



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

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

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GRIPPER NEUMÁTICO  
INDUSTRIAL DE DOS GARRAS PARA EL BRAZO ROBÓTICO KUKA  
KR16, FABRICADO MEDIANTE TÉCNICA DE DEPOSICIÓN FUNDIDA,  
RECUBRIMIENTO CON MATERIAL COMPUESTO Y CONTROL DE  
VELOCIDAD DE CARRERA**

**AUTORES:  
JUMBO AUQUILLA, DIEGO ALEJANDRO  
VALENCIA SALINAS, JUAN CARLOS**

**DIRECTOR: ING. SINGAÑA AMAGUAÑA, MARCO ADOLFO**

**LATACUNGA**

**2019**



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GRIPPER NEUMÁTICO INDUSTRIAL DE DOS GARRAS PARA EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16, FABRICADO MEDIANTE TÉCNICA DE DEPOSICIÓN FUNDIDA, RECUBRIMIENTO CON MATERIAL COMPUESTO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE CARRERA.”*** fue realizado por los señores ***Jumbo Auquilla, Diego Alejandro y Valencia Salinas, Juan Carlos***, 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, 12 de julio del 2019

**Ing. SINGAÑA AMAGUAÑA, MARCO ADOLFO**

C.C.: 0501627889



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Jumbo Auquilla, Diego Alejandro* y *Valencia Salinas, Juan Carlos*, declaramos que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GRIPPER NEUMÁTICO INDUSTRIAL DE DOS GARRAS PARA EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16, FABRICADO MEDIANTE TÉCNICA DE DEPOSICIÓN FUNDIDA, RECUBRIMIENTO CON MATERIAL COMPUESTO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE CARRERA.”*** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, julio del 2019

**Valencia Salinas, Juan Carlos**

C.C.:1804433637

**Jumbo Auquilla, Diego Alejandro**

C.C.:172075176



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

*Nosotros, **Jumbo Auquilla, Diego Alejandro** y **Valencia Salinas Juan Carlos**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GRIPPER NEUMÁTICO INDUSTRIAL DE DOS GARRAS PARA EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16, FABRICADO MEDIANTE TÉCNICA DE DEPOSICIÓN FUNDIDA, RECUBRIMIENTO CON MATERIAL COMPUESTO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE CARRERA.”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.*

*Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.*

Latacunga, julio del 2019

**Valencia Salinas, Juan Carlos**

C.C.:1804433637

**Jumbo Auquilla, Diego Alejandro**

C.C.:172075176

## DEDICATORIA

*Quiero dedicar este logro en mi vida académica primero a Dios, por ser esa guía espiritual en los momentos complicados durante el transcurso de mi carrera universitaria.*

*A mis padres, por ser el pilar fundamentad en mi vida cotidiana, por estar siempre motivándome a ser un profesional, con su amor incondicional, trabajo, esfuerzo, entrega y lucha que contribuyeron para la culminación de este gran objetivo.*

*A mis hermanos y hermanas que con su gran ejemplo de trabajo, dedicación, esfuerzo y superación influyeron en mí, de forma positiva con sus consejos y anécdotas para lograr culminar mi carrera universitaria.*

*A mis compañeros y mejores amigos, que de alguna manera siempre estuvieron para dar una mano de ayuda durante el proceso de formación universitaria y culminación de la misma.*

**Diego Jumbo**

*Doy gracias a Dios por haberme puesto en mi camino a grandes personas y momentos inolvidables, como el hecho de culminar con éxito mi carrera universitaria.*

*A mis padres Ernesto y Sonnia, por enseñarme el valioso significado del amor y la familia, de igual manera a mis hermanas Jessy y Gaby quienes son mi fortaleza de mi día a día.*

*En especial a mis abuelitos quienes dejaron un legado eterno de cariño y bondad; poniendo a mi disposición sus bendiciones enseñanzas y conocimientos.*

*A mis tíos, primos y amigos, que, con su amistad, y confianza han fomentado en mí, el deseo de superación.*

**Juan Valencia**

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos expresar el más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

Agradecemos a los docentes quienes con su filosofía pedagógica impartieron sus conocimientos aportando con nuestra formación profesional y personal.

A todos nuestros grandes amigos y futuros colegas quienes nos ayudaron si nada a cambio, gracias infinitas por su buena voluntad mostrada en el transcurso la carrera.

A nuestro director de tesis el Ing. Marco Singaña MSc, quien fue un eje primordial para el desarrollo de este proyecto, gracias por compartir su conocimiento y por la guía impartida durante estos meses.

Y finalmente a nuestra carrera y a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L por habernos formado como Ingenieros en Mecatrónica cada día, con cada esfuerzo, cada sonrisa y cada llanto dejado en las aulas; y ahora nos dejan con la mayor satisfacción de haber formado parte de tan prestigiosa familia.

**Diego y Juan**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CARÁTULA

CERTIFICACIÓN .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi

### CAPÍTULO I

#### FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Conceptos Generales.....	1
1.1.1. Robótica industrial. ....	1
1.1.2. Brazo robótico industrial. ....	1
1.1.3. Partes de un brazo robótico industrial.....	1
1.1.4. Muñeca central .....	3
1.1.5. Elementos terminales del manipulador robótico .....	3
1.1.6. Tipos de gripper con accionamiento neumático.....	5
1.2. Gripper neumático industrial de dos garras. ....	7
1.2.1. Principio de funcionamiento del gripper neumático.....	8
1.2.2. Fuerza de la gripper neumático .....	8
1.2.3. Control del gripper neumático .....	9
1.3. Técnicas de deposición fundida.....	10
1.3.1. Técnicas Unidireccionales .....	10
1.3.2. Técnicas Bidireccionales .....	11
1.3.3. Técnica Multidireccional.....	12

1.3.4.	Técnica Tridimensional .....	13
1.3.5.	Materiales utilizados en deposición de material fundido .....	13
1.4.	Materiales compuestos.....	14
1.4.1.	Materiales compuestos reforzados con fibras.....	14
1.4.2.	Materiales compuestos en función de tipo de matriz .....	15
1.4.3.	Orientación de las fibras de materiales compuestos.....	16
1.4.4.	Propiedades de las fibras de materiales compuestos.....	17
1.5.	Fluidos inteligentes.....	17
1.5.1.	Fluidos magnetoreológicos en amortiguadores .....	18

## **CAPÍTULO II**

### **DISEÑO DEL GRIPPER**

2.1.	Parámetros de diseño del gripper .....	21
2.1.1.	Consideraciones de diseño.....	22
2.2.	Estructura mecánica del gripper .....	24
2.2.1.	Selección del modelo de gripper.....	24
2.3.	Estructura mecánica de regulación de velocidad de carrera.....	27
2.3.1.	Diseño del mecanismo de regulación de velocidad .....	29
2.3.2	Diseño de la estructura del modelo de gripper .....	65
2.4	Selección de materiales. ....	72
2.4.1	Selección de material termoplástico para impresión 3D .....	72
2.4.2	Selección del material compuesto para el recubrimiento.....	75
2.5	Control electro-neumático del gripper.....	77
2.6	Control de velocidad de carrera .....	78
2.6.1	Diseño del circuito de control de velocidad con amortiguación.....	79
2.7	Selección de componentes .....	80
2.7.1	Tarjeta de control del sistema de amortiguamiento .....	80
2.7.2	Controlador del amortiguador MR.....	82
2.7.3	Sensor de Fuerza .....	84
2.7.4	Sensor de corriente ACS712 .....	86
2.7.5	Sensor Magnético .....	87

2.7.6	Modulo Bluetooth HC-06.....	88
2.7.7	Relé .....	89

## **CAPÍTULO III**

### **CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL GRIPPER**

3.1.	Estructura mecánica. ....	91
3.1.1.	Impresión 3D de los Jacks.....	91
3.1.2.	Impresión 3D del gancho de Cuña.....	92
3.1.3.	Impresión 3D de carcasa .....	92
3.1.4.	Impresión 3D de la tapa inferior .....	93
3.1.5.	Impresión 3D de la tapa superior.....	94
3.1.6.	Impresión 3D de las garras.....	94
3.1.7.	Recubrimiento de material compuesto de las garras del gripper .....	95
3.1.8.	Construcción del amortiguador MR.....	96
3.2.	Regulación de velocidad de carrera. ....	98
3.2.1.	Mecanismo de regulación de velocidad de carrera.....	99
3.2.2.	Control de regulación de velocidad de carrera con amortiguación .....	99
3.3.	Implementación de dispositivos.....	102
3.3.1.	Implementación de amortiguadores.....	102
3.3.2.	Implementación de cilindro neumático.....	104
3.3.3.	Ubicación de los jacks .....	106
3.3.4.	Ubicación del sensor de fuerza en las garras .....	106
3.3.5.	Ubicación de las garras .....	107
3.3.6.	Implementación de la tapa superior .....	108
3.3.7.	Lógica el accionamiento del amortiguador en el gripper.....	109
3.3.8.	Algoritmo de envío y recepción de datos .....	110
3.3.9.	Lógica de manipulación y traslación de objetos.....	112
3.3.10.	Algoritmo de control de velocidad de carrera del gripper.....	113
3.3.11.	Visualización de información. ....	115
3.4.	Ensamblaje.....	115
3.4.1.	Montaje del gripper neumático a la muñeca del robot .....	115

3.4.2. Montaje del circuito de control de velocidad en el robot .....	116
---	-----

## **CAPÍTULO IV**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

4.1 Velocidad de carrera del gripper. ....	117
4.1.1. Cálculo de velocidad lineal en el cierre del gripper .....	117
4.2 Control del gripper. ....	122
4.2.1. Control del gripper en estado cerrado.....	122
4.2.2. Posición del gripper en estado abierto.....	122
4.3 Pruebas en ambientes industriales de paletizado. ....	123
4.4 Validación de la hipótesis .....	128
4.4.1 Planteamiento de la Hipótesis .....	128
4.4.2 Desarrollo de la hipótesis.....	128
4.4.3 Análisis del desarrollo de la Hipótesis.....	131
4.5 Alcances y limitaciones .....	132
4.5.1 Análisis económico del proyecto.....	134

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones .....	136
5.2 Recomendaciones .....	138

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>139</b>
---	------------

<b>ANEXOS .....</b>	<b>142</b>
---------------------	------------

#### **ANEXO A. CATÁLOGO DEL CILINDRO NEUMÁTICO**

Anexo A1. Especificaciones técnicas de cilindro neumático

Anexo A2. Dimensiones del cilindro neumático

#### **ANEXO B. TABLAS DE DISEÑO DE RESORTE**

Anexo B1. Tabla de valores normalizados de alambre conductor eléctrico AWG

Anexo B2. Esfuerzos cortantes de diseño, alambre de acero ASTM A231.

Anexo B3. Módulo de elasticidad en cortante **G** y en tensión **E** de alambre.

Anexo B4. Calibre y diámetro de alambre para resorte

Anexo B5. Factor de efecto Wahl

ANEXO C. NOMENCLATURA DE ROSCAS MÉTRICAS

ANEXO D. PRUEBAS REALIZADAS DEL MATERIAL DE IMPRESIÓN 3D

ANEXO E. TABLA DE DISTRIBUCIÓN DEL CHI-CUADRADO

ANEXO F. HOJA TÉCNICA

ANEXO G. MANUAL DE USUARIO

ANEXO H. DIAGRAMA NEUMÁTICO GRIPPER INDUSTRIAL

ANEXO I. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE CONEXIÓN DEL MÓDULO WAGO-GRIPPER

ANEXO J. PLANOS MECÁNICOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Partes principales del brazo robótico .....	2
<b>Tabla 2.</b> Herramientas terminales para robots .....	4
<b>Tabla 3.</b> Tipos de gripper de sujeción para robóticos industriales.....	4
<b>Tabla 4.</b> Valores de fuerza y presión de modelo gripper PGN 125-2 .....	9
<b>Tabla 5.</b> Grado de prioridad .....	21
<b>Tabla 6.</b> Límites de carga KUKA KR-16.....	22
<b>Tabla 7.</b> Alternativas de diseño del modelo del gripper.....	25
<b>Tabla 8.</b> Validación de las alternativas del modelo del gripper.....	26
<b>Tabla 9.</b> Alternativas de selección del mecanismo de regulación de velocidad .....	27
<b>Tabla 10.</b> Validación de alternativas del mecanismo de regulación de velocidad .....	29
<b>Tabla 11.</b> Consumo de aire .....	34
<b>Tabla 12.</b> Características principales cilindro doble efecto Parker .....	36
<b>Tabla 13.</b> Parámetros de diseño del amortiguador .....	37
<b>Tabla 14.</b> Características amortiguador Hobby Park.....	50
<b>Tabla 15.</b> Alternativas de selección de material para impresión 3D.....	73
<b>Tabla 16.</b> Validación de alternativas para la selección del material de impresión 3D ...	74
<b>Tabla 17.</b> Alternativas de selección del material compuesto.....	75
<b>Tabla 18.</b> Valoración de alternativas para selección del material compuesto .....	77
<b>Tabla 19.</b> Alternativas de selección para tarjeta de control de velocidad.....	81
<b>Tabla 20.</b> Valoración de las alternativas para la selección de la tarjeta de control .....	82
<b>Tabla 21.</b> Alternativas para la selección del controlador del amortiguador .....	83
<b>Tabla 22.</b> Valoración de alternativas para selección controlador del amortiguador MR.....	84
<b>Tabla 23.</b> Alternativas para la selección del sensor de fuerza .....	85
<b>Tabla 24.</b> Valoración de las alternativas para selección del sensor de fuerza .....	86
<b>Tabla 25.</b> Datos técnicos módulo sensor de corriente ACS712 .....	87
<b>Tabla 26.</b> Datos técnicos reedswitch.....	88
<b>Tabla 27.</b> Datos técnicos módulo bluetooth HC-06.....	89
<b>Tabla 28.</b> Datos técnicos de Relé SDR-05VCD .....	90
<b>Tabla 29.</b> Características de impresión 3D de piezas .....	96
<b>Tabla 30.</b> Pruebas de velocidad de carrera del gripper neumático .....	119
<b>Tabla 31.</b> Pruebas del gripper en aplicaciones de paletizado .....	124
<b>Tabla 32.</b> <i>Pruebas de funcionamiento</i> .....	129
<b>Tabla 33.</b> Cálculo de frecuencias esperadas .....	130
<b>Tabla 34.</b> Resultados de pruebas .....	132
<b>Tabla 35.</b> Alcances y limitaciones en comparación de los dos modos de operación ..	133
<b>Tabla 36.</b> <i>Gastos del proyecto</i> .....	134

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Partes del brazo robótico industrial.....	2
<b>Figura 2.</b> Movimientos de la muñeca .....	3
<b>Figura 3.</b> Funcionamiento del gripper paralelo.....	5
<b>Figura 4.</b> Funcionamiento del gripper angular .....	6
<b>Figura 5.</b> Gripper de 3 garras.....	6
<b>Figura 6.</b> Ventosa de sujeción .....	7
<b>Figura 7.</b> Funcionamiento de gripper .....	8
<b>Figura 8.</b> Módulo WAGO.....	9
<b>Figura 9.</b> Impresión 3D unidireccional .....	11
<b>Figura 10.</b> Orientación de fibras a $0^{\circ}$ y $90^{\circ}$ .....	12
<b>Figura 11.</b> Impresión 3D multidireccional.....	12
<b>Figura 12.</b> Impresión 3D tridimensional .....	13
<b>Figura 13.</b> Material compuesto reforzado con fibras .....	14
<b>Figura 14.</b> Disco de freno.....	15
<b>Figura 15.</b> Materiales compuestos de matriz polimérica .....	16
<b>Figura 16.</b> Orientación de fibras en materiales compuestos .....	16
<b>Figura 17.</b> Fluido magnetoreológico en suspensión .....	18
<b>Figura 18.</b> Descomposición de fuerzas para amortiguadores MR .....	19
<b>Figura 19.</b> Montaje robot-herramienta .....	23
<b>Figura 20.</b> Mecanismo de regulación de velocidad.....	30
<b>Figura 21.</b> Tipos de montajes de cilindros .....	33
<b>Figura 22.</b> Factor de pandeo.....	34
<b>Figura 23.</b> Cilindro de doble efecto .....	36
<b>Figura 24.</b> Esquema general del amortiguador.....	38
<b>Figura 25.</b> Uso de fluido MR en modo plato-paralelo.....	39
<b>Figura 26.</b> Comportamiento de amortiguador RD-8040-1 (Carrera corta) .....	39
<b>Figura 27.</b> Rango dinámico vs Relación (h/R pistón).....	40
<b>Figura 28.</b> Distribución de polos .....	42
<b>Figura 29.</b> Fuerza de resistencia total.....	43
<b>Figura 30.</b> Esfuerzo de cizallamiento a diferentes campos magnéticos .....	44
<b>Figura 31.</b> Partes del amortiguador .....	44
<b>Figura 32.</b> Análisis Estructural del cilindro de amortiguación.....	45
<b>Figura 33.</b> Deformación del amortiguador MR .....	45
<b>Figura 34.</b> Esfuerzos de Von-Mises del amortiguador MR .....	46
<b>Figura 35.</b> Factor de seguridad del cilindro de amortiguación .....	46
<b>Figura 36.</b> Análisis Estructural del cilindro de amortiguación.....	47
<b>Figura 37.</b> Deformación en el vástago de la amortiguación MR .....	47
<b>Figura 38.</b> Esfuerzos de Von-Mises del vástago del amortiguador MR .....	48
<b>Figura 39.</b> Factor de seguridad del cilindro de amortiguación .....	48

<b>Figura 40.</b> Amortiguador Hobby Park .....	49
<b>Figura 41.</b> Funcionamiento electroimán.....	50
<b>Figura 42.</b> Longitud del bobinado .....	51
<b>Figura 43.</b> Parámetros de diseño del electroimán .....	52
<b>Figura 44.</b> Electroimán.....	54
<b>Figura 45.</b> Parámetros de diseño del resorte.....	55
<b>Figura 46.</b> Comportamiento de gancho de cuña (Apertura).....	59
<b>Figura 47.</b> Fuerza en gancho de cuña .....	61
<b>Figura 48.</b> Comportamiento de gancho de cuña (Cierre).....	62
<b>Figura 49.</b> Análisis estructural de la cuña .....	63
<b>Figura 50.</b> Deformación provocada por las cargas aplicadas en la cuña.....	64
<b>Figura 51.</b> Esfuerzos de Von-Mises en la cuña .....	64
<b>Figura 52.</b> Factor de seguridad de la Cuña.....	65
<b>Figura 53.</b> Estructura general del gripper neumático .....	65
<b>Figura 54.</b> Diseño de la tapa superior.....	66
<b>Figura 55.</b> Diagrama de cuerpo libre durante la sujeción de un cuerpo prismático. ....	68
<b>Figura 56.</b> (a) Diseño inicial de garras. (b) Optimización. (c) Diseño final de las garras. ....	69
<b>Figura 57.</b> Análisis Estructural de las Garras.....	70
<b>Figura 58.</b> Deformación provocada por las cargas aplicadas en las garras .....	70
<b>Figura 59.</b> Esfuerzos de Von-Mises en las Garras .....	71
<b>Figura 60.</b> Factor de seguridad del gancho de cuña.....	71
<b>Figura 61.</b> Diseño de la carcasa .....	72
<b>Figura 62.</b> Accionamiento del gripper .....	78
<b>Figura 63.</b> Diseño del circuito de control.....	79
<b>Figura 64.</b> Sensor ACS712.....	87
<b>Figura 65.</b> Reedswitch CT TDA-93.....	88
<b>Figura 66.</b> Bluetooth HC-06.....	89
<b>Figura 67.</b> Relé SDR-05VCD.....	90
<b>Figura 68.</b> Jack fabricado.....	92
<b>Figura 69.</b> Fabricación gancho de cuña.....	92
<b>Figura 70.</b> Fabricación de la carcasa.....	93
<b>Figura 71.</b> Fabricación de la tapa inferior .....	93
<b>Figura 72.</b> Fabricación de la tapa superior.....	94
<b>Figura 73.</b> Fabricación de garras .....	95
<b>Figura 74.</b> Acabado de garras .....	95
<b>Figura 75.</b> Elementos del amortiguador.....	96
<b>Figura 76.</b> Ensamble amortiguador.....	97
<b>Figura 77.</b> Área del bobinado.....	97
<b>Figura 78.</b> Elaboración electroimán .....	97
<b>Figura 79.</b> Llenado del amortiguador con fluido MR .....	98

<b>Figura 80.</b> Mecanismo de regulación de velocidad.....	99
<b>Figura 81.</b> Esquema de conexión del circuito eléctrico.....	100
<b>Figura 82.</b> Esquema PCB de la placa del circuito de control.....	101
<b>Figura 83.</b> Placa PCB final.....	102
<b>Figura 84.</b> Implementación amortiguadores MR.....	103
<b>Figura 85.</b> Ubicación de resortes.....	103
<b>Figura 86.</b> Ubicación de cilindro neumático.....	104
<b>Figura 87.</b> Acople de racords al cilindro neumático.....	105
<b>Figura 88.</b> Calibración sensores magnéticos.....	105
<b>Figura 89.</b> Ubicación de los jacks.....	106
<b>Figura 90.</b> Implementación sensor FSR.....	107
<b>Figura 91.</b> Ubicación de garras.....	107
<b>Figura 92.</b> Ubicación de tapa superior.....	108
<b>Figura 93.</b> Tapa superior (vista interna).....	108
<b>Figura 94.</b> Diagrama de flujo para la amortiguación del gripper.....	109
<b>Figura 95.</b> Diagrama de flujo para el envío de datos.....	110
<b>Figura 96.</b> Diagrama de flujo para la recepción de datos.....	111
<b>Figura 97.</b> Diagrama de flujo para tomar un objeto en paletizado.....	112
<b>Figura 98.</b> Definición de variables del algoritmo de control.....	113
<b>Figura 99.</b> Recepción de datos.....	115
<b>Figura 100.</b> Montaje del gripper neumático.....	116
<b>Figura 101.</b> Montaje del circuito de control de velocidad.....	116
<b>Figura 102.</b> Velocidad de carrera sin amortiguación (cierre).....	120
<b>Figura 103.</b> Velocidad de carrera con amortiguación (cierre).....	120
<b>Figura 104.</b> Control de cierre con amortiguación del gripper neumático.....	122
<b>Figura 105.</b> Control de apertura del gripper neumático.....	123
<b>Figura 106.</b> Aplicación de paletizado en robot KUKA.....	123

## **RESUMEN**

En el presente proyecto se realizó la exhaustiva investigación sobre el uso de materiales para impresión 3D, materiales compuestos que sirven para el diseño y construcción del gripper neumático industrial para el Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por medio de los parámetros de funcionamiento y control del elemento terminal-herramienta, para lo cual se desarrolló una metodología del funcionamiento de pinzas de sujeción y manipulación basadas en fundamentos teóricos que son primordiales para el diseño y control del mencionado gripper neumático. Toda la estructura del gripper neumático se construyó mediante las más óptimas técnicas de deposición fundida, en base a pruebas de resistencia mecánica realizadas para la selección del material, además se empleó materiales compuestos que permitieron mejorar el acabado de todas las partes de la herramienta, lo cual ayudó a tener una estructura más sólida y sin imperfecciones en el ensamble final. Se realizó el control de velocidad de carrera con amortiguación en el cierre del gripper, con la aplicación de los fluidos magnetoreológicos; desarrollando amortiguadores mecánicos, con la finalidad de obtener una disminución de la velocidad en el cierre de las garras del gripper.

## **PALABRAS CLAVE**

- ROBÓTICA INDUSTRIAL
- HERRAMIENTAS INDUSTRIALES
- AMORTIGUADORES MAGNETOREOLÓGICOS
- PROCESO DE PALETIZADO

## **ABSTRACT**

In the present project, an exhaustive research was carried out on the use of materials for 3D printing, composite materials used for the design and construction of the industrial pneumatic gripper for the Industrial Robotics Laboratory of the University of the Armed Forces ESPE, by means of the operation and control parameters of the terminal-tool element, for which a methodology was developed for the operation of gripping and manipulation clamps based on theoretical foundations that are fundamental for the design and control of the mentioned pneumatic gripper. The whole structure of the pneumatic gripper was built by means of the most optimal techniques of cast deposition, based on mechanical resistance tests carried out for the selection of the material. In addition, composite materials were used that allowed to improve the finish of all the parts of the tool, which helped to have a more solid structure and without imperfections in the final assembly. It was carried out the control of speed of race with cushioning in the closing of the gripper, with the application of magnetorheological fluids; developing mechanical shock absorbers, with the purpose of obtaining a reduction of the speed in the closing of the claws of the gripper.

## **KEYWORDS**

- INDUSTRIAL ROBOTICS
- INDUSTRIAL TOOL
- MAGNETOREOLOGICAL SHOCK ABSORBERS
- PALLETIZING PROCESS

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### 1.1. Conceptos Generales.

#### 1.1.1. Robótica industrial.

La robótica industrial puede definirse como el uso adecuado de robots para el desarrollo de múltiples tareas difíciles para el ser humano dentro de un campo industrial, de forma precisa y repetitiva para incrementar el nivel de producción optimizando tiempo y recursos.

#### 1.1.2. Brazo robótico industrial.

Según la Organización Internacional de Normalización ISO 8373:2012, define al brazo robótico industrial como un manipulador autónomo, reprogramable, multifuncional que posee varios grados de libertad ya sea fijo o móvil, y cumplan con múltiples trayectorias programadas para diversas tareas o aplicaciones industriales. (ORAMAS, 2014)

#### 1.1.3. Partes de un brazo robótico industrial

La estructura física del brazo robótico industrial está asociado a las funciones que cumple el brazo humano, sus partes están enlazadas a través de articulaciones o eslabones que permiten tanto un movimiento rotacional, como un movimiento traslacional o desplazamiento lineal dentro del área de trabajo. (KUKA Roboter, 2010)

Las partes principales que componen el brazo robótico industrial son siete como se visualiza en la Figura 1, la descripción general de cada parte se presenta en la Tabla 1.



**Figura 1.** Partes del brazo robótico industrial

Fuente: (KUKA Roboter, 2010)

**Tabla 1.**  
*Partes principales del brazo robótico*

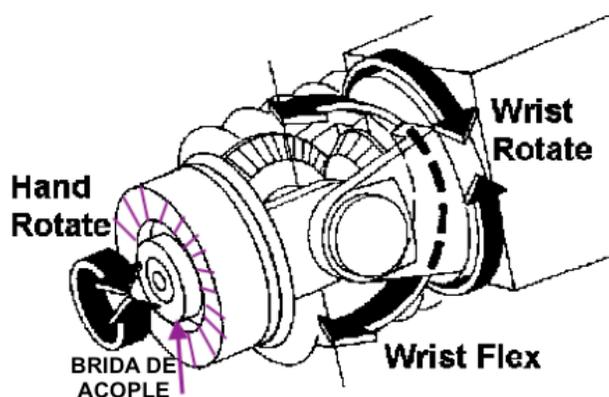
Núm.	Parte	Descripción
1	Base del robot	Se asemeja a la cintura del ser humano, en la cual se instaura toda la estructura del robot
2	Columna giratoria	Permite el giro de la base del robot dentro del campo de trabajo gira en relación con un plano horizontal
3	Brazo de oscilación	Permite la movilidad del plano perpendicular a un plano horizontal, para que el brazo alcance robot alcance la posición deseada.
4	Brazo	Permite el desplazamiento de la muñeca central conjuntamente con el elemento terminal en el robot.
5	Muñeca central	Conformada por árboles concéntricos una conjuntamente con una Brida de acople.
6	Panel de control	Permite el control del robot, presenta una interfaz donde el usuario puede apreciar las actividades del brazo robótico.
7	Unidad de control	Es el controlador general del robot, acciona cada una de las actividades que realiza el brazo robótico

Fuente: (KUKA Roboter, 2010)

En el siguiente apartado se hace énfasis en la muñeca central, se considera como la parte de mayor interés a ser tomada en cuenta en el presente proyecto.

#### 1.1.4. Muñeca central

La principal característica de la muñeca de un manipulador robótico son los grados de libertad, los movimientos que realiza son: Hand Rotate (giro), Wrist Flex (elevación) y Wrist Rotate (desviación) (HIGUERA, 2007). La muñeca central permite la unión tanto de herramientas y elementos periféricos al manipulador robótico, como es el caso del gripper neumático que por medio de la brida de acople se fija al extremo del robot para desarrollar aplicaciones específicas. Los grados de libertad y brida de acople se visualizan en la Figura 2.



**Figura 2.** Movimientos de la muñeca

Fuente: (HIGUERA, 2007)

#### 1.1.5. Elementos terminales del manipulador robótico

Las capacidades del manipulador robótico deben aumentar con el uso de módulos adicionales, denominados elementos terminales del robot, que representa la herramienta esencial que permite al robot de uso general realizar una aplicación particular. Según (Chang, 2014) los elementos terminales pueden dividirse en dos categorías:

- a. **Herramientas.** Se utilizan cuando el robot opera sobre la pieza de trabajo. En aplicaciones como: soldadura por puntos, soldadura por arco, pintura por

pulverización y operaciones de taladro. En cada caso, la herramienta permanece unida a la muñeca central del robot para realizar su función como se describe en la Tabla 2. (Chang, 2014)

**Tabla 2**  
*Herramientas terminales para robots*

Tipo	Función
<b>Pinza soldadura por puntos</b>	Son dos electrodos que se cierran sobre la pieza a soldar
<b>Soplete soldadura de arco</b>	Básicamente es el soporte del electrodo que se funde
<b>Cucharón para colada</b>	Para trabajos de fundición
<b>Atornillador</b>	Suelen incluir la sujeción y alimentación de tornillos
<b>Fresa de lija</b>	Para perfilar, rebabas, eliminar, pulir, etc.
<b>Pistola de pintura</b>	Para la pulverización de pintura
<b>Cañón-láser</b>	Para corte de materiales, soldadura e inspección
<b>Cañón de agua a presión</b>	Para corte de materiales

Fuente: (Chang, 2014)

b. **Gripper de sujeción.** Conocidos comúnmente como pinzas de sujeción se emplean para agarrar un objeto y sujetarlo durante el ciclo de trabajo del robot. En la Tabla 3, se menciona los tipos de pinzas de acuerdo a su accionamiento y uso.

**Tabla 3**  
*Tipos de gripper de sujeción para robóticos industriales*

Tipo	Accionamiento	Uso
<b>Gripper de presión</b>	Neumático o eléctrico	Transporte y manipulación de piezas sobre las que no importé presionar
<b>Gripper de enganche</b>	Neumático o eléctrico	Piezas de grandes dimensiones o sobre las que no se puede ejercer presión
<b>Ventosa de vacío</b>	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa (cristal; plástico etc.)
<b>Electroimán</b>	Eléctrico	Piezas ferromagnéticas

Fuente: (Chang, 2014)

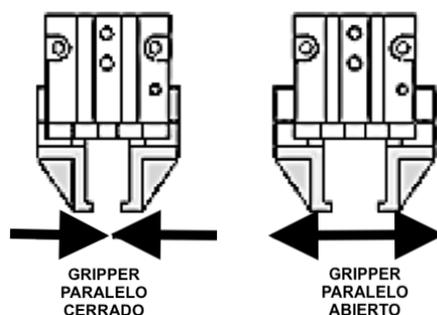
Como se aprecia en la Tabla 3; el accionamiento neumático es el más utilizado por ofrecer mayor ventaja en simplicidad, precio y fiabilidad, no obstante, presenta dificultades de control de posiciones intermedias.

### 1.1.6. Tipos de gripper con accionamiento neumático

Según (OMEGA, 2018) establece que hay cuatro tipos de gripper con accionamiento neumático que se describen a continuación:

#### a. Gripper con desplazamiento lineal de dos garras

Son dispositivos que se abren y cierran de forma paralela al objeto a sujetar, empleadas a nivel industrial, mantienen un movimiento sincronizado al retorno de las mordazas. En la Figura 3, se visualiza una pinza paralela de dos garras que describe su desplazamiento lineal para sujetar al objeto al abrir y cerrar sus garras. (OMEGA, 2018)



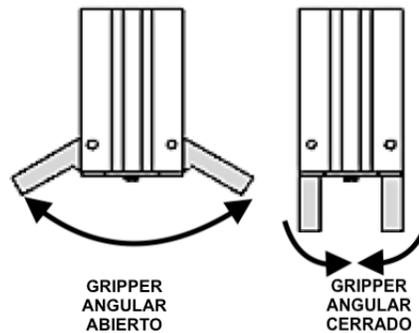
**Figura 3.** Funcionamiento del gripper paralelo

Fuente: (OMEGA, 2018)

#### b. Gripper con desplazamiento angular de dos garras

Estos grippers se posicionan de manera radial, enlazadas desde un extremo como pivote para hacer girar las mordazas con un movimiento sincronizado y auto centrado, tienen desplazamiento angular, se establece desde el ángulo de inicio hasta el ángulo

que se tiene contacto con la superficie de la pieza, de esta manera se produce el agarre del objeto. En la Figura 4, se observa la trayectoria angular generado por el desplazamiento de las mordazas al abrir y cerrar las garras. (OMEGA, 2018)



**Figura 4.** Funcionamiento del gripper angular

Fuente: (OMEGA, 2018)

### c. Gripper de dos o más garras

Se emplean si se requiere de fuerza y precisión, al sujetar objetos frágiles son las más adecuadas. Producen un desplazamiento lineal sincronizado. En la Figura 5, se presenta un gripper de tres garras, el movimiento que producen es lineal. (OMEGA, 2018)

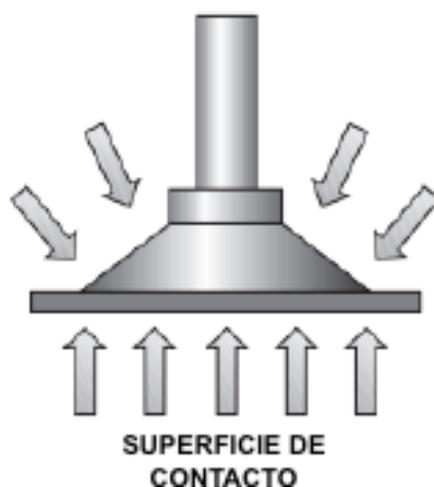


**Figura 5.** Gripper de 3 garras

Fuente: (SCHUNK, 2018)

#### d. Ventosa de sujeción

La ventosa de sujeción es la superficie en contacto con el objeto a trasladar, funciona con un generador de vacío. Su accionamiento se da cuando la presión atmosférica es más alta que la presión entre la ventosa y la superficie de trabajo, para agarrar un objeto la presión de aire ambiental presiona la ventosa contra la superficie de contacto como se presenta en la Figura 6. (RONCAL, 2015)



**Figura 6.** Ventosa de sujeción

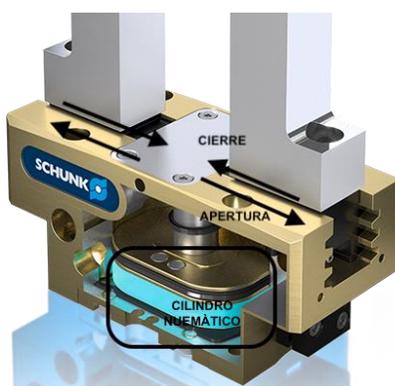
Fuente: (RONCAL, 2015)

#### 1.2. Gripper neumático industrial de dos garras.

El elemento fundamental dentro de cualquier aplicación que se utilicen robots, es el gripper. Según (ROBOTEC, 2016) son herramientas hechas a la medida del producto como también de las necesidades de producción que le permite al robot industrial manipular o sujetar objetos, en el presente proyecto serán bloques de forma prismática con dimensiones establecidas, con la finalidad desempeñar labores industriales.

### 1.2.1. Principio de funcionamiento del gripper neumático

Según (RONCAL, 2015) establece que la mayoría de las herramientas robóticas basa su principio de funcionamiento en la neumática como es el caso del gripper, de forma general en su estructura interna posee un cilindro biestable que se activa con aire comprimido, posteriormente ingresa aire al interior del cilindro; por medio de un mecanismo trasmite el movimiento a las mordazas que se cierran para sostener un objeto firmemente mientras se realiza un determinado trabajo, enseguida al cambiar la dirección del aire en el interior del cilindro, las mordazas se desplazan para dejar de sostener al objeto. En la Figura 7, se visualiza el cierre y apertura de las mordazas por medio del mecanismo que desplaza el cilindro neumático.



**Figura 7.** Funcionamiento de gripper

Fuente: (SCHUNK, 2018)

### 1.2.2. Fuerza de la gripper neumático

Según (OMEGA, 2018) establece que la fuerza es directamente proporcional a la presión que se suministra al cilindro biestable del gripper neumático, es decir si se aumenta la presión neumática en un 10% entonces habrá un incremento de la fuerza en la pinza en un 10% (este porcentaje puede aumentar en base a la capacidad de presión que pueda soportar el sistema). De manera simultánea si disminuye la presión neumática

en el sistema también disminuye la fuerza en la pinza. De acuerdo a los datos que se tiene en la Tabla 4, se puede observar que la fuerza de apertura aumenta si la presión del sistema se incrementa.

**Tabla 4**

*Valores de fuerza y presión de modelo gripper PGN 125-2*

Dato	Valor
Presión mínima [bar]	6.0
Presión máxima [bar]	8.0
Fuerza de apertura [N]	1500.0
Fuerza de cierre [N]	1650.0

Fuente: (Schunk, 2018)

### 1.2.3. Control del gripper neumático

El dispositivo que permite el accionamiento de elementos terminales del robot industrial por lo general es el módulo WAGO de entradas/salidas digitales y analógicas como se aprecia en la Figura 8, por medio de software se enlaza con el controlador del robot, para el envío de señales que acceden a activar la herramienta del robot para desarrollar cualquier aplicación. El control del gripper neumático de la celda robotizada número 3 del laboratorio de robótica industrial, se da por mediante el envío de salidas digitales para abrir y cerrar el dispositivo.



**Figura 8.** Módulo WAGO

### **1.3. Técnicas de deposición fundida.**

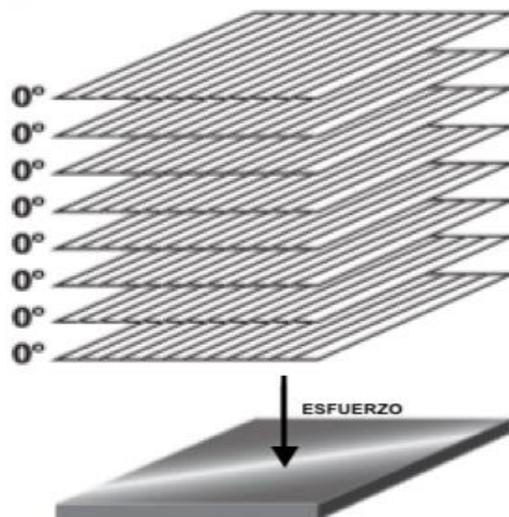
Se define el término modelado por deposición fundida FDM como un sistema de extrusión que conduce un material de impresión denominado termoplástico en forma de hilo hasta una cámara de precalentamiento que funde el material para luego fluir a través de un inyector de forma controlada para finalmente ser depositado en una plataforma donde el objeto toma forma. (Lasluisa, 2017)

Por otra parte, las técnicas de deposición fundida hacen uso de una función aditiva, que se basa en depositar material por una o varias capas de fibras de refuerzo para finalmente obtener la forma de la pieza. (Derek, 2003)

Cuando existe una orientación aleatoria-multidireccional de la fibra aparece un comportamiento isotrópico, donde las fibras son cortas y sus propiedades no cambian en todas las direcciones. En cambio, en arreglos unidireccionales de las fibras existe un comportamiento anisotrópico, donde las fibras son largas e incluso continuas que originan que características como resistencia y rigidez son paralelas a las fibras. (Derek, 2003)

#### **1.3.1. Técnicas Unidireccionales**

En esta técnica las capas de  $0^\circ$  están formadas por fibras alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado, la carga se mantiene perpendicular a las fibras como se visualiza en la Figura 9, se consigue así una baja resistencia a las propiedades mecánicas en la impresión del material, de esta manera la orientación unidireccional origina propiedades pobres. (VUKASOVIĆ , 2018)

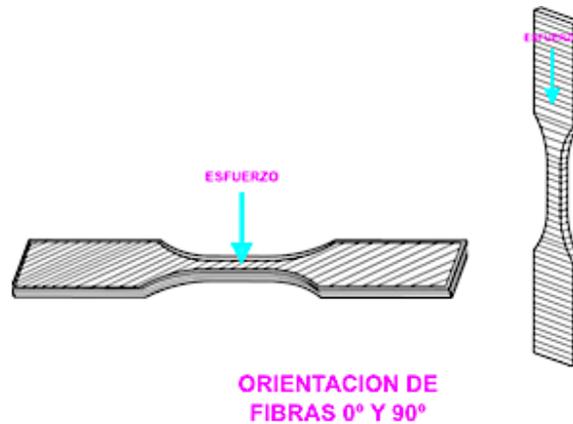


**Figura 9.** Impresión 3D unidireccional

Fuente: (Derek, 2003)

### 1.3.2. Técnicas Bidireccionales

En esta técnica de deposición de material fundido está formada por fibras de refuerzos y se aplican arreglos ortogonales de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  en sus capas. Figura 10, se obtienen resultados satisfactorios en las propiedades mecánicas del material de impresión, en sus dos direcciones horizontal y perpendicular. La disposición en sentido horizontal de las fibras hace que permanecen intercaladas en forma diagonal a la aplicación de la carga, mientras que la disposición vertical de las fibras, hace que permanezcan en dirección a la carga aplicada de esta manera resistencia máxima a la flexión, tensión y compresión mejoran de forma significativa al complementarse en estos dos tipos de disposición de las fibras. (VUKASOVIĆ , 2018)

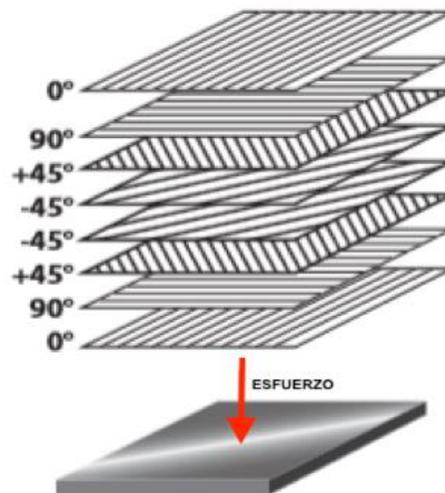


**Figura 10.** Orientación de fibras a  $0^\circ$  y  $90^\circ$

Fuente: (VUKASOVIĆ, 2018)

### 1.3.3. Técnica Multidireccional

En esta técnica son mayores las disposiciones o arreglos ortogonales entre capas de una matriz ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$ , etc.) que proporcionan mayor número de refuerzos en varias direcciones como se presenta en la Figura 11. Según (Derek, 2003) menciona que al unir varias capas compuestas mediante fibras con distintas orientaciones produce un compuesto estructural casi isotrópico.

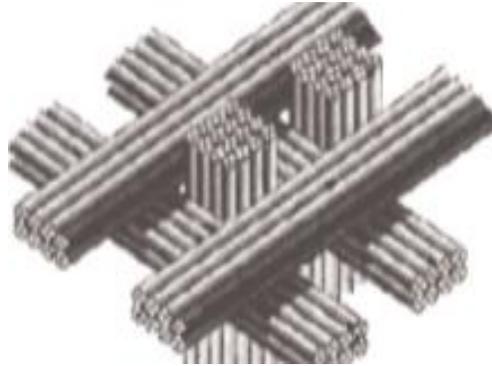


**Figura 11.** Impresión 3D multidireccional

Fuente: (Derek, 2003)

#### 1.3.4. Técnica Tridimensional

En esta técnica las fibras se organizan en patrones tridimensionales adicionando un grado más de orientación en comparación al mallado, donde se logra un refuerzo tridimensional mayor como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12.** Impresión 3D tridimensional

Fuente: (Derek, 2003)

#### 1.3.5. Materiales utilizados en deposición de material fundido

Los principales materiales utilizados en el modelado por deposición fundida son el ABS y el PLA.

- **ABS** (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) es un termoplástico cuya característica más importante es que tiene alta resistencia a agentes químicos, abrasivos e impactos, no es biodegradable además es utilizado a nivel industrial como en automóviles, electrodomésticos también en juguetes (LEGOS), incluso este material es el más utilizado en la impresión 3D, comúnmente es un plástico difícil de emplear ya que requiere de características óptimas en el proceso de extrusión como temperatura de trabajo entre 230°C a 245°C, se requiere usar una superficie caliente al imprimir

debido a su gran contracción térmica para tener un mejor acabado en el modelado de piezas. (Lasluisa, 2017)

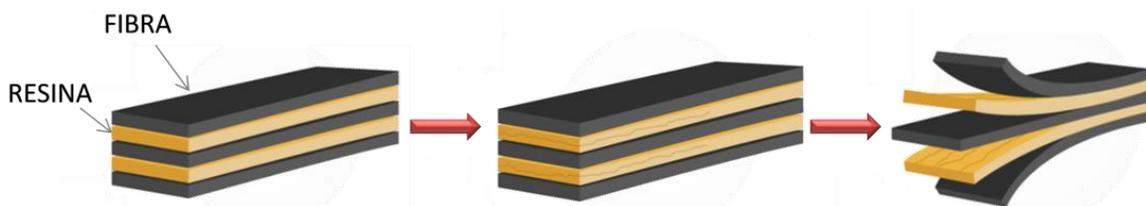
- **PLA** (Ácido Poliláctico) es un termoplástico bioactivo y biodegradable derivado de fuentes renovables como el almidón de maíz, soja, raíces de mandioca y caña de azúcar, se utiliza en implantes médicos, fibras y textiles no tejidos, su temperatura de trabajo oscila entre los 190°C y los 200°C, es el material más utilizado en impresiones 3D a nivel doméstico. (VUKASOVIĆ , 2018)

#### 1.4. Materiales compuestos

Los materiales compuestos se constituyen a partir de la asociación de dos o más materiales heterogéneos, poseen adelantos en sus propiedades como son la rigidez, resistencia, peso, entre otros, a diferencia de los materiales primarios. (Derek, 2003)

##### 1.4.1. Materiales compuestos reforzados con fibras

Estos materiales se consideran componentes de gran importancia en el ámbito tecnológico. Son materiales conformados por fibras y una resina Figura 13, una elevada resistencia a la fatiga y rigidez, a bajas y altas temperaturas, además poseen una baja densidad para conseguir una mejor relación resistencia-peso. (Navalcomposites, 2016)



**Figura 13.** Material compuesto reforzado con fibras

Fuente: (Navalcomposites, 2016)

### 1.4.2. Materiales compuestos en función de tipo de matriz

Según (Derek, 2003) establece tres alternativas para materiales compuestos según el tipo de matriz que se describen a continuación.

#### a. Materiales compuestos de matriz metálica (MMC):

Este tipo de material compuesto tiene excelentes propiedades mecánicas como son alta resistencia y por sus características de composición son de bajo peso.

#### b. Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC):

Estos materiales poseen mejores propiedades mecánicas que los materiales cerámicos tradicionales, como la resistencia y tenacidad, especialmente en rangos de bajas temperaturas. En la Figura 14 se observa un disco de freno constituido por materiales compuesto de matriz cerámica.



**Figura 14.** Disco de freno

Fuente: (Navalcomposites, 2016)

#### c. Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC):

Son materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a los agentes químicos y a la corrosión, a causa de las propiedades físicas pueden ser moldeados con

libertad de formas. Para este tipo de matriz se emplea materiales de refuerzo como la fibra de carbono y la fibra de vidrio Figura 15.



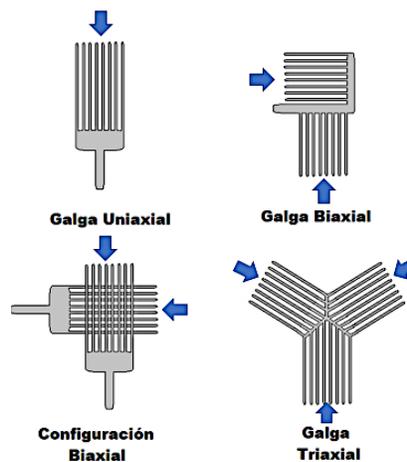
**Figura 15.** Materiales compuestos de matriz polimérica

Fuente: (Navalcomposites, 2016)

### 1.4.3. Orientación de las fibras de materiales compuestos

Los ordenamientos unidireccionales con fibras largas ocasionan propiedades anisotrópicas, con resistencia y rigidez paralelas a las fibras, (Cuando la orientación perpendicular a las fibras, la resistencia es menor que en paralelo, y se observa que disminuye con el aumento del ángulo entre las fibras y la tensión aplicada).

Las fibras también se pueden organizar en patrones tridimensionales como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16.** Orientación de fibras en materiales compuestos

Fuente: (Derek, 2003)

#### 1.4.4. Propiedades de las fibras de materiales compuestos

Si el material compuesto se va a usar en condiciones de ambientes industriales, la fibra deberá tener una resistencia a la compresión y tracción alta, rigidez y de bajo peso. Según (Derek, 2003) establece que los materiales con un módulo específico más alto se encuentra en materiales con número atómico bajo y enlace covalente, por su baja densidad, mayor resistencia y módulo específico, el inconveniente es que no son resistentes a la temperatura. A continuación, se presentan las principales características a considerar de acuerdo a la Ecuación 1 y Ecuación 2:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\sigma_y}{\rho} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

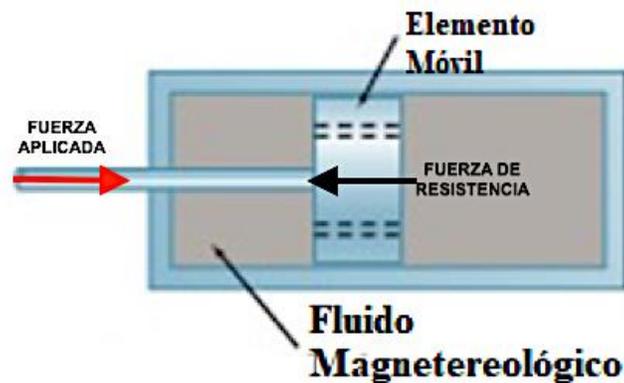
- $\sigma_y$ : Limite elástico
- $\rho$ : Densidad de fibra
- $E$ : Módulo de elasticidad de la fibra

#### 1.5. Fluidos inteligentes

Estos fluidos tratan de simular la habilidad que posee la naturaleza para reaccionar a estímulos externos. Hace más de 50 años ya se utilizaban materiales a los cuales también se los puede llamar inteligentes pues cambian su forma, ductilidad, conductividad entre otras características. (García & Rodrigues, 2012)

### 1.5.1. Fluidos magnetoreológicos en amortiguadores

Los fluidos magnetoreológicos son fluidos controlables que responden a la activación de un campo magnético. Los fluidos permiten cambiar reversiblemente de un flujo lineal en forma líquida-viscosa a semisólidos que posean un comportamiento controlable al varía su límite elástico en milisegundos en presencia de campo. Este cambio se puede apreciar en la fuerza de resistencia de los amortiguadores magnetoreológicos al aplicar una fuerza en el elemento móvil como se visualiza en el Figura 17. (Yang, Spencer, Carlson, & Sain, 2002)



**Figura 17.** Fluido magnetoreológico en suspensión

Según (García & Rodrigues, 2012) mencionan que ante la fuerza aplicada, el amortiguador despliega una fuerza de resistencia total ( $F_{RT}$ ) conformada por la fuerza controlable del esfuerzo de cizallamiento dependiente del campo ( $\tau_0$ ) y una fuerza incontrolable respecto a la viscosidad ( $\eta$ ) que es independiente del campo y a la fricción producida. En la Ecuación 3, se representa la fuerza de resistencia del amortiguador que es igual a la fuerza controlable más la fuerza incontrolable.

$$F_{RT} = F_{\tau_0} + (F_{\eta} + F_f) \quad \text{Ecuación 3}$$

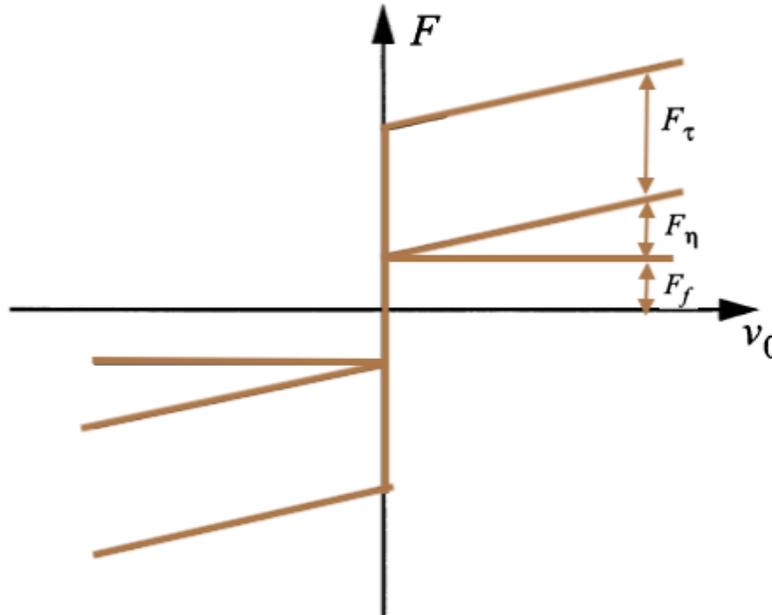
Donde:

- $F_{\tau_0}$ : Fuerza de cizallamiento dependiente del campo
- $F_{\eta}$ : Fuerza de viscosidad independiente del campo
- $F_f$ : Fuerza de fricción

El rango dinámico ( $R_D$ ) del amortiguador se establece como la relación entre la fuerza total de resistencia del amortiguador y la fuerza incontrolable. Según (Yang, Spencer, Carslon, & Sain, 2002) mencionan que el rango dinámico (Ecuación 4) y fuerza controlable (Ecuación 5) son los dos parámetros más importantes utilizados para evaluar el rendimiento general de los amortiguadores MR.

$$R_D = 1 + \frac{F_{\tau_0}}{F_{\eta} + F_f}$$

**Ecuación 4**



**Figura 18.** Descomposición de fuerzas para amortiguadores MR

Fuente: (Yang, Spencer, Carslon, & Sain, 2002)

De la descomposición de fuerzas que plantea (Yang, Spencer, Carlson, & Sain, 2002) en la Figura 18, se obtiene la Ecuación 5 y Ecuación 6.

$$F_{\tau_0} = \left( 2,07 + \frac{12\eta Q}{12\eta Q + 0,4wh^2\tau_0} \right) \frac{\tau_0 LA_a}{h} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$F_{\eta} = \left( 1 + \frac{whv_a}{2Q} \right) \frac{12\eta Q LA_a}{wh^3} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- $\eta$ : Viscosidad del fluido
- $h$ : Distancia entre hierro
- $L$ : Longitud del polo magnético
- $Q$ : Caudal
- $w$ : Ancho de area
- $\tau_0$ : Esfuerzo cortante dependiente del campo
- $A_a$ : Area de la seccion transversal del amortiguador
- $v_a$ : Velocidad del amortiguador

## CAPÍTULO II

### DISEÑO DEL GRIPPER

En este capítulo se contempla tanto la etapa de diseño mecánico como también el diseño de la parte electrónica del gripper neumático, se establece las ponderaciones para la selección correcta de materiales, además de componentes para la fabricación y la puesta de la herramienta dentro de la celda robotizada 3 del laboratorio de robótica industrial. Se instaura una metodología adecuada con la finalidad de una mejor selección de componentes y materiales, se emplea un esquema que presenta un grado de prioridades propuesta por (Cifuentes & Izurieta, 2000), la cual se visualiza en la Tabla 5, se trata de una escala compuesta de 5 niveles que establece una relación porcentual en rangos de acuerdo a los requerimientos establecidos.

**Tabla 5**  
*Grado de prioridad*

<b>Evaluación</b>	<b>% de Óptimo</b>	<b>Significado</b>
<b>1</b>	<35	Insatisfactorio
<b>2</b>	35-50	Satisfactorio
<b>3</b>	51-75	Bueno
<b>4</b>	76-89	Muy bueno
<b>5</b>	90-100	Óptimo

Fuente: (Cifuentes & Izurieta, 2000)

#### 2.1 Parámetros de diseño del gripper

Se establece los parámetros de diseño de acuerdo a las características técnicas del robot que se posee en el laboratorio de robótica industrial de la institución, se trata del

robot de la empresa alemana de marca KUKA modelo KR-16, es un manipulador robótico que permite una excelente solución en diversas aplicaciones industriales.

### 2.1.1 Consideraciones de diseño

Se considera cómo dato importante para el diseño las características técnicas del robot presente en el laboratorio de robótica industrial, los datos se presentan en la Tabla 6, se sintetiza la información y establece una relación de acuerdo a las características más importantes para el correcto diseño del efector final.

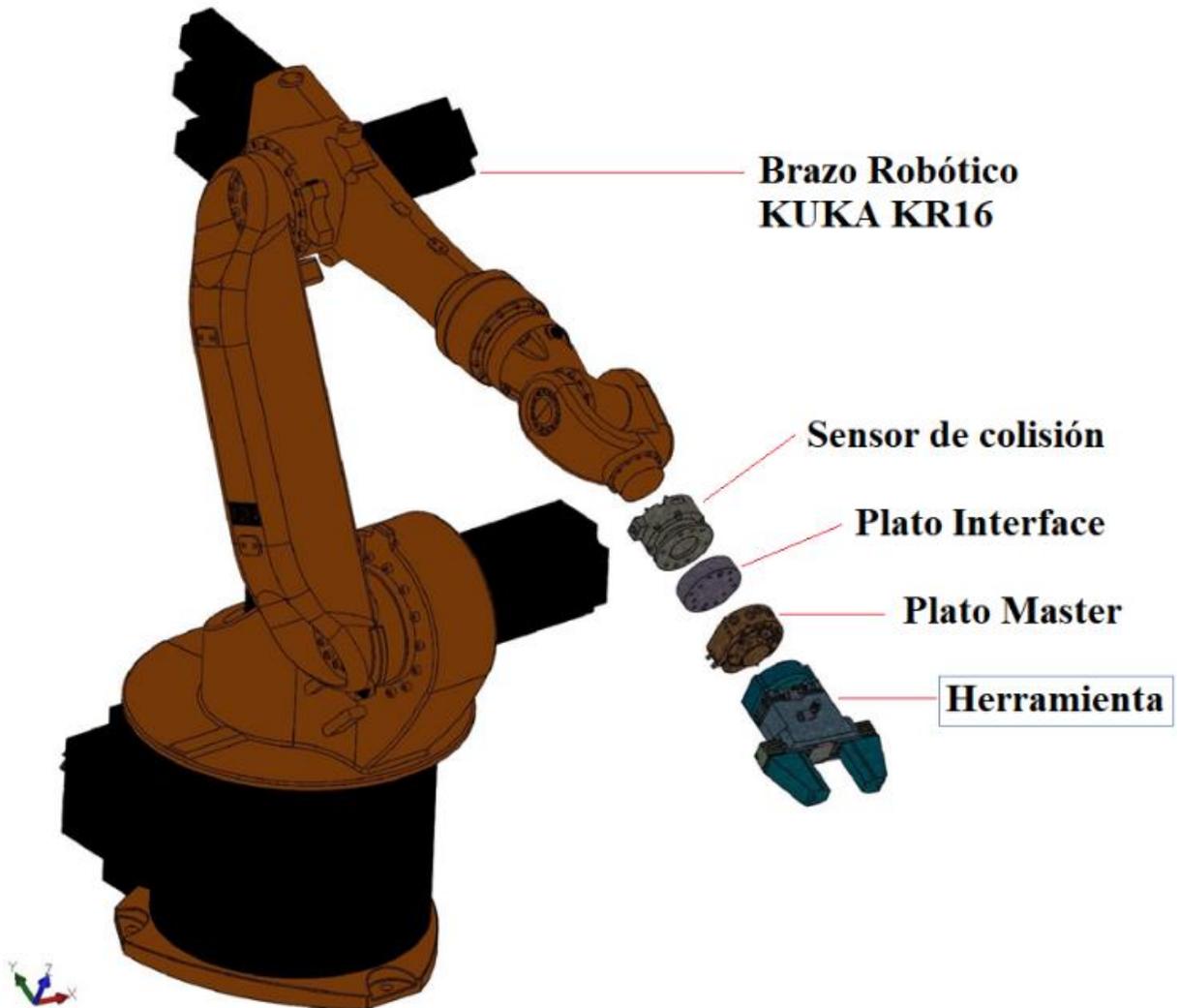
**Tabla 6**

*Límites de carga KUKA KR-16*

N.º	Característica	Datos
1	Carga útil	16 [kg]
2	Carga adicional brazo de oscilación	Variable
3	Carga adicional columna giratoria	20 [kg]
4	Carga adicional brazo	10 [kg]
5	Muñeca central	MC 16 [kg]
6	Carga total máxima distribuida	46 [kg]
7	Tipo de protección	IP 65
8	Tipo de protección de la muñeca	IP65

Fuente: (KUKA, 2019)

Se considera la tesis del “DISEÑO DE UN CAMBIADOR AUTOMÁTICO DE HERRAMIENTAS PARA TRES HERRAMIENTAS DEL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR 16-2 EN EL LABORATORIO DE ROBÓTICA INDUSTRIAL DE LA ESPEL.”, donde se establecen parámetros de acuerdo a la capacidad de carga del robot, además los dispositivos empleados son muy importantes para realizar cualquier diseño, se toma como referencia la instalación neumática de la celda robotizada número 3 y el montaje actual en el robot Figura 19, debido a que el accionamiento del gripper se dará con las condiciones presentes en el laboratorio de robótica industrial.



**Figura 19.** Montaje robot-herramienta

Según la Tabla 6 la carga nominal en el extremo del robot es de 16 Kg, establece que el peso total de la herramienta no debe pasar este valor para salvaguardar la integridad de los elementos mecánicos del robot. Además se debe tomar en cuenta los demás dispositivos como son el sensor de colisión y los platos de acople.

Un parámetro de diseño muy importante a considerar es el peso del objeto que va a sujetar el gripper, la herramienta será acoplada al plato master que se encuentra

implementado actualmente en el robot de acuerdo a la celda de trabajo número 3, para permitir el agarre de objetos con determinadas formas generando aplicaciones como paletizado dentro de la zona de trabajo del robot. Los objetos que el gripper neumático va a sujetar son de forma prismática con dimensiones aproximadas de  $0.1\text{m} \times 0,1\text{m} \times 0,05\text{m}$ , de acuerdo a la geometría del gripper neumático, se pretende sujetar a cuerpos con distintos tipos de material como madera, aluminio, plástico y diferentes cargas para el normal funcionamiento de la herramienta.

## **2.2 Estructura mecánica del gripper**

Se plantea las siguientes alternativas para la selección de la estructura mecánica del gripper neumático en base al tipo de carrera del gripper que sea de carrera corta y además el tipo de desplazamiento que sea lineal, se escoge dentro de las opciones más convencionales del mercado de proveedores de pinzas para robot industrial a nivel de América Latina. El modelo de la pinza que se seleccione debe tener características similares con la herramienta que se encuentra en operación en el brazo robótico del laboratorio de la institución.

### **2.2.1 Selección del modelo de gripper**

Para el diseño de la estructura mecánica del gripper se consideran las características técnicas del robot KUKA KR-16 según la Tabla 6, como son la carga nominal en el extremo de la muñeca, peso dispositivos, peso de la herramienta y aplicaciones específicas.

#### **a. Alternativas de selección de modelo de diseño de gripper neumático**

En la Tabla 7 se plantean las tres alternativas de selección con sus respectivas características, para la correcta elección del modelo del gripper neumático.

**Tabla 7**  
*Alternativas de diseño del modelo del gripper*

Alternativa 1. Gripper paralelo PNG 125	Alternativa 2. Pinzas paralelas de dos mordazas	Alternativa 3. Adaptative gripper Hand-E
		
Características	Características	Características
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carrera/mordaza 6.0 [mm]</li> <li>• Fuerza de cierre 2300.0 [N]</li> <li>• Fuerza min del resorte 500.0 [N]</li> <li>• Peso 1.65 [Kg]</li> <li>• Peso recomendado de la pieza 7.5 [Kg]</li> <li>• Presión nominal 6.0 [bar]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carrera por mordaza 6.0 [mm]</li> <li>• Fuerza de apertura 3280.0 [N], Fuerza de cierre 3100.0 [N]</li> <li>• Presión nominal 8.0 [bar]</li> <li>• Peso 1.5 [Kg]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carrera por mordaza 25.0 [mm]</li> <li>• Fuerza de apertura 130.0 [N], Fuerza de cierre 60.0 [N]</li> <li>• Masa 1.0 [Kg]</li> <li>• Velocidad de cierre 150 [mm/s]</li> </ul>

### b. Criterios de selección de modelo del gripper

Se hace uso del grado de prioridad (ver Tabla 5), se escoge la mejor alternativa del modelo de gripper en fundamento a los parámetros siguientes.

- Carrera de mordaza
- Fuerza de apertura
- Fuerza de cierre
- Masa

- Tipo de energía.
- Presión nominal
- Velocidad de cierre
- Grado de protección
- Temperatura de funcionamiento

### c. Selección de la mejor alternativa del modelo del gripper

En la Tabla 8 se presenta la validación de las tres alternativas, según la escala de prioridades que se otorga a cada criterio de selección.

**Tabla 8**

*Validación de las alternativas del modelo del gripper*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Carrera de mordaza	5	5	2
Fuerza de apertura	5	4	2
Fuerza de cierre	4	3	2
Masa	4	4	5
Tipo de energía	5	5	2
Presión nominal	5	5	1
Grado de protección	5	5	5
Temperatura de funcionamiento	5	4	4
Velocidad de cierre	4	3	3
<b>Total</b>	<b>42</b>	37	26

Según el dato obtenido de la valoración entre las tres alternativas que se propone en la Tabla 8, la opción que más se adapta a los parámetros establecidos es la alternativa 1 por lo cual se emplea un modelo similar al Gripper paralelo PNG 125 debido a su fuerza de apertura, peso, presión nominal y velocidad de cierre como propiedades más destacadas, en comparación con las otras dos alternativas. Además, cabe mencionar que el modelo de gripper seleccionado es de gran ayuda para el inicio del diseño

estructural de la herramienta, se debe realizar modificaciones en la misma con la finalidad de poder integrar los dispositivos neumáticos y electrónicos conjuntamente con su estructura interna.

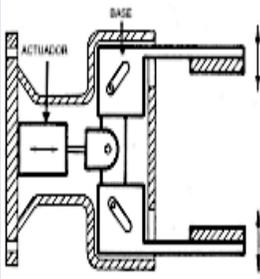
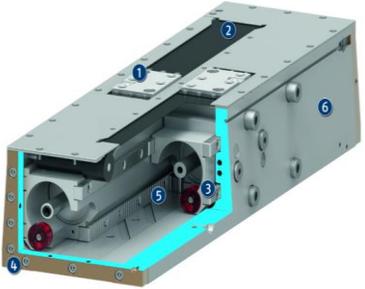
## 2.3 Estructura mecánica de regulación de velocidad de carrera.

### a. Alternativas de selección mecanismo de regulación de velocidad

Para la selección del mecanismo de regulación se establece las tres alternativas (ver Tabla 9) en base a los tipos de accionamiento más comunes que se tiene para generar el desplazamiento de las mordazas para abrir y cerrar el gripper. Se precisa de un mecanismo que permita generar el desplazamiento en conjunto de las garras del gripper por medio de un actuador neumático o un dispositivo eléctrico.

**Tabla 9**

*Alternativas de selección del mecanismo de regulación de velocidad*

Alternativa 1. Mecanismo principio de gancho de cuña.	Alternativa 2. Mecanismo principio de palanca.	Alternativa 3. Mecanismo piñón cremallera
		
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Características</b></p>	<p><b>Características</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desplazamiento autocentrante y lineal</li> <li>• Alta fuerza de agarre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desplazamiento autocentrante y lineal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agarre uniforme, preciso</li> <li>• Desplazamiento autocentrante, lineal</li> </ul>

CONTINÚA 

- |   |                              |                                       |
|---|------------------------------|---------------------------------------|
| • Funcionamiento neumático              | • Alta fuerza de agarre      | • Funcionamiento neumático, eléctrico |
| • Sujeta la pieza de forma sincronizada | • Funcionamiento mecánico    | • Alta fuerza agarre                  |
|   | • Sujeción de pieza uniforme | • Uso en carrera larga                |
|   | • Uso en carrera corta       |                                       |

### **b. Criterios de selección de mecanismo de regulación de velocidad**

Se considera la herramienta de ponderación de la Tabla 5, para seleccionar la mejor alternativa del mecanismo para la regulación de velocidad en base a los siguientes parámetros.

- Agarre
- Desplazamiento
- Precisión
- Accionamiento
- Desgaste por fricción
- Peso del mecanismo
- Fuerza de agarre
- Tamaño
- Velocidad
- Aplicación

### c. Selección del mecanismo de regulación de velocidad de carrera

En la Tabla 10 se presenta la validación de las tres alternativas, según la escala de prioridades que se otorga a cada criterio de selección.

**Tabla 10**

*Validación de alternativas del mecanismo de regulación de velocidad*

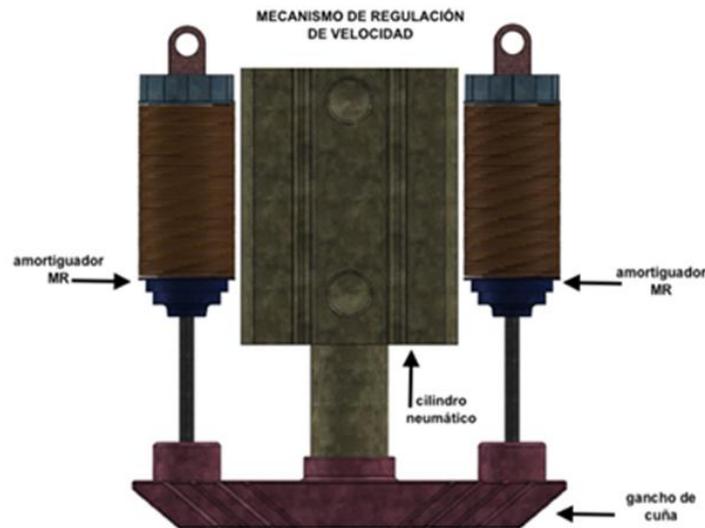
Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Agarre	5	5	5
Desplazamiento	5	4	5
Precisión	4	3	3
Accionamiento	5	3	4
Desgaste por fricción	3	4	3
Peso del mecanismo	3	4	2
Fuerza de agarre	5	3	5
Tamaño	4	5	4
Velocidad	4	4	3
Aplicación	5	4	5
<b>Total</b>	<b>43</b>	39	40

Según el dato obtenido de la valoración de las tres alternativas que se propone en la Tabla 10, la opción que más se adapta a los parámetros establecidos es la alternativa 1 por lo cual se emplea un mecanismo de regulación de velocidad de carrera gripper de gancho de cuña debido a su tipo de desplazamiento, precisión, accionamiento y aplicación como características más notables y superiores que las de las otras dos alternativas.

#### 2.3.1 Diseño del mecanismo de regulación de velocidad

Luego de establecer la mejor alternativa para el diseño del mecanismo de regulación de velocidad