ N}$$

3.3.2. Esfuerzo de Von Mises ejercido en el dedo

En la figura 42, se puede visualizar los esfuerzos de Von Mises que son producidos en el dedo a causa de la carga que se le aplica, el valor mínimo de deformación es $3,559e^{+004} \text{ N/m}^2$, como se nota en el análisis del dedo el esfuerzo es casi despreciable.

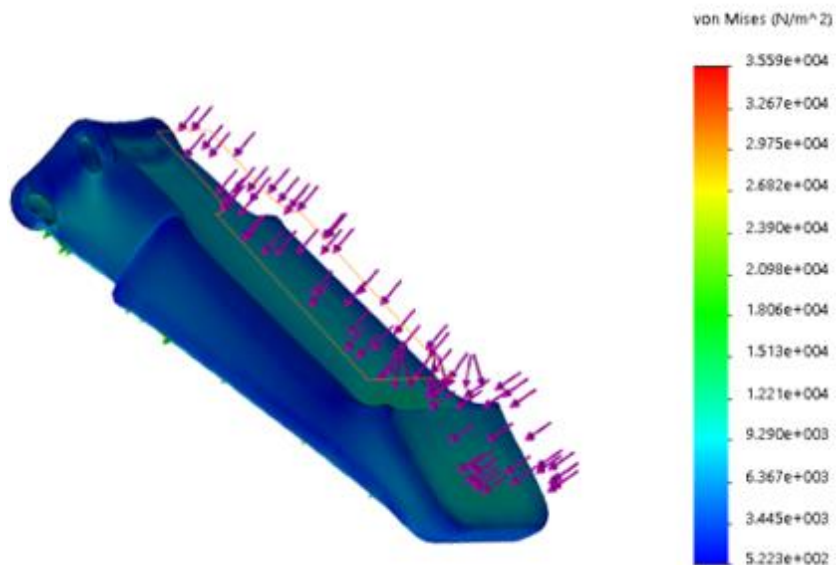


Figura 42. Deformación total del dedo

3.3.3. Factor de seguridad del dedo

Como se presenta en la Figura 43, el factor de seguridad crítico del dedo es $N = 2$, se contempla un diseño seguro ya que está dentro del factor de seguridad mínimo de una estructura.

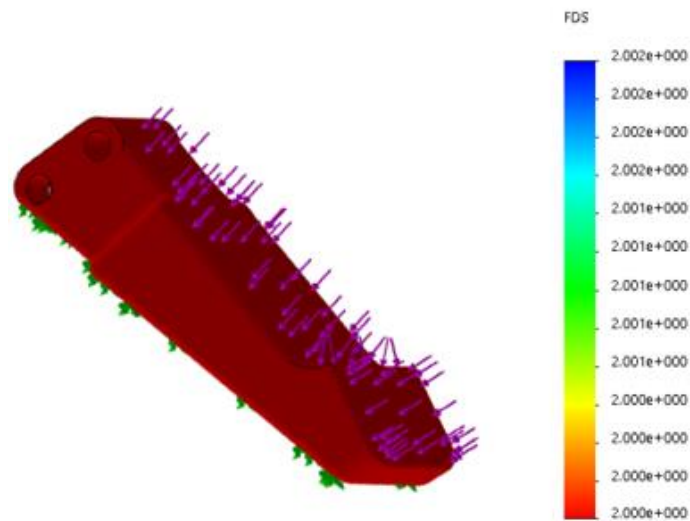


Figura 43. Factor de seguridad de dedo

3.3.4. Análisis de Von Mises para el acople

Para desarrollar el análisis de Von Mises de la pieza que acopla la herramienta con el robot Kuka KR16, se aplicó una carga de 144 N (Gonzales Juan, 2015) alrededor de las paredes del acople, los resultados se observan en la Figura 44, estos denotan que el material en este caso el ABS no cede en el lugar donde se aplicó la carga.

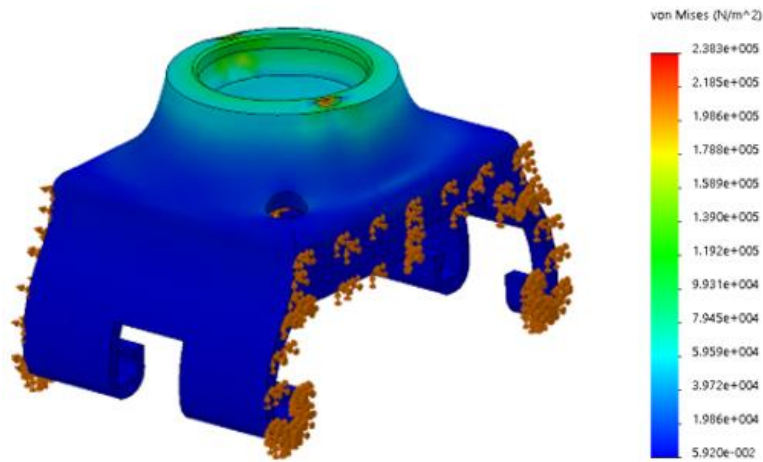


Figura 44. Análisis de Von Mises del acople de la herramienta robótica

3.3.5. Factor de seguridad del acople de la herramienta

En la Figura 45, se presenta el factor de seguridad crítico del acople es $N = 3$, se contempla un diseño y capaz de soportar la carga; ya que está dentro del factor de seguridad mínimo $N = 2$.



Figura 45. Factor de seguridad del acople

3.3.6. Deformación de los ejes de transmisión de movimiento

En la Figura 46, se indica la deformación que se produce en el eje, el valor mínimo es de apenas $1.126e^{+003}$, este dato no se considera relevante pues, es pequeño considerando las cargas ejercidas sobre este eje; ya que es el encargado de transmitir el movimiento a los dedos y por ende al sistema sub-actuado.

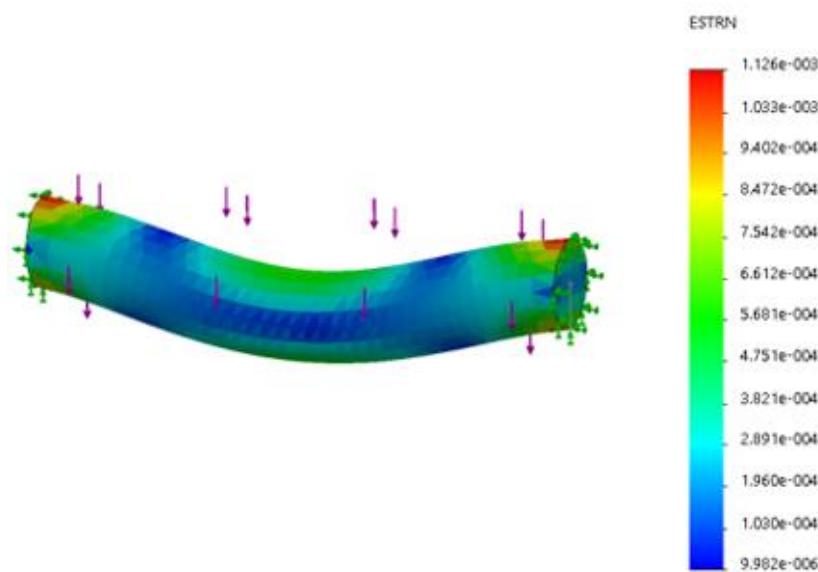


Figura 46. Deformación de los ejes de transmisión de movimiento

3.3.7. Análisis de Von Mises del acople del dedo

En la Figura 47, se aplicó una fuerza máxima de 40 N en la parte inferior de la ranura debido a que este punto es crítico al momento de sujetar los objetos, como se puede ver este punto no va a sufrir ruptura.

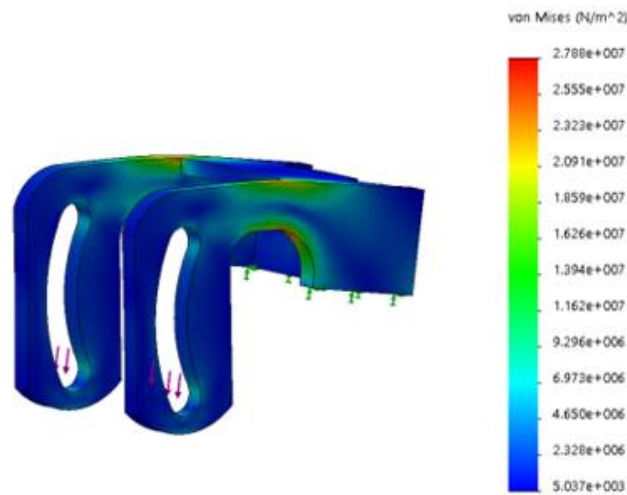


Figura 47. Análisis de Von Mises del acople del dedo

3.4. Selección de materiales para la estructura

Se pretende utilizar el mismo filamento para fabricar las partes que conforman la herramienta robótica, las mismas que son: palma, dedos y acople de la herramienta al robot Kuka KR16; se tomó en cuenta las principales necesidades de la herramienta y se buscó alternativas de filamentos que probablemente satisfacen estas necesidades debido a que se emplean en la Industria, ver Tabla 4.

Tabla 4.
Alternativas de filamentos

Necesidades	Alternativas de filamento
<ul style="list-style-type: none"> Alta resistencia a impactos Precio 	ABS
<ul style="list-style-type: none"> Facilidad del procesado Alta durabilidad 	PET
Liviano	Nylon
Buena resistencia mecánica	ASA
Resistente a altas temperaturas	Fibra de carbono

CONTINUA



Stock en el mercado local

Madera

Se ha seleccionado el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), este filamento cubre en mayor parte las necesidades, filamentos como PET, titanio y fibra de carbono tienen un costo elevado. En cambio, el filamento de madera contiene un 70% aproximadamente de PLA, por lo que sus características mecánicas no son las ideales.

Tabla 5.
Principales características técnicas del ABS

CARACTERÍSTICA	DESEMPEÑO
Resistencia a la abrasión	Elevada
Permeabilidad	Todos los grados son considerados impermeables al agua, pero ligeramente permeables al vapor
Propiedades relativas a la fricción	No los degradan los aceites, son recomendables para cojinetes sometidos a cargas y velocidades moderadas
Estabilidad dimensional	La baja capacidad de absorción de la resina y su resistencia a los fluidos fríos, contribuyen a su estabilidad dimensional
Pigmentación	La mayoría de resinas están disponibles en colores estándar, es posible pigmentar, aunque se necesita equipo de uso específico
Facilidad de unión	Se unen fácilmente entre sí y con materiales plásticos de otros grupos mediante cementos y adhesivos
Facilidad de maquinado	Características similares a las de los metales no ferrosos, se pueden barrenar, fresar, torneear, aserrar y troquelar
Resistencia térmica	Alta
Peso específico	Bajo

Fuente: (PROADEC, 2011)

Con ayuda de la Tabla 5, se puede observar que el ABS abarca las necesidades de la herramienta para lograr un buen desempeño mecánico.

Por último, en la Tabla 6, se realiza la verificación de la funcionalidad del filamento ABS respecto a las necesidades de las partes de la estructura de la herramienta robótica.

Tabla 6.

Verificación de la correcta selección del ABS

NECESIDAD	DESEMPEÑO
Resistente a golpes	✓
Alta durabilidad	✓
Proceso de manufactura sencillo	✓
Liviano	✓
Resistente al agua	✓
Resistente a altas temperaturas	✓

3.5. Estudio de la resistencia a la compresión del ABS

A continuación, se hará una breve descripción del estudio realizado, se exhibe el comportamiento del polímero ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) el cual fue sometido a ensayos mecánicos de compresión considerando dos patrones de relleno, rectangular y hexagonal; estos patrones se seleccionaron debido a la disposición geométrica de su estructura interna, ya que esta condición mejora las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D, además del aumento en la fuerza tensil.

Se desarrollaron probetas bajo la norma ASTM D695 del año 2015, las cuales fueron fabricadas mediante modelado por deposición fundida (FDM); los especímenes que se imprimieron contaron con un 80% de material de relleno esto se debe al requerimiento mecánico exigente en aplicaciones de ingeniería. Los resultados se indican en la Figura 48, los cuales reflejan que el patrón de relleno rectangular a 0° y 90° fue el que registró la mayor resistencia a la compresión obteniendo como resultado una fuerza promedio de compresión de 4 179.92 N así mismo un porcentaje de deformación de 5.96% y un esfuerzo máximo de compresión de 33.147 MPa. A causa de los datos evidenciados el patrón rectangular es útil para aplicaciones de ingeniería e industria inclusive se pueden sustituir partes de autos, maquinaria o electrodomésticos.



Figura 48. Resultados del ensayo mecánico de compresión

3.5.1. Ensayo de compresión

Para la realización de este estudio se utilizó el termoplástico ABS por tal motivo se empleó la norma ASTM D695-15; similar a la ISO 604, esta determina las propiedades de compresión de materiales plásticos rígidos; el ABS es también un material isotrópico es decir las propiedades mecánicas o eléctricas son las mismas en las tres direcciones

X, Y o Z, de acuerdo a la norma en ese caso se debe realizar cinco probetas por cada patrón. (Salvatore Brischetto, 2017)

3.5.2. Materiales usados para el ensayo mecánico de compresión

El filamento que se usó fue el ABS de la marca ANET en color amarillo y plomo, es de alta calidad con un diámetro de 1.75mm y peso de 1kg, empacados al vacío, “tiene variaciones de diámetro +/-0.1mm, redondez +/-0.05mm” (Jia, 2018) , las principales características de este filamento son: excelentes propiedades mecánicas, buena adherencia entre capas; da buen acabado y también tiene una deformación mínima, no es tóxico y es biodegradable. (Vukasovic Herrero, 2018)

La impresora 3D que se usó para la fabricación de las probetas fue una Creality Ender 3 Pro Figura 49, no profesional, esta es capaz de brindar impresiones de alta calidad. “Las medidas con las que cuenta el área de trabajo son 220x220x250 mm y también tiene cama magnética”. (Locker, 2019)

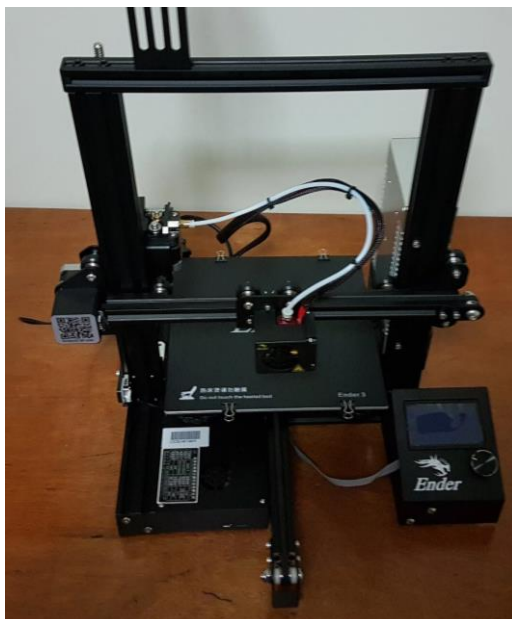


Figura 49. Impresora Ender 3

El equipo empleado en las pruebas fue una máquina de ensayos universal Polímeros Metrotest 50 kN, modelo MTE 50 y serie 8210M002. La cuál se configuro a una velocidad de 1.3mm min^{-1} , de acuerdo a la norma ASTM D695-15.

3.5.3. Características de fabricación de las probetas

Las probetas que se utilizaron para el ensayo mecánico se fabricaron mediante Modelado por deposición fundida, las medidas de las probetas fueron 12.7mm de diámetro por 25.4mm (cilindro) las cuales están dadas por la norma que se utilizó; los diseños CAD de las probetas se pasaron al formato de Lenguaje de triángulo estándar (*STL*); a continuación se importó al software Cura 3.6 que es específico para impresión 3D, es relevante comentar que la orientación de la probeta ya sea éste horizontal o vertical se decide al momento de prepararlo para su impresión, en este caso se utilizó la forma horizontal para que se adhiriera mejor en las primeras capas, se incorporó soportes adecuados para mantener la forma cilíndrica, produciendo diez muestras en total, el

patrón de relleno que se usó fue hexagonal y rectangular a 0° y 90° con un porcentaje de relleno del 80 %, en la Figura 50, se visualizan los patrones de relleno utilizados.

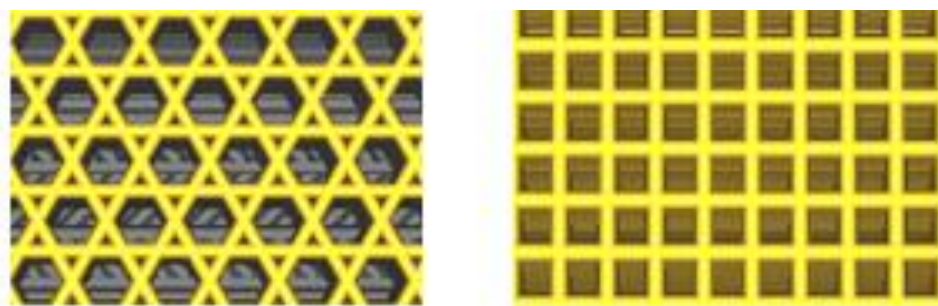


Figura 50. Patrón de relleno de hexagonal y rectangular a 0° y 90°

3.5.4. Resultados

Cada una de las probetas se sometieron a ensayos mecánicos de compresión en la maquina Polímeros Metrotest 50 kN, las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa se midieron al respectivo momento de la prueba, para el patrón hexagonal los datos fueron 24.8 °C con 48,5% de humedad y para el rectangular fueron 25.1 °C con 50.4% de humedad; los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7 y Tabla 8, los valores corresponden a la Fuerza máxima compresión, Esfuerzo máximo de compresión, Esfuerzo de fluencia, Módulo de elasticidad y porcentaje de deformación.

Tabla 7.

Resultados del patrón de relleno hexagonal sometido a compresión

HEXAGONAL				
Probeta	Fuerza máxima de compresión [N]	Esfuerzo máximo de compresión [MPa]	% de deformación	Módulo de elasticidad [MPa]
1	3179.28	25.02	6.64	376.99
2	3 171.39	25	6.44	388.16

CONTINUA 

3	3 322.86	26.27	6.92	379.87
4	3 303.93	26.16	6.78	385.85
5	3 275.53	25.82	6.86	376.5
Promedio \bar{X}	3 250.598	25.653	6.726	381.474
Desviación estándar S_{n-1}	70.795	0.613	0.191	5.276
Coeficiente de variación CV	2.178	2.391	2.844	1.383

Tabla 8.

Resultados del patrón de relleno rectangular sometido a compresión

RECTANGULAR				
Probeta	Fuerza máxima de compresión [N]	Esfuerzo máximo de compresión [MPa]	% de deformación	Módulo de elasticidad [MPa]
1	4 036.03	32.16	5.25	612.46
2	4 409.97	34.76	6.18	562.22
3	3 870.36	30.79	5.05	610.38
4	4 383.15	34.55	6.18	559.05
5	4 200.12	33.47	7.17	466.81
Promedio \bar{X}	4 179.926	33.147	5.966	562.185
Desviación estándar S_{n-1}	229.764	1.670	0.852	59.070
Coeficiente de variación CV	5.497	5.039	14.275	10.57

Estos valores se adquirieron en el desarrollo de la prueba de compresión e indican cada una de las características mecánicas que tienen los patrones de relleno. El valor promedio del esfuerzo máximo de compresión tanto para la probeta hexagonal, así como

para la rectangular superan valores referenciales de resistencia a la compresión de materiales como el hormigón (17 a 28 MPa) pero inferior al aluminio (91 a 1 676 MPa).

La desviación estándar de los parámetros analizados indica que los ensayos realizados son representativos de un fenómeno, como se observa la SD del esfuerzo máximo de compresión en el patrón rectangular es de 1.670 estadísticamente el valor de Poisson es de 0.994 con un 95% de confianza lo que significa que el método de impresión es reproducible.

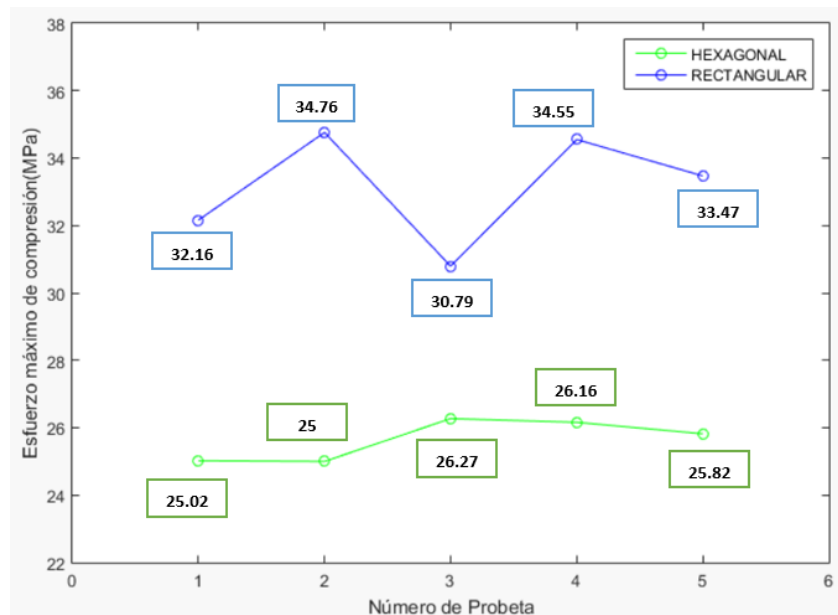


Figura 51. Esfuerzo máximo de compresión (MPa) en cada una de las probetas

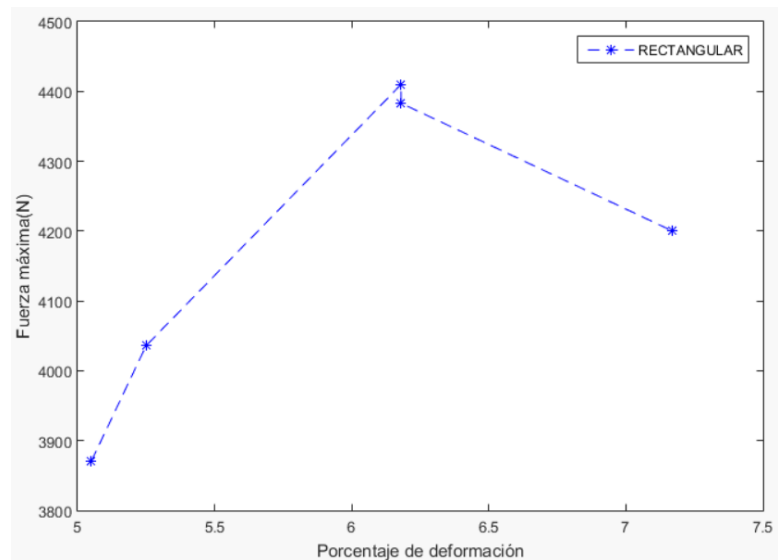


Figura 52. Fuerza máxima vs deformación, patrón rectangular

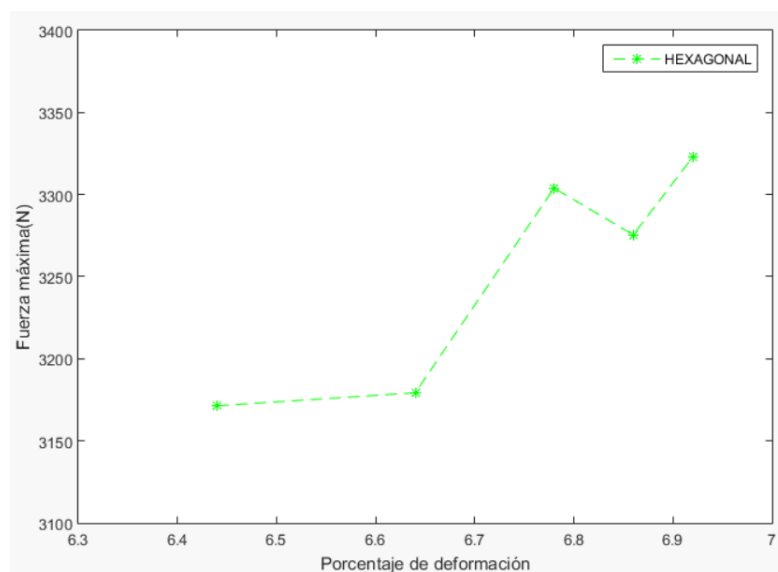


Figura 53. Fuerza máxima vs deformación, patrón hexagonal

La Figura 51, indica como reaccionaron cada una de las probetas hexagonales y rectangulares al esfuerzo máximo de compresión, esto determina que el patrón rectangular tiene una menor deformación al estar sometido a un esfuerzo, una estructura

ofrece mayor resistencia a la compresión. La Figura 52 y Figura 53, muestran la fuerza máxima que se aplicó a cada probeta respecto al porcentaje de deformación, como se puede observar el patrón rectangular tiene menor deformación a pesar de soportar más fuerza que el patrón hexagonal, pues el hexagonal cuenta con una deformación de 6.72%; y la diferencia de fuerza aplicada es de 929.328 N, una variación muy significativa debido al uso industrial al que se van a someter.

El valor promedio del módulo de elasticidad o también llamado módulo de Young del patrón hexagonal es 381.474 MPa y del rectangular es 562.185 MPa, se evidencia que el patrón hexagonal es el que soporta menor esfuerzo es decir es menos rígido y tiene mayor facilidad de doblarse al aplicar carga.

El esfuerzo máximo que se puede aplicar en el ABS impreso con forma rectangular sin causar una deformación plástica es 30.505 MPa, con una fuerza de fluencia de 3846.692 N. Existe una significativa diferencia entre la fuerza de fluencia rectangular pues es mayor con 843.182 N a las impresiones hexagonales.

3.5.5. Conclusión del ensayo mecánico de compresión

Una vez analizados los resultados de los ensayos mecánicos de compresión de todas las probetas de ABS se encontró que el patrón rectangular a 0° y 90° es la mejor opción cuando se requieren cargas elevadas de compresión, ya que a todas las probetas se les atribuyo las mismas características de temperatura, orientación y porcentaje de relleno con la única diferencia de su patrón de relleno. El ABS presenta la ventaja de tolerar impactos sin dañar su estructura y a su vez brinda cierta flexibilidad; por lo tanto, se va a aplicar las mismas características de impresión 3D y por ende se empleará el filamento ABS para la fabricación de las piezas que forman la estructura de la herramienta robótica.

CÁPITULO IV

DISEÑO ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

4.1. Parámetros de diseño electrónico

Este capítulo detalla los requerimientos de todo el diseño electrónico de la herramienta robótica, se tiene que cumplir dos parámetros importantes en este apartado, el primero son los componentes electrónicos que formarán parte de la herramienta como tal; y el segundo es la comunicación del robot Kuka KR16 con la herramienta robótica desarrollada. Las alternativas de los materiales que se usarán se establecen de acuerdo a sus características, estas deberán cumplir con: buen funcionamiento, peso liviano, tamaño reducido, capacidad para soportar ambientes industriales, costo bajo y stock en el mercado local.

4.1.1. Actuadores

Dentro de los tipos de actuadores existentes se encuentran los eléctricos, hidráulicos y neumáticos; la herramienta robótica se pretende ejecutar por medio de un accionamiento eléctrico, por tanto, el tipo de actuador más competente es el eléctrico; se va a seleccionar un motor que posibilite la correcta generación del movimiento, el mismo que también será transmitido a todo el mecanismo de 4 barras sub-actuado. Al mismo tiempo se buscará un driver que facilite el control de velocidad del motor.

4.1.2. Tarjeta de control

Este dispositivo es de gran interés en la implementación de la herramienta robótica puesto que se encargará del enlace de las señales analógicas y digitales; en esta tarjeta se programará la lógica de funcionamiento de la herramienta.

4.1.3. Control de agarre de la herramienta

El control del agarre de los diferentes objetos se elaborará a partir de sensores, mediante los datos que emitan estos al instante de apretar el objeto, se desea que la herramienta examine el rango de cierre de los dedos y tengan la capacidad de quedarse firmes en aquel momento; igualmente deberán tener la destreza de soltar el objeto.

4.1.4. Alimentación

Se debe usar una fuente de energía que sea capaz de abastecer al mismo tiempo el consumo de voltaje y corriente de todos los elementos electrónicos.

4.1.5. Comunicación Kuka KR16 con herramienta robótica

Se necesita que el controlador del robot Kuka KR16 se comunique con la tarjeta de control mediante señales digitales.

4.2. Selección de los elementos electrónicos

Para lograr decisiones objetivas al momento de seleccionar los componentes electrónicos se va a utilizar la Matriz de Pugh. Es una herramienta cuantitativa que permite comparar opciones entre sí mediante una matriz de decisiones. Su aplicación más habitual es durante la fase de diseño de un producto, ya sea completamente nuevo o una actualización de uno existente.

De acuerdo a (Fuentes, 2015) el primer paso es identificar los criterios que serán evaluados. Estos son ubicados generalmente como filas de la matriz. Luego se deben especificar los posibles conceptos de diseño que apunten al cumplimiento de los criterios definidos. Los mismos aparecerán en las columnas de la matriz como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9.
Matriz de decisiones

Parámetros de selección	Alternativa de diseño 1	Alternativa de diseño 2
Criterio 1		
Criterio 2		
Criterio 3		
Criterio 4		
Criterio 5		
<i>Suma +</i>		
<i>Suma 0</i>		
<i>Suma -</i>		
SUMA GENERAL		

Fuente: (Fuentes, 2015)

A continuación, se toma la primera alternativa de diseño y se analiza criterio por criterio si su cumplimiento es superior al diseño actual, es inferior o es igual. Si es superior se coloca un signo "+", si es inferior un signo "-" y si es igual un "0". Una vez completada toda la tabla, se realiza la suma de cada columna. El concepto de diseño que obtenga un

resultado mayor, producto del balance entre aspectos positivos y negativos, será la "mejor solución". (Fuentes, 2015)

4.2.1. Motor

A. Alternativas de selección

Alternativa 1: Motor Nema 17

El motor Nema 17 que se ubica en la Figura 54, "Es bipolar, tiene un ángulo de paso de 1.8° (200 pasos por vuelta) y cada bobinado es de 1.2 A a 4 V, capaz de cargar con 3.2 kg/cm (44 oz-in). Es un motor muy robusto ampliamente utilizando en impresoras 3D caseras como las Prusa, aunque este es ligeramente más potente del recomendado para garantizar la mejor fiabilidad" (BricoGeek, 2016)



Figura 54. Motor Nema 17
Fuente: (BricoGeek, 2016)

Las características de este motor según (BricoGeek, 2016) son las siguientes:

- Tamaño: 42.3 x 48mm sin incluir eje
- Peso: 350 gr (13oz)
- Pasos por vuelta: 200

- Torque: 3.2 kg/cm (44 oz-in)
- Diámetro del eje: 5mm
- Corriente: 1.2 A
- Tensión: 4V

Alternativa 2: Motor Reductor pololu 131:1

El motor reductor que se indica en la Figura 55, “Es un potente motorreductor de CC con escobillas cuenta con un encoder de cuadratura integrado con 64 conteos por revolución (CPR) del eje del motor” según menciona (Pololu Robotics & Electronics, 2017)



Figura 55. Motor reductor pololu 131:1
Fuente: (Pololu Robotics & Electronics, 2017)

Las características que describe (Pololu Robotics & Electronics, 2017) son:

- Tamaño: 37D x 72.5mm
- Peso: 235 gr
- Pasos por vuelta: 80
- Torque: 18 kg/cm (250 oz-in)
- Diámetro del eje: 6mm

- Tensión: 12V
- Corriente: 300mA

B. Criterios de selección

Tabla 10.
Criterios de selección

Parámetros de selección	Alternativa 1	Alternativa 2
Voltaje de alimentación	+	+
Peso	+	+
Rpm	-	+
Torque	-	+
Stock en el mercado local	+	+
Tamaño	-	+
Costo	+	-
<i>Suma +</i>	4	6
<i>Suma 0</i>	0	0
<i>Suma -</i>	2	1
TOTAL	2	5

Conforme los resultados que se presentan en la Tabla 10, el motor reductor pololu 131:1 correspondiente a la alternativa 2, es la más idónea ya que cumple con la mayoría de necesidades del actuador requerido.

4.2.2. Tarjeta de control

a. Alternativas de selección

Alternativa 1: Arduino uno

“La arduino Uno es una board basada en un microcontrolador Atmega328. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 4 pueden ser utilizados para salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, un conector para USB tipo hembra, un Jack para fuente de Poder, un conector ICSP y un botón reset” (Guerrero, 2014). Esta tarjeta de control se observa en la Figura 56.



Figura 56. Arduino uno
Fuente: (Guerrero, 2014)

Según (Guerrero, 2014) el Arduino uno cuenta con las siguientes características:

- Voltaje de operación: 5V
- Voltaje de entrada (Recomendado): 7-12V
- Pines de entrada/salida digital: 14
- Entradas analógicas: 6
- Microcontrolador: ATmega328
- Velocidad del reloj: 16MHZ

Alternativa 2: Arduino nano

La figura 57, se visualiza el modelo que tienen los arduino nano, (ElectroCrea, 2017) define a esta tarjeta de control de la siguiente manera “Es una pequeña y completa placa basada en el ATmega328. Es muy compacto y puedes ser utilizado fácilmente en un protoboard, la placa es compatible 100%. No posee conector para alimentación externa, y funciona con un cable USB Mini-B (incluido) en vez del cable estándar”

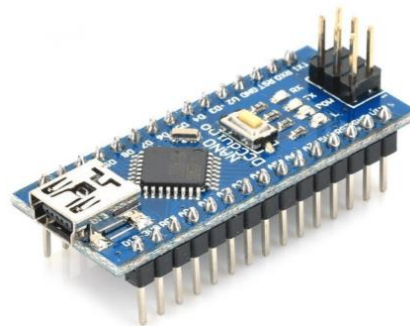


Figura 57. Arduino nano
Fuente: (ElectroCrea, 2017)

De acuerdo a (ElectroCrea, 2017) las características son:

- Entradas analógicas: 8
- Tensión de operación: 5V
- Tensión de entrada (recomendado): 7-12V
- Pines E/S digitales: 14 (6 proveen salida PWM)
- Dimensiones: 18,5mm x 43,2mm
- Frecuencia de reloj: 16MHZ

b. Criterios de selección

Para escoger la mejor alternativa se realiza la Tabla 11.

Tabla 11.
Selección de la mejor alternativa

Parámetros de selección	Alternativa 1	Alternativa 2
Facilidad de programación	+	+
Número de E/S	+	+
Voltaje de alimentación	+	+
Tamaño	-	+
Stock en el mercado local	+	+
Costo	-	+
Suma +	4	6
Suma 0	0	0
Suma -	2	0
TOTAL	2	6

Con base en los resultados obtenidos, la alternativa 2 es la más viable, entonces la tarjeta de control que se va a utilizar es Arduino nano.

4.3. Diseño electrónico del sistema de control

Para lograr la conexión entre todos los elementos del sistema electrónico, se basó en tres etapas principales de funcionamiento, las que se presentan a continuación:

- Etapa de Entrada
- Etapa de Proceso o Control
- Etapa de Salida



Figura 58. Sistema general de conexión eléctrica

En la Figura 58, se muestra de forma sencilla la interacción de las tres etapas; están relacionadas tanto la unidad de control del brazo robótico, como la tarjeta de control y el mismo brazo robótico Kuka KR16.

4.3.1. Etapa de entrada

Esta es la etapa inicial, la cual consta de dos procesos; el primero es donde se activará una entrada del arduino mediante las señales digitales que emite el módulo wago, de esta manera el mecanismo del motor se activará; el segundo proceso se obtiene mediante la lectura analógica del sensor de flexión y sensor de fuerza.

Para el primer proceso de la etapa de entrada se tiene en cuenta la importancia de la conexión del módulo wago con un relé, como se indica en la Figura 59; el trabajo de dicho relé es cerrar el circuito de la señal que se dirige a la tarjeta de control.

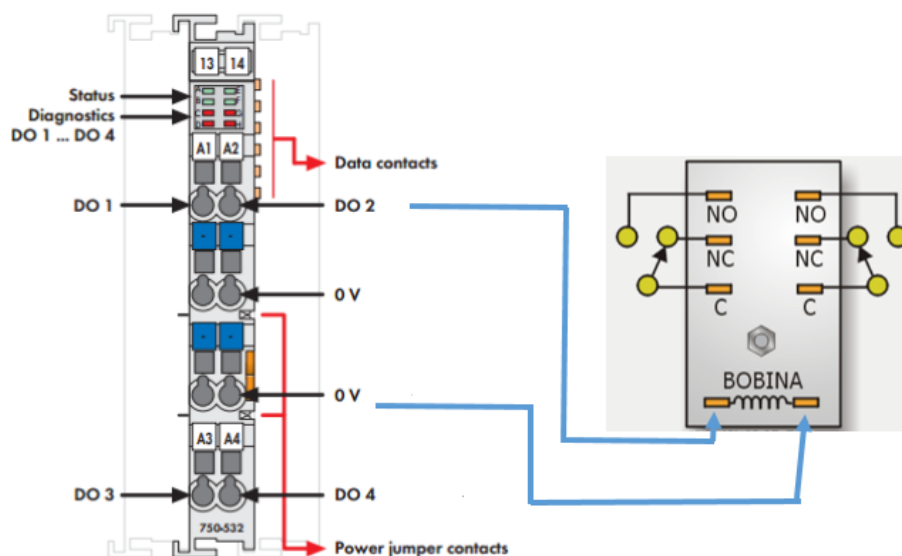


Figura 59. Conexión entre el módulo wago y relé

El GND de la fuente de alimentación externa se conecta al pin (L1) del contactor que está acoplado al relé y el pin (T1) a una entrada del arduino. Las entradas del arduino necesariamente deberán estar programadas en estado HIGH, esto evita el ruido eléctrico en las entradas del arduino.

Para el control de movimiento de los dedos se utilizó un sensor de flexión de 2.2 pulgadas el cual está conectado con una resistencia de 10K ohm, esta conexión permite saber el ángulo de inclinación de los dedos gracias a los datos analógicos que recoge el arduino.

Tabla 12.
Valores de sensores

Sensor	Valor apertura	Valor de cierre
Flexión	$90^\circ < SF < 74,3^\circ$	$74^\circ < SF < 28,6^\circ$
Fuerza	$SFU \leq 5 \text{ N}$	

En la Tabla 12, se indican los rangos de valores en los que los sensores van a trabajar; El sensor de fuerza nos permite tener un control de la cantidad de presión máxima que puede soportar el objeto, si se supera ese valor de fuerza el motor dejara de moverse.

4.3.2. Etapa de proceso o control

Para la funcionalidad de la herramienta robótica, es decir que los dedos agarren y suelten diferentes objetos, primero se debe activar una de las dos salidas digitales del módulo wago, las salidas que fueron seleccionadas son los pines 13 y 14, los mismos que realizan el cierre y apertura de los dedos respectivamente.

Una vez presionado una de las señales del módulo wago, la tarjeta de control arduino reconoce su entrada en estado LOW; acto seguido empieza el movimiento del motor acorde a la programación desarrollada. Con los valores del sensor de flexión y fuerza, se restringirá ciertos movimientos del motor, el sensor de flexión debe estar calibrado de tal manera que determine en que posición está los dedos, con ello se moverá el motor ya sea para cerrar o abrir.

4.3.3. Diagrama electrónico de parte interna de la herramienta

Como se indica en la Figura 61, el diagrama eléctrico de todas las conexiones internas está constituido por un Arduino Nano, una placa shield, un driver para el motor estos componentes se visualizan en la Figura 60.

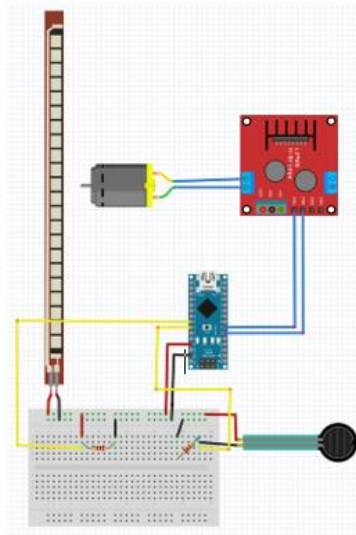


Figura 60. Componentes electrónicos

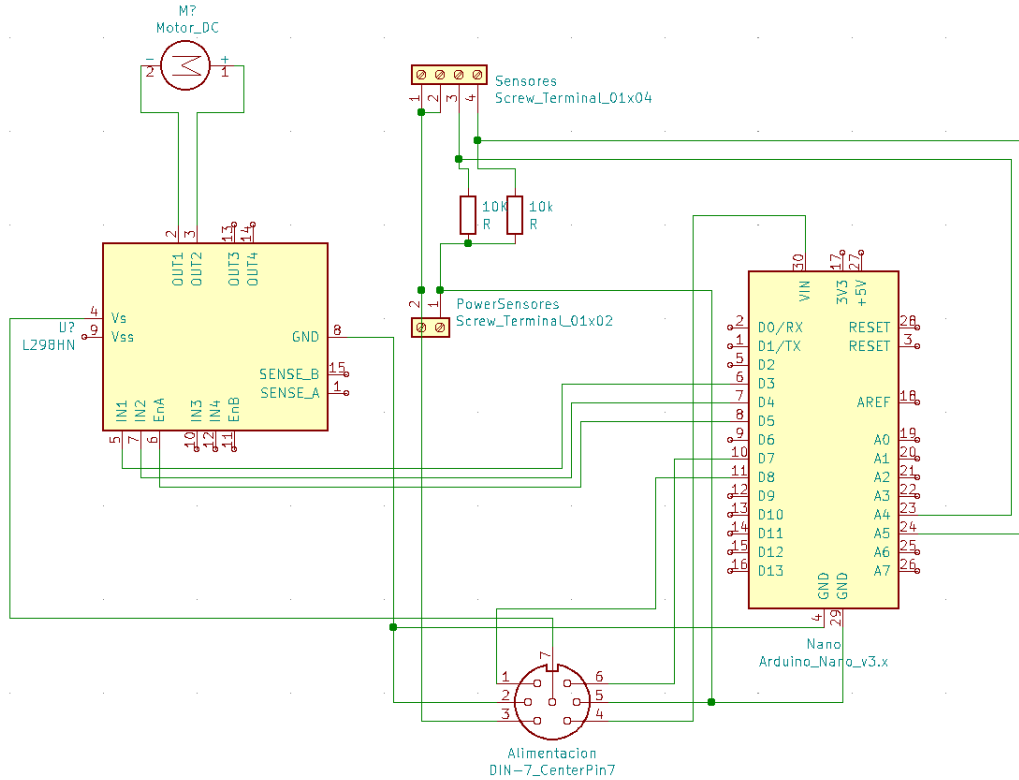


Figura 61. Diagrama electrónico de la parte interna de la herramienta

El jack de alimentación consta de 7 pines los cuales suministran energía a todo el sistema, debido a que cada elemento necesita diferente consumo de voltaje y corriente se alimentara de forma específica para cada componente, la alimentación proviene de una fuente externa.

Al momento de conectar el arduino nano con el drive de control se debe verificar que el pin Enable A se conecta a un pin PWM de la tarjeta de control, caso contrario no se podrá cambiar el valor de velocidad del motor. Los dos sensores utilizados son resistivos por lo cual se utilizó una resistencia aparte, logrando un divisor de voltaje que proporciona valores analógicos que son leídos por el arduino. Es importante tener una línea de tierra donde estarán conectados el drive del motor, arduino y sensores.

4.3.4. Etapa de salida

Dependiendo de los rangos de medida dados por el sensor de flexión, el motor va a realizar el movimiento; el puente H permite contar con tres tipos de estados, girar a la derecha, girar a la izquierda o detener el motor.

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Fabricación de la herramienta

La fabricación de todas las partes que constituyen la estructura externa de la herramienta se realizó mediante impresión 3D, a partir de archivos en formato STL obtenidos desde el diseño CAD, realizado en el capítulo III.

El diseño de ciertas partes de la estructura como paredes laterales, acoples y soportes fueron sometidas al método de prueba y error para verificar el resultado deseado, por lo que necesitaban ser modificadas durante el desarrollo del proyecto. A causa de esto resulto conveniente adquirir una impresora 3D para tener accesibilidad de correcciones en todo momento.

Con base en el estudio de la resistencia a la compresión del ABS, realizado anteriormente se determinaron los parámetros de impresión 3D que brindan mayor resistencia a la estructura de la herramienta; los datos de la Tabla 13, se reprodujeron en cada una de las piezas fabricadas.

Tabla 13.
Parámetros de impresión 3D

Parámetros de impresión 3D	
Tipo de filamento	ABS
Porcentaje de relleno	80%
Patrón de relleno	Rectangular a 0° y 90°

CONTINUA



Medida de boquilla	0,4 mm
Temperatura de cama	60 °C
Temperatura de extrusor	210 °C
Tipo de soporte	Zig zag
Densidad de soporte	5 %
Altura de capa	0,2 mm
Velocidad de impresión	30 mm/s
Tipo de adherencia a la cama	Borde

La configuración de estos parámetros se efectúa en un software específico para impresión 3D, en este caso se ha usado Ultimaker Cura; el Software utilizado brinda una vista previa Figura 61, de los resultados que se va a tener en la pieza con los datos ingresados.

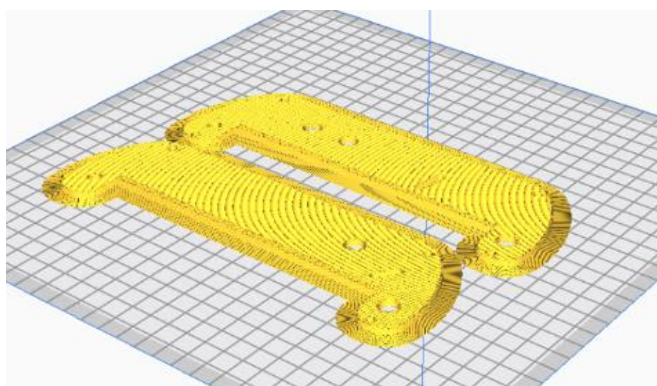


Figura 62. Vista previa de la impresión 3D

En la Figura 62, se puede observar el proceso de impresión; el tiempo de fabricación depende tanto del modelo de la pieza como también de su configuración.

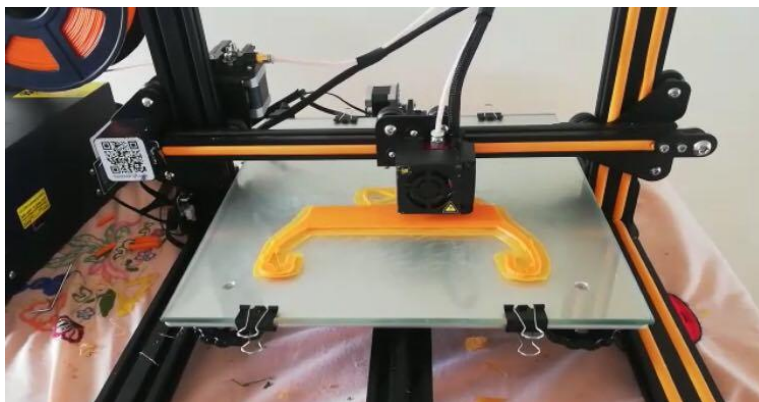


Figura 63. Impresión 3D

En la Figura 63, se encuentran varias piezas producto de la impresión 3D con los parámetros establecidos.

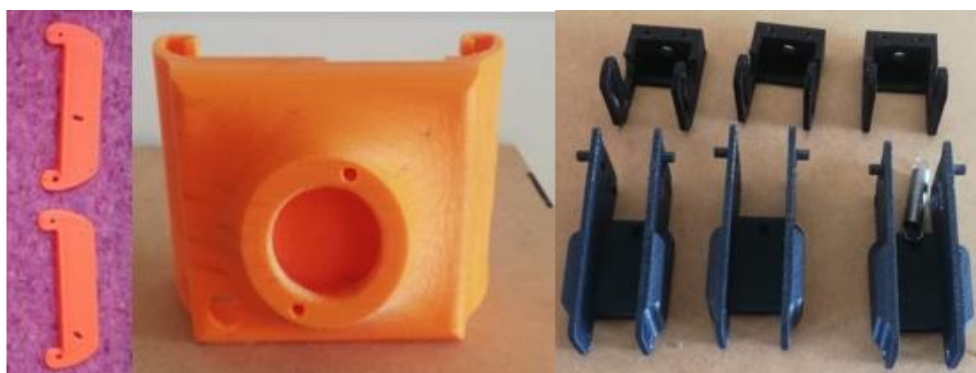


Figura 64. Piezas fabricadas en impresión 3D

Por otra parte, para obtener los ejes, engranajes cónicos y engranajes rectos fue necesario el uso de un torno; es importante mencionar que los engranajes rectos tienen una relación de 1:1, ya que solo se implementaron para invertir el sentido giro en el eje de transmisión. Los ejes se mecanizaron con pequeñas ranuras Figura 64, donde se ajustaron retenedores, estos son prefabricados y se los puede encontrar fácilmente en el mercado.



Figura 65. Mecanizado del eje

5.2. Ensamble de piezas mecánicas

La estructura externa de la herramienta robótica se compone de 42 piezas que provienen de 7 partes diseñadas distintas. Debido a su tamaño los necesarios se disponen en el ANEXO A; la mayoría de estas fueron fabricadas mediante impresión 3D, aplicando la técnica de Modelado por Deposición Fundida; por el contrario, los ejes más largos, específicamente los que transmiten el movimiento a los dedos se mecanizaron; el mismo proceso se aplicó para obtener los engranajes cónicos y rectos. En la Figura 65, se detalla la ubicación de algunas piezas.

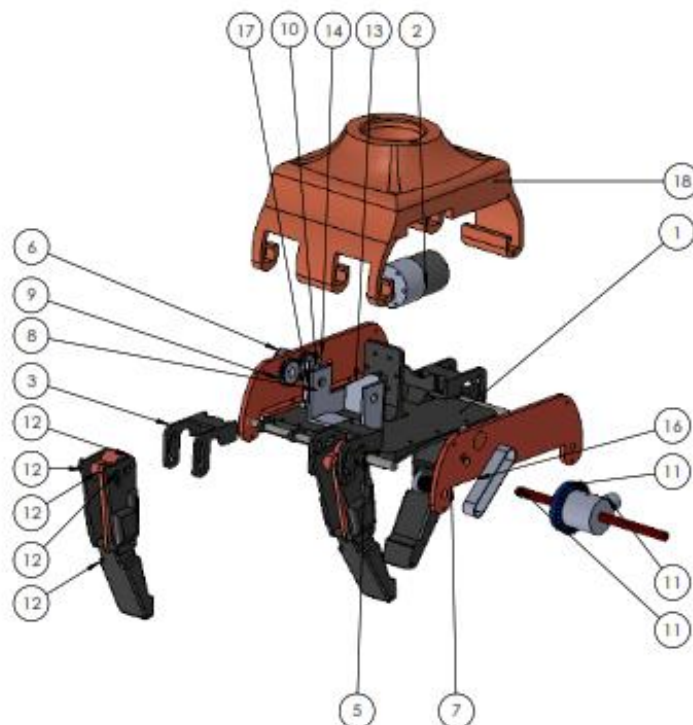


Figura 66. Partes de la estructura final

En la Tabla 14, se detalla las piezas principales que forman parte de la estructura externa y las piezas encargadas de la transmisión del movimiento a la herramienta además se muestra el material del que están fabricados.

Tabla 14.
Piezas que conforman la herramienta robótica

N° pieza	Nombre	Material
1	Palma	ABS
2	Motor	
3	Acople dedos	ABS
4	Eje frontal	Acero

CONTINUA 

5	Eje posterior	Acero
6	Polea	
7	Pared izquierda	ABS
8	Pared derecha	ABS
9	Engrane recto	Aluminio
10	Eje de polea	Acero
11	Mecanismo de transmisión	Aluminio
12	Falange distal	ABS
13	Soporte motor	Acero
14	Banda derecha	Caucho
15	Falange proximal	ABS
16	Banda izquierda	Caucho
17	Soporte engranajes rectos	ABS
18	Tapa acople	ABS

Para el ensamble de la herramienta robótica se inició por armar los componentes de los dedos, como se mira en la Figura 66, cada dedo está formado por 4 piezas principales y 3 pequeños ejes, todas estas piezas están impresas en ABS.

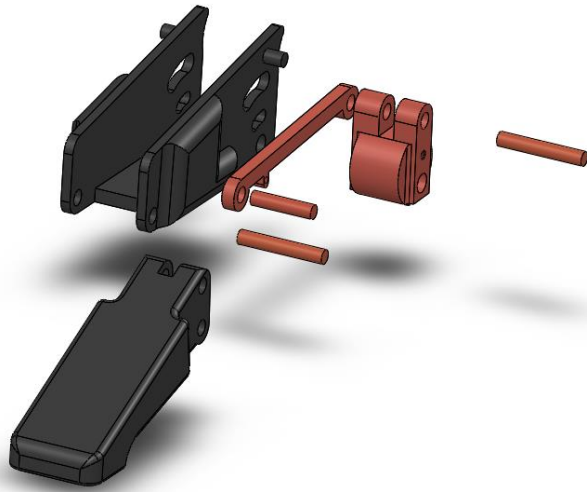


Figura 67. Partes del dedo

Después de ensamblar el dedo, ver Figura 67, se acopló un resorte en la falange proximal, bajo el eslabón del mecanismo de 4 barras, este resorte ayuda al retorno de la falange distal.

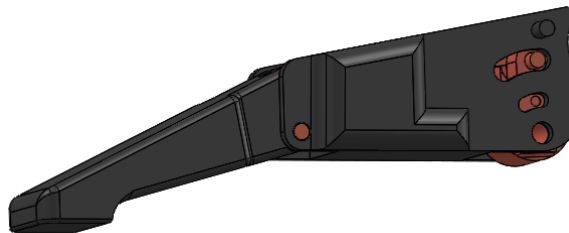


Figura 68. Dedo ensamblado

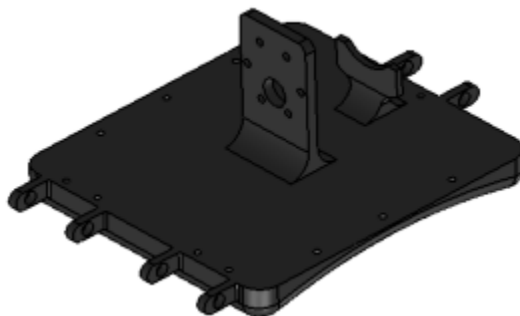


Figura 69. Palma

En la palma Figura 68, se montaron todos los componentes electrónicos que se describen en la Figura 60, además del mecanismo del movimiento, tapas laterales y los tres acoples de la Figura 69, correspondiente a cada dedo. Para la sujeción de estos acoples, se utilizaron 2 pernos de M3x8, de la misma forma las paredes laterales están sujetas cada una con 3 pernos del mismo tipo.

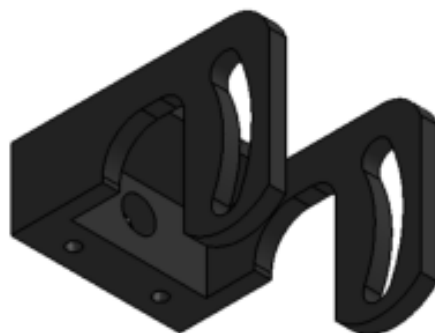


Figura 70. Acople dedo

En la Figura 70, se visualizan la pared lateral que se mencionó en la parte anterior.

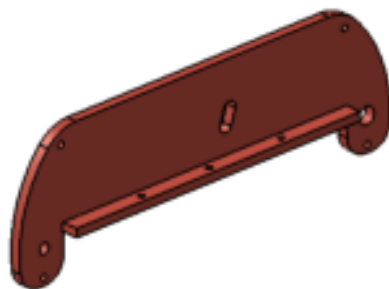


Figura 71. Pared lateral

Para sujetar el motor a la palma se utilizaron 6 pernos M3x8, es importante recalcar que los pernos deben ingresar máximo de 3mm de largo en el motor, ya que en caso de obviar esto el motor corre el riesgo de sufrir daño en su sistema de reducción.

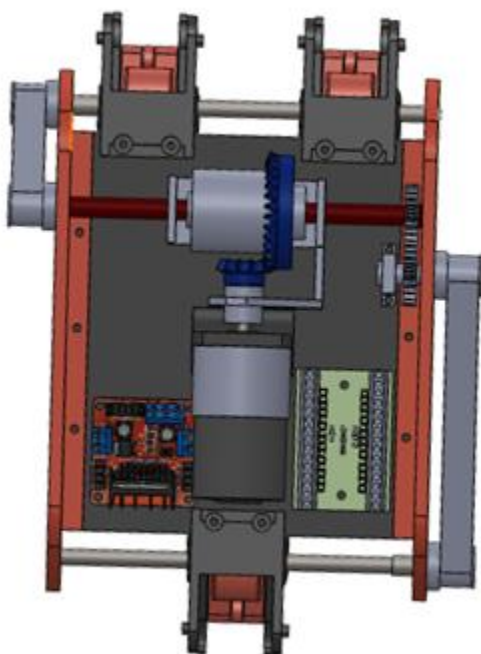


Figura 72. Acople entre el motor a su mecanismo

En la Figura 72, se observa la forma en que se colocó el motor, la palma tiene un soporte diseñado específicamente para el motor seleccionado; a diferencia del soporte

del mecanismo que se sujetó con pernos a la palma. Además, en esta figura se puede visualizar en montaje de los componentes electrónicos.

Finalmente se colocaron los tres dedos previamente ensamblados y la tapa que a su vez cumple la función de acople al Kuka KR 16; para esto se usó 2 ejes de acero sujetos mediante prisioneros de 3mm a la pieza que da movilidad del dedo.

Finalmente se colocan las dos poleas en las paredes laterales de la herramienta éstas se sujetan a los ejes de transmisión. En la Figura 73, se muestra en ensamble final de la herramienta.

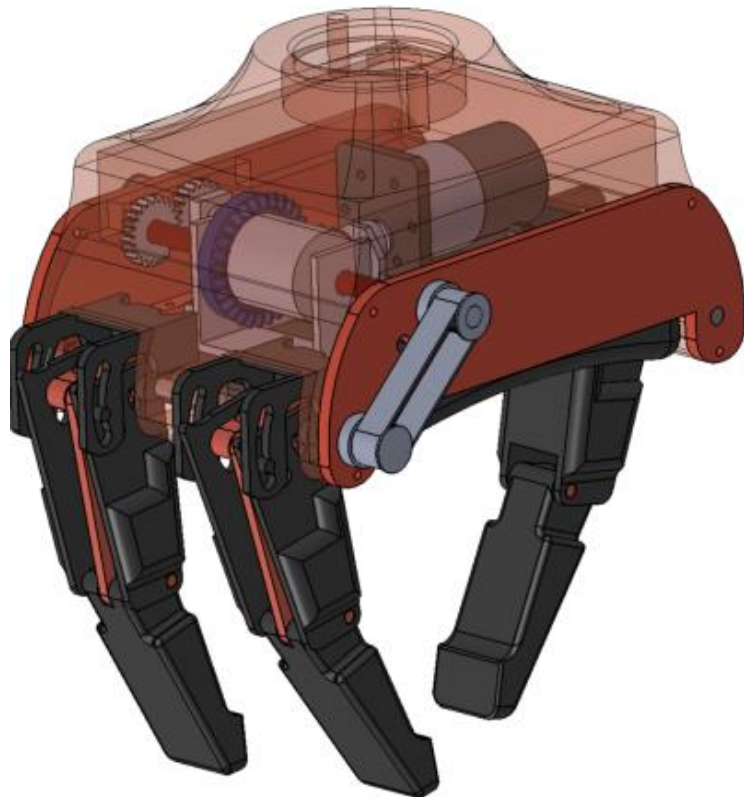


Figura 73. Ensamble final de la herramienta

5.3. Ensamble de los circuitos electrónicos y de control hacia la herramienta

Para el ensamblaje electrónico se debe cumplir ciertos parámetros de comunicación entre sistemas. Debido a la transmisión de datos y voltajes bajos, a una distancia media se utilizaron cables multifilares número 22, se usó este tipo de cable ya que no hay pérdidas de datos o voltaje en la transmisión. Los dos relés, se encuentran ubicados en el módulo WAGO y están conectados tanto a la fuente de alimentación externa como a la entrada digital del arduino.

Como se refleja en la Figura 74, la parte amarilla corresponde al módulo wago y la verde a los relés mencionados.

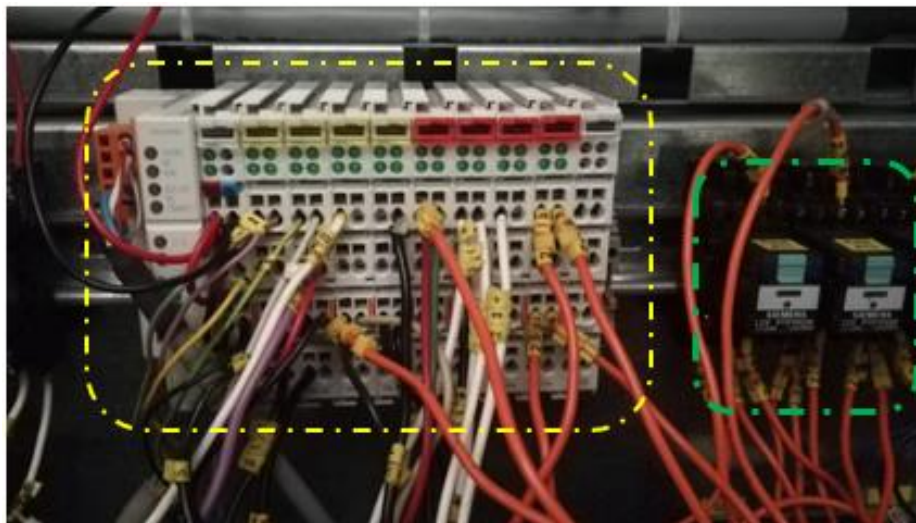


Figura 74. Módulo wago y relés

Como se visualiza en la Figura 75, los cables con numeración 255 y 256 se seleccionaron para que se dirijan hacia GND de la fuente externa; en cambio el 259 y 260 se dirigen hacia las entradas del arduino.



Figura 75. Relés

De la fuente externa se conectan 7 cables de alimentación Figura 76, 5 de ellos para alimentar los componentes electrónicos que están dentro de la herramienta en la Figura se los nombra con la letra **A** y 2 que son las señales digitales del módulo wago señalados con la letra **S**

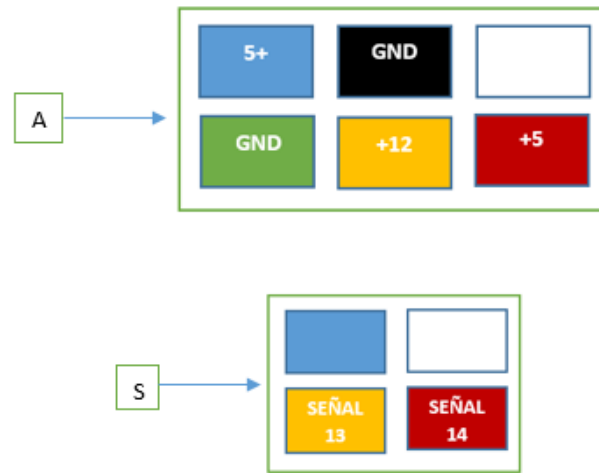


Figura 76. Cables de alimentación

Finalmente se debe conectar el cable que viene del módulo wago con el cable de la fuente, debido a que en esta conexión se transmite los 5V a cada relé y las salidas digitales del módulo wago, Figura 77.

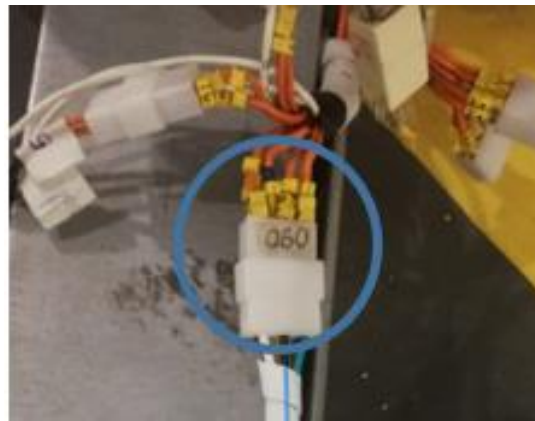


Figura 77. Cable de transmisión

Para lograr una conexión rápida y eficiente sin correr ningún riesgo de cortocircuito se implementó un conector DX16 el cual consta de 7 pines que están distribuidos como lo indica la Figura 78.

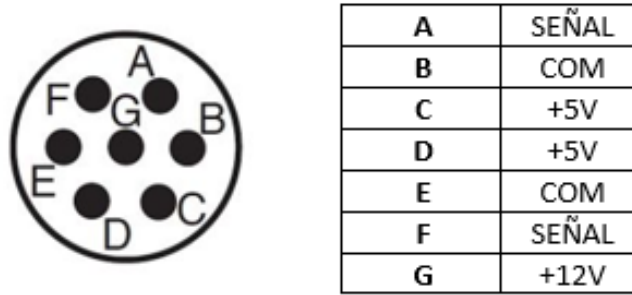


Figura 78. Designación de pines al conector DX16

En la parte electrónica que se encuentra dentro de la herramienta, se deberá tener en cuenta, unir las COM del driver de control con el arduino, a su vez el arduino con la fuente.

5.3.1. Flujograma

La Figura 79, muestra la lógica de funcionalidad de la herramienta robótica, se sintetiza de manera ordenada todo lo explicado anteriormente sobre la activación de las salidas digitales y la lectura de los sensores analógicos.

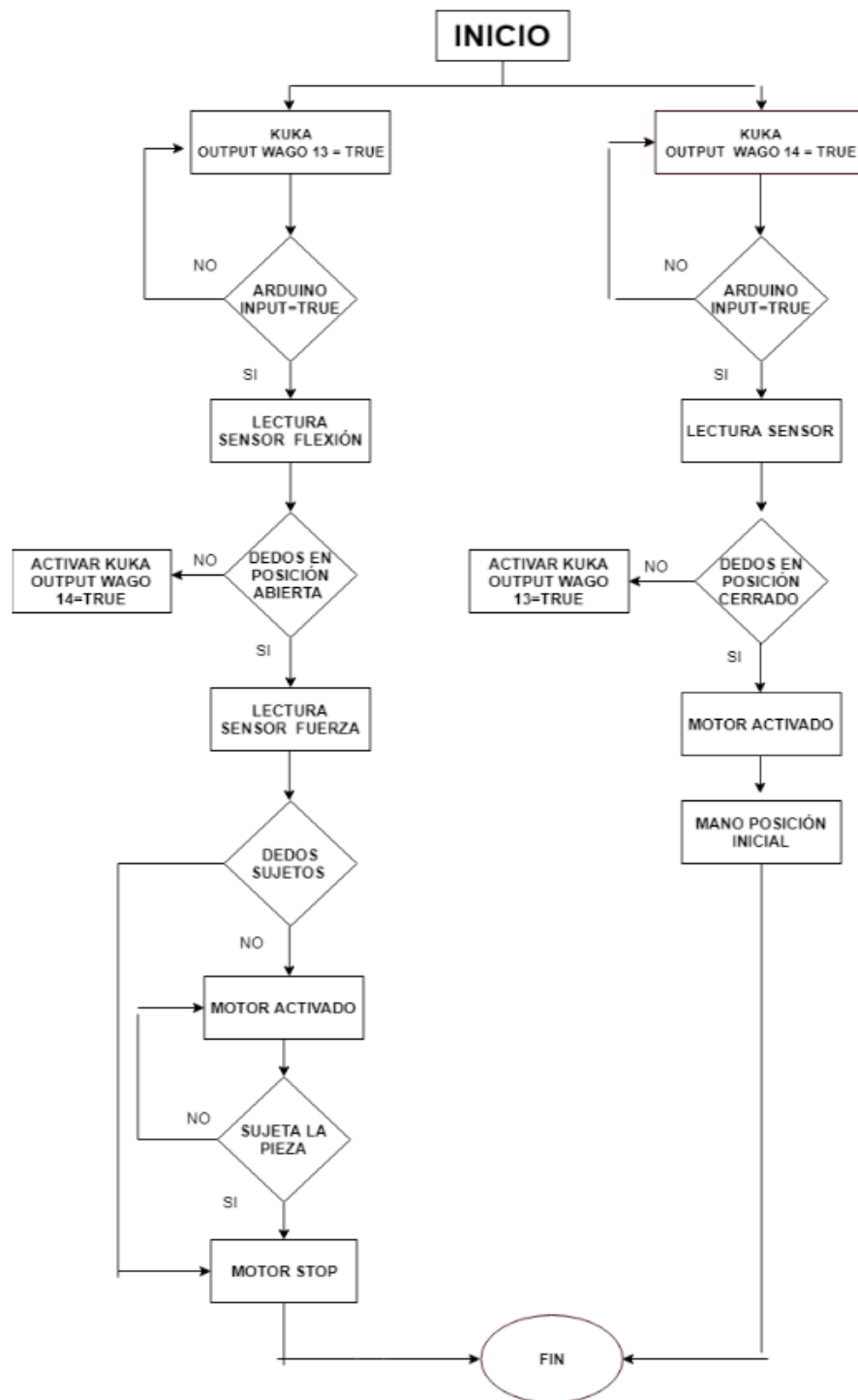


Figura 79. Flujograma de funcionamiento

5.3.2. Código

El software utilizado para la programación de la tarjeta de control, es el Arduino IDE. Este programa es gratuito y el más usado en una gran variedad de proyectos ya que a pesar de ser un software de alto nivel de programación, su uso no es muy complejo en comparación con otros programas similares.

5.3.3. Grado de protección (IP)

Después de ensamblar de forma correcta la herramienta robótica se verifica las partes en las que posiblemente pueda existir ingreso de polvo o agua, en este caso se necesita que la herramienta tenga una protección IP de 51; según la norma DIN EN IEC60529 indica que los niveles de protección están indicados por un código de letras IP y dos números que indican el grado de protección.

A. Primer dígito (sólidos)

Se requiere una seguridad de nivel 5 que indica una protección contra los residuos de polvo, la prueba consiste en verificar en todas las partes de la estructura de la herramienta que el ingreso de polvo no se previene completamente, pero el polvo no puede penetrar en tales cantidades que pueda afectar el funcionamiento correcto de la herramienta.

B. Segundo dígito (líquidos)

El grado de protección contra el ingreso de agua que cumple la herramienta robótica es de nivel 1; la prueba consistió en verificar si ingresa agua al dispositivo después de la caída vertical de gotas de agua, la altura fue de 200 mm durante 10 minutos a una velocidad de 5 mm³ por minuto.

5.4. Evaluación experimental del movimiento mecánico y del funcionamiento de la herramienta robótica

Una vez ensamblada la parte de mecánica, electrónica y de control se procedió a la implementación de la herramienta al brazo robótico Kuka KR16, con el fin de realizar pruebas experimentales del correcto funcionamiento de la herramienta.



Figura 80. Implementación de la herramienta al Robot Kuka KR 16

Mediante el Kuka Control Panel (KCP) se activaron las salidas digitales del wago, que se visualizan en la Figura 81, la salida 13 se activa para cerrar los dedos de la herramienta y la salida 14 se activa para la apertura de los dedos.

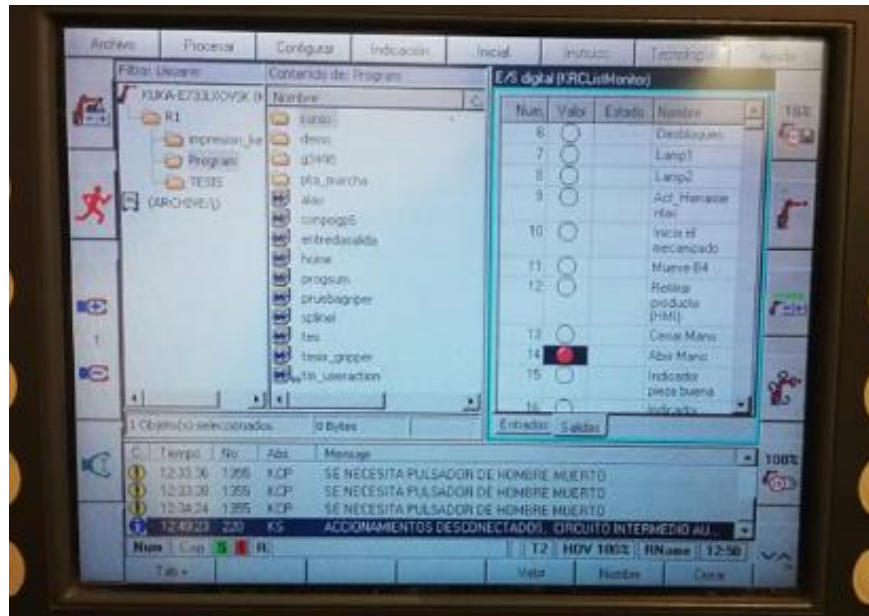
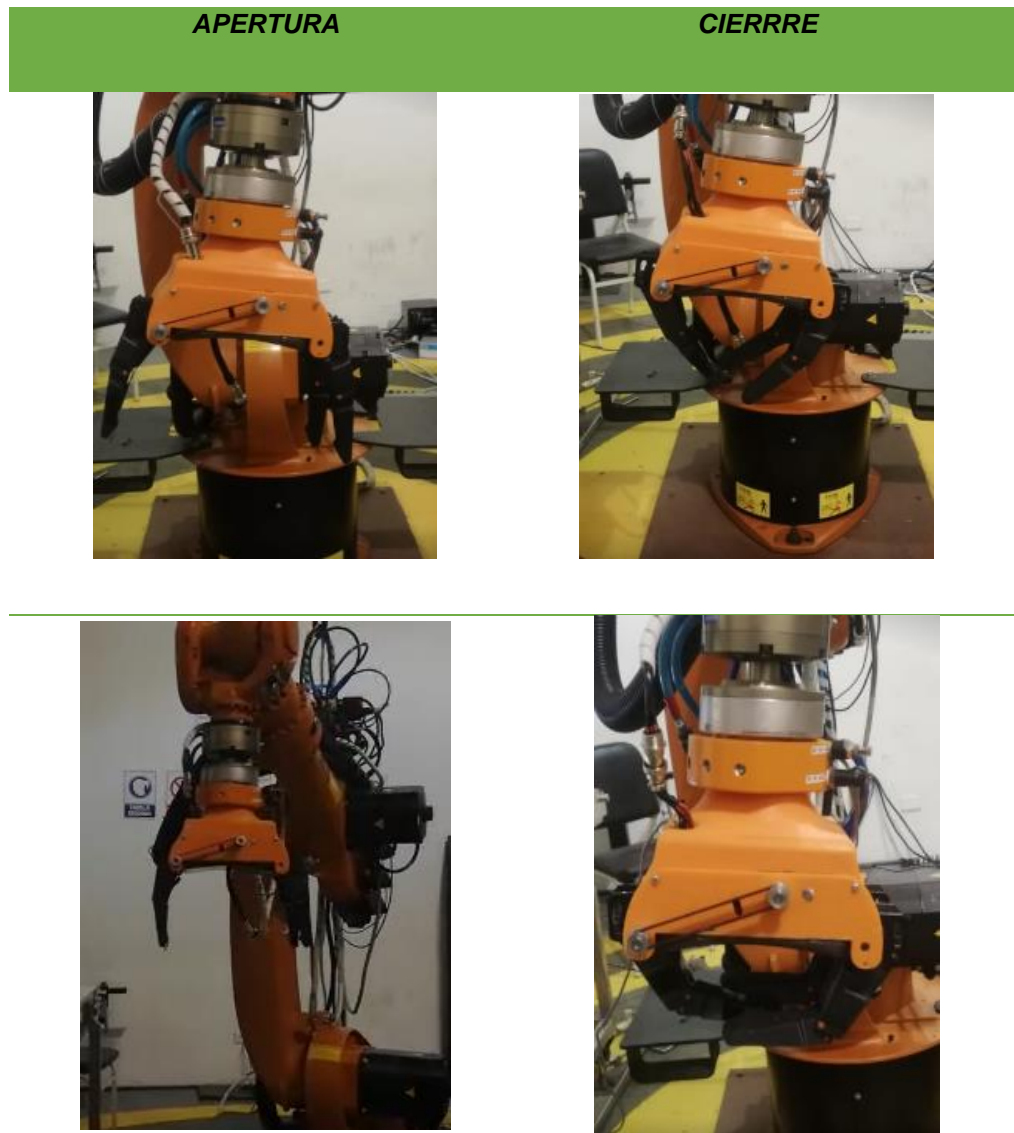


Figura 81. Kuka Control Panel (KCP)

La Tabla 15, muestran las diferentes pruebas que se realizaron para comprobar la apertura y cierre de los dedos de la herramienta robótica.

Tabla 15.
Pruebas de apertura y cierre de los dedos

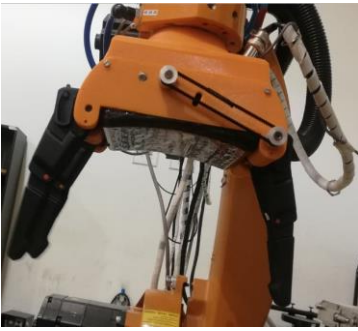


CONTINUA





CONTINUA 



5.5. Pruebas en ambientes y aplicaciones industriales de la herramienta robótica

Se realizaron tres tipos de pruebas, con base en el funcionamiento de la herramienta robótica; en las primeras pruebas se comprobó cuanto peso puede tomar la herramienta.







Las siguientes se hicieron, transportando objetos de un lado a otro aplicándole al brazo robótico Kuka KR16 una velocidad del 100%, aquí se verifico que el objeto no se caiga durante el trayecto.

Y por último se realizaron pruebas de apertura y cierre de los dedos, midiendo el tiempo que se tarda en ejecutar cada una de estas acciones.

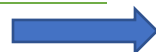
En la Tabla 16, se puede observar el resultado de las pruebas realizadas; el peso de la los objetos se midió con una balanza.

Tabla 16.

Pruebas de peso máximo

#	Objeto	Peso	Prueba
1		1,2 kg	
2		500 gr	
3		850 gr	

CONTINUA



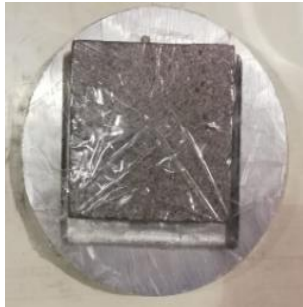
4



1.7 kg



5



2 kg



6



4 kg



Los resultados evidencian que la herramienta robótica soporta objetos con un peso máximo de 4kg de peso. El diseño que se elaborado es apto para tomar diferentes formas de los objetos, pero se demostró que los objetos circulares, prismáticos o con forma

irregular presentan mejor sujeción; además el radio del objeto más pequeño que puede apretar la mano es de 2,5 cm.

Tabla 17.

Prueba de tiempos de apertura y cierre de la herramienta

# MUESTRA	CIERRE	APERTURA
1	1.39	2.33
2	1.76	1.62
3	1.60	1.53
4	1.25	1.46
5	1.73	1.45
6	1.29	1.62
7	1.69	1.50
8	1.50	1.43
9	1.25	1.30
10	1.36	1.29
11	1.40	1.15
12	1.32	1.46
13	1.29	1.46
14	1.50	1.43
15	1.25	1.34
16	1.51	1.15
17	1.62	1.50
18	1.44	1.33
19	1.41	1.52
20	1.49	1.45
PROMEDIO	1.45	1.48

Los resultados de la Tabla 17, muestran que existe un pequeño rango de repetibilidad al momento de cambiar de posición, es decir el tiempo de ejecución que transcurre desde la activación de las salidas digitales mediante el KCP hasta completar la acción es rápida.



Figura 82. Pruebas de transporte de objetos



Figura 83. Pruebas transporte de objetos

Como se observa en la Figura 82 y Figura 83, este tipo de pruebas se realizaron transportando objetos de una banda a otra, considerando si se caían en el trayecto o

llegaban a su punto final; cabe mencionar que estas pruebas se hicieron con velocidad del 100% para mantener el entorno industrial.

Tabla 18.

Pruebas de transporte de objeto

N° Pruebas	Objeto cilíndrico		Objeto rectangular		Objeto irregular		Objeto prismático	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
	1	x			x	x		x
2	x		x		x		x	
3	x			x	x		x	
4		x	x		x			x
5	x		x		x		x	
6	x			x	x		x	
7		x		x	x			x
8	x		x		x		x	
9	x			x	x		x	
10	x		x		x			x
Total	8	2	5	5	10	0	7	3

Las pruebas de la Tabla 18, indican primero que la herramienta robótica desarrollada se adapta de buena manera al brazo robótico Kuka KR16, además que la mayoría de

piezas pudieron ser transportadas los errores se dieron en piezas con paredes rectas. Se realizaron diez pruebas por cada objeto dando un total de cuarenta pruebas.

5.6. Validación de la hipótesis

El método que se va a utilizar para desarrollar la validación de la hipótesis es el Chi cuadrado, este método ayuda a verificar si las frecuencias observadas en cada categoría son compatibles con la independencia entre ambas variables (Minitab, 2018). Por ende, se plantean dos hipótesis.

La hipótesis planteada fue:

¿La herramienta robótica de tres dedos se podrá utilizar en ambientes y aplicaciones industriales?

- *Variable Independiente:* Herramienta robótica de tres dedos
- *Variable dependiente:* Desempeño en ambientes y aplicaciones industriales

El primer paso es establecer la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1)

- **H_0 :** La herramienta robótica de tres dedos no se podrá utilizar en ambientes y aplicaciones industriales.
- **H_1 :** La herramienta robótica de tres dedos se podrá utilizar en ambientes y aplicaciones industriales.

Para verificar que el desempeño en ambientes y aplicaciones industriales sea confiable se realizaron diez pruebas en el Laboratorio de Robótica Industrial con el brazo robótico Kuka KR16, los datos obtenidos se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19.
Datos obtenidos de las pruebas observadas

Transporte	Objeto cilíndrico	Objeto rectangular	Objeto irregular	Objeto prismático	Total
Positivo	8	5	10	7	30
Negativo	2	5	0	3	10
Total	10	10	10	10	40

Para verificar el estado de la hipótesis se desarrollan los siguientes cálculos:

$$X_{calc}^2 = \sum \frac{(f_{real} - f_{teórica})^2}{f_{teórica}} \quad Ecu. 14$$

Cálculo de frecuencias teóricas o esperadas:

$$8 \rightarrow \frac{10 \cdot 30}{40} = 7.5$$

$$10 \rightarrow \frac{10 \cdot 30}{40} = 7.5$$

$$2 \rightarrow \frac{10 \cdot 10}{40} = 2.5$$

$$0 \rightarrow \frac{10 \cdot 10}{40} = 2.5$$

$$5 \rightarrow \frac{10 \cdot 30}{40} = 7.5$$

$$7 \rightarrow \frac{10 \cdot 30}{40} = 7.5$$

$$5 \rightarrow \frac{10 \cdot 10}{40} = 2.5$$

$$3 \rightarrow \frac{10 \cdot 10}{40} = 2.5$$

Cálculo de X_{calc}^2

$$X_{calc}^2 = \frac{(8 - 7.5)^2}{7.5} + \frac{(2 - 2.5)^2}{2.5} + \frac{(5 - 7.5)^2}{7.5} + \frac{(5 - 2.5)^2}{2.5} + \frac{(10 - 7.5)^2}{7.5} + \frac{(0 - 2.5)^2}{2.5} \\ + \frac{(7 - 7.5)^2}{7.5} + \frac{(3 - 2.5)^2}{2.5}$$

$$X_{calc}^2 = 7,22$$

El valor calculado se compara con el valor de la tabla para aceptar o rechazar la hipótesis, para ello se obtiene los grados de libertad:

$$n = (f - 1)(c - 1)$$

$$n = (2 - 1)(4 - 1)$$

$$n = (1)(3)$$

$$n = 3$$

Se obtienen tres grados de libertad y para un nivel de confiabilidad del 90% el valor de la tabla para valores críticos chi-cuadrado, corresponde a:

$$X_{tabla}^2 = 6,251$$

Entonces se compara los valores:

$$X_{calc}^2 > X_{tabla}^2$$

$$7,22 > 6,25$$

Se cumple que el valor calculado es mayor al obtenido de la tabla, por lo tanto, **H1** es la hipótesis que se acepta, validando que la herramienta robótica de tres dedos se podrá utilizar en ambientes y aplicaciones industriales.

5.7. Características técnicas de la herramienta robótica

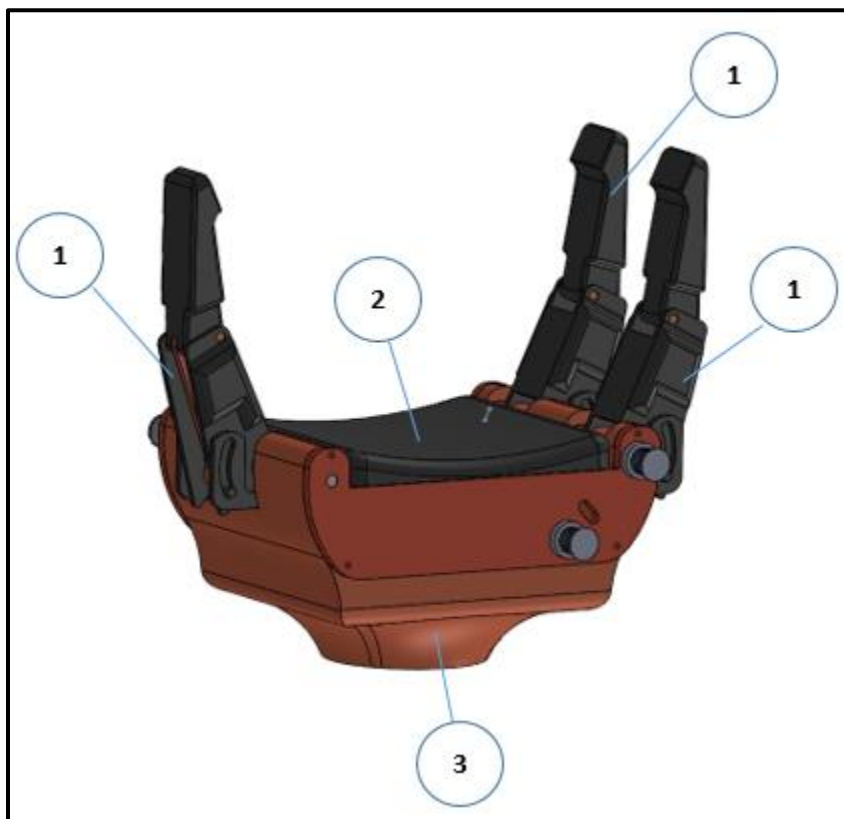


Figura 84. Vista general de la herramienta robótica de tres dedos

Tabla 20.
Datos generales de la herramienta robótica

1	Dedo
2	Palma
3	Tapa acople al brazo robótico

Tabla 21.
Datos básicos de la herramienta

Ancho	15.5 cm
Largo	19.5 cm
Altura	24 cm
Ancho máximo de los dedos	3.5 cm
Peso	1.79 Kg
Grado de protección IP	41
Temperatura ambiente mínima	-5 °C
Temperatura ambiente máx.	50 °C
Humedad	10-15%
Números de grados de libertad	6
Tiempo de apertura	1.48 seg

CONTINUA



Tiempo de cierre	1.46 seg
Peso máximo admisible	4 Kg
Repetibilidad	0,4

5.8. Análisis económico del proyecto

En la Tabla 22, se detalla los gastos generados en el desarrollo de la herramienta robótica, este proyecto ha generado un gasto de \$822; se comprueba que la ejecución económica del mismo es factible porque haciendo una comparación con herramientas robóticas existentes en el mercado el precio es muy bajo, además la herramienta se ha elaborado con productos que se encuentran en stock en el mercado ecuatoriano.

Tabla 22.
Análisis económico

Cantidad	Detalle	Valor Unitario \$	Valor Total \$
Materiales de ensamble general			
10	Estudio de probetas ABS	11.20	112.00
10	Impresión de probetas	1.50	15.00
4	Filamento ABS	25.00	100.00
1	Bandas y cadenas	25.00	25.00
1	Kit arduino	35.00	35.00
1	Fuente	15.00	15.00
1	Mecanizado	300.00	300.00
1	Sensor de flexión	20.00	20.00

CONTINUA 

1	Gastos Varios	200.00
	Subtotal	822

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se desarrolló una herramienta robótica, mediante impresión 3D, específicamente se utilizó la técnica de Modelado por Disposición Fundida, el material usado fue el ABS, el cual brinda ciertas propiedades mecánicas excelentes para trabajos que requieren de esfuerzos mecánicos exigentes.
- Para mejorar los esfuerzos de compresión que van a soportar las piezas fabricadas, se cambió dos parámetros a la configuración de la impresión, el primero se aumentó la densidad de relleno a un 80%, y también uso el patrón de relleno rectangular a 0 y 90 grados; puesto que después de realizar el estudio del efecto que causan estos parámetros no hay duda que las propiedades mecánicas se mejoran.
- El diseño del mecanismo subactado es la parte más importante de la herramienta ya que se consideró algunos parámetros como: el tamaño y peso máximo de los objetos que va a sujetar, y posterior a eso se calculó las medidas que se necesitan en las falanges distal y proximal.

- El sistema mecánico de la herramienta consta de engranajes cónicos de aluminio, pues se requirió una transmisión de movimiento precisa para lograr controlar el movimiento de los dedos. El movimiento del motor hacia los dedos, es mediante poleas y bandas dentadas que se encuentran en el exterior de la herramienta ya que se pretendía mantener las dimensiones de la palma.
- El sistema de control electrónico de la herramienta está formado por un sensor de flexión, para que este arroje datos se debe cambiar su ángulo de inclinación, en el proyecto se estableció la posición inicial de los dedos, a penas esta posición sea diferente proporcionan valores analógicos los cuales inmediatamente entran a la tarjeta de control que a su vez emite señales al drive de control del motor.
- En el módulo wago del robot Kuka KR16 se controla dos señales de salida, una para el control cuando la herramienta se cierre y la otra para abrir los dedos; el valor de la apertura está determinado ya en la programación.
- Para implementación de la herramienta al robot se diseñó y fabrico un acople ubicado en el plato master del robot, esta pieza cumple con la condición de permitir entrar a las esferas del sistema de bloqueo del robot Kuka KR16.

- Debido a los altos niveles de ruido que emite las señales del módulo WAGO, se implementó en la programación el comando PULL-UP, el mismo que mejoró notablemente la lectura de las entradas digitales.
- En la programación del KCP se implementó la función lógica OUT, esta activa la salida 13 o 14 del módulo WAGO, siempre que se desee cambiar de estado los dedos ya sea de apertura o cierre de la herramienta robótica; es necesario desactivar la señal que se encuentre en funcionamiento, caso contrario la herramienta no realizara ninguna acción.
- Las pruebas realizadas determinaron que la herramienta levanta un peso de 4kg, sin que exista apertura de los dedos, el objeto aprehendido permanece hasta que se le asigne la orden de soltarlo.

6.2. Recomendaciones

- Al momento de fabricar las piezas en ABS se debe tener un entorno totalmente cerrado, pues las corrientes de aire afectan a la estructura de la pieza.
- Si se desea piezas más resistencia de las impresiones se debe aumentar el porcentaje de relleno, el mayor porcentaje es 100% pero internamente no se reflejará ningún patrón de relleno existirá ningún patrón de relleno.

- Se debe tomar en cuenta que mientras se eleve el porcentaje de relleno el peso de la pieza también lo hará.
- Se recomienda para el diseño subactado es importante delimitar el radio máximo y mínimo de los objetos que se desea tomar, pues de ahí parten los cálculos para su diseño.
- Se recomienda colocar un material antideslizante o rugoso en las partes donde exista contacto con el objeto, a fin de que no se resbalen.
- Se debe considerar medidas de bandas estándar, pues es muy difícil lograr una buena resistencia a la rotura cuando se fabrica una con medidas específicas.
- Al momento de colocar el sensor de flexión se debe considerar verificar que valor arroja en la posición actual, porque así se logra delimitar el rango de movimiento.
- El relé que se utiliza para la conexión entre el módulo wago y el arduino debe estar conectado a un diodo inversamente polarizado ya que de esta forma que se protege el daño de los contactos.

- En la programación del KCP, después de enviar un comando de apertura o cierre se debe colocar un tiempo de espera de 5 segundos con el fin de que se sujete bien a la pieza y no se mueva el robot Kuka KR16.
- Se recomienda no enviar dos señales digitales a la vez ya que la herramienta no funcionara.
- Se debe comprobar que los tres dedos se encuentren en la misma posición geométrica, caso contrario no sujetara de manera adecuada el objeto.
- Se debe comprobar el encendido de la fuente de alimentación, para iniciar con el uso de la herramienta robótica.
- Se debe verificar que todos los conectores se encuentren en su lugar, caso contrario podría existir un cortocircuito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *3D natives*. Recuperado el 20 de septiembre del 2018, de <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>
- *Adash*. Recuperado el 05 de octubre del 2018, de <https://adash.com/es/diagnostico-vibraciones/aceler%C3%B3metro-medidor-analizador-de-vibraciones/>
- *ARQHYS*. (2015). Recuperado el 03 de octubre del 2018, de <https://www.arqhys.com/articulos/efector-robot.html>
- *Asociación Española de Robótica y Automatización*. Recuperado el 20 de junio del 2016, de <https://www.aer-automation.com/aer-atp/robotica-industrial-y-de-servicio/>
- *ATI*. (2015). Recuperado el 25 de agosto del 2018, de http://www.ati-ia.com/es-MX/index.aspx?gclid=EAlalQobChMI4f3Yv56O2wIVxwOGCh1C5APHEAAYASA AEgLO-_D_BwE
- *BF México*. Recuperado el 24 de octubre del 2018, de <https://www.bfmex.com/partes-de-un-robot-industrial/>
- Blanco, E. *PORTINOS*. Recuperado el 31 de noviembre del 2018, de <https://portinos.com/tecnologia/guantes-siemens-para-robots>

- *Brico geek*. (2015). Recuperado el 15 de septiembre del 2018, de <https://tienda.bricogeek.com/luz-infrarrojos/373-fotoresistencia-ldr.html>
- *BricoGeek*. Recuperado el 31 de noviembre del 2018, de <https://tienda.bricogeek.com/motores-paso-a-paso/546-motor-paso-a-paso-nema-17-32kg-cm.html>
- Brumovsky, F. (2010). Recuperado el 15 de noviembre del 2018, de <http://www.frc.utn.edu.ar/jar2006/docs/papers/008-jar06.pdf>
- Castro, C. (2017). Recuperado el 15 de noviembre del 2018, de https://www.researchgate.net/figure/Figura-11-Mecanismo-de-4-barras-generalizado_fig1_327832989
- *Educa lab*. (2016). Recuperado el 18 de octubre del 2018, de http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esotecnologia/quincena11/4quincena11_contenidos_3c.htm
- *EK roboter*. (2016). Recuperado el 15 de diciembre del 2018, de <https://www.ekroboter.com/es/integracion-de-soluciones/robots-industriales/antropomorficos/palletizado.php>
- *ElectroCrea*. (2017). Recuperado el 9 de diciembre del 2018, de <https://electrocrea.com/products/arduino-nano>
- Fuentes, R. (2015). Recuperado el 26 de diciembre del 2018, de <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/>

- Gert, K. (2011). *TU Delft*. Recuperado el 15 de diciembre del 2018, de <https://repository.tudelft.nl/islandora/search/kragten?collection=education>
- Gonzales Juan, M. O. (2015). Recuperado el 1 de diciembre del 2018, de <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9388>
- Guerrero, J. (2014). Recuperado el 15 de agosto del 2018, de <https://pluselectric.wordpress.com/2014/09/21/arduino-uno-especificaciones-y-caracteristicas/>
- *Heptro*. (2015). Recuperado el 29 de octubre del 2018, de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-de-fuerza-o-presion-mf01/>
- *Hisour*. (2017). Recuperado el 5 de agosto del 2018, de <https://www.hisour.com/es/artificial-muscle-42842/>
- *Impresoras 3D*. (2018). Recuperado el 03 de diciembre del 2018, de <https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-sobre-los-distintos-filamentos-para-impresoras-3d/>
- Jia, O. (2018). *MASTONER*. Recuperado el 06 de enero del 2019, de <https://www.mastoner.com/impresoras-3d/filamento-abs/filamento-abs-1kg-blanco-anet>
- Jimenez A, R. L. (2015). Recuperado el 04 de enero del 2019, de https://www.researchgate.net/publication/274265347_Elastomeros_dielectricos_para_su_uso_como_actuadores_o_musculos_artificiales

- Locker, A. (2019). *ALL3DP*. Recuperado el 26 de febrero del 2019, de <https://all3dp.com/es/1/creality-ender-3-pro-impresora-3d-analisis/>
- Lopesino, D. (2018). Recuperado el 07 de febrero del 2019, de http://oa.upm.es/50450/1/TFG_DANIEL_LOPESINO_RIVERA.pdf?fbclid=IwAR0UBpKciEmYy_vliyu14JnZsTGUEYgnQ1kDkyDb5NzxGhVhX9TDTFSUKBU
- Luis Carrion, D. O. (2009). *High lights*. Recuperado el 23 de marzo del 2019, de http://www.datalights.com.ec/site2/images/stories/robotica/nap/nap_fsr.pdf
- Mario, H. (2018). *ENNOMOTIVE*. Recuperado el 02 de abril del 2019, de <https://www.ennomotive.com/es/garras-de-robot-industria/>
- *MCI Electronics*. (2017). Recuperado el 1 de diciembre del 2018, de <https://www.mcielectronics.cl/shop/product/sensor-de-flexion-2-2-10496>
- *Mecafenix*. (2017). Recuperado el 15 de septiembre del 2018 , de <http://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensor-proximidad-capacitivo/http://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensor-proximidad-capacitivo/>
- *Mecapedia*. (2019). Recuperado el 15 de marzo 2019, de http://www.mecapedia.uji.es/ley_de_Grashof.html
- Medina J, V. P. (2014). Recuperado el 19 de abril del 2019, de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/579>

- *MEKKAM*. (2015). Recuperado el 22 de diciembre del 2018, de <http://www.mekkam.com/robotica-industrial/tipos-de-garras/>
- *Minitab*. (2018). Recuperado el 1 de abril del 2019, de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/tables/supporting-topics/chi-square/what-is-a-chi-square-test/>
- *Murcia Economía*. (2016). Recuperado el 27 de mayo del 2019, de <http://murciaeconomia.com/not/56222/robotica-industrial-totalmente-necesario-actualmente/>
- NUÑES, S. (2014). *UPU*. Recuperado el 15 de mayo del 2019, de <http://termoplas.blogspot.com/2012/10/termoplasticos.html>
- *Omega*. (17 de abril de 2017). Recuperado el 06 de junio del 2019, de <https://es.omega.com/section/accesorios-extensometros.html>
- Paulina, M. (Octubre de 2018). Recuperado el 09 de junio del 2019 , de https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/
- *Pololu Robotics & Electronics*. (2017). Recuperado el 26 de junio del 2019, de <https://www.pololu.com/product/2827>
- *PROADEC*. (2011). Recuperado el 06 de mayo del 2019, de <http://www.proadec.co.uk/en/catalogue/edging-materials/>

- Quinayás, C. (enero de 2010). Recuperado el 22 de julio del 2019, de <http://www.unicauca.edu.co/deic/Documentos/Tesis%20Quinay%E1s.pdf>
- *Robótica y mecatrónica*. (2017). Recuperado el 19 de enero del 2019, de <http://informecatronica-robotica.blogspot.com/p/estructura-de-un-robot-industrial.html>
- Rodríguez, S. (2016). Recuperado el 13 de junio del 2019, de <https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/30903/TFG-Rodriguez-Manzanares-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rogelio, D. (2018). Herramientas finales en robótica industrial. *INESEM*.
- ROSALES, Y. C. (2015). Recuperado el 14 de julio del 2019, de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/087/47087237.pdf
- Salvatore Brischetto, C. F. (2017). *Technologies*. Recuperado el 31 de julio del 2019, de <https://doi.org/10.3390/technologies5020020>
- *Schmalz*. (2018). Recuperado el 13 de junio del 2019 , de <https://www.schmalz.com/en/applications/industries/robotics/lightweight-robots-cobots/kuka/#product-media-modal>
- Sergio, P. (2 de diciembre de 2017). *Robotiq*. Recuperado el 17 de abril del 2019 , de <https://spmprotomp.wordpress.com/2017/12/02/elementos-terminales-para-robots-pinzas-de-sujecion/>

- *Tdrobotica*. (26 de febrero de 2015). Recuperado el 29 de abril del 2019 , de <http://tdrobotica.co/sensor-de-musculo-mioelectrico/397.html>
- Trolle, R. O. (2016). Recuperado el 31 de junio del 2019 , de <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/6598/tfg-doc-man.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- *Universidad de Santiago de Chile*. (2016). Recuperado el 18 de julio del 2019 , de <http://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24908&chapterid=211>
- Villar, C. M. (2010). Aleaciones con Memoria de Forma:. *Metalactual*, 36-41. Recuperado el 16 de junio del 2019 , de Aleaciones con Memoria de Forma:: http://www.metalactual.com/revista/15/aleaciones_con_memoria.pdf
- *Voltimum*. (2015). Recuperado el 9 de julio del 2019 , de <https://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/robotica-industrial-sector>
- Vukasovic Herrero, T. V. (2018). Recuperado el 14 de julio del 2019 , de <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/22395>

ANEXOS



CARRERA DE MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el trabajo de investigación fue desarrollado por los señores, **Criollo Sánchez, Andrés Ismael** y **Reyes Morocho, Jhoselyn Gianella**, en la ciudad de Latacunga a los 24 días del mes de Julio de 2019.

Aprobado por:

Ing. Marco Singaña
Director del proyecto

Ing. Darío Mendoza
Director de Carrera



Dr. Rodrigo Vaca
Secretario Académico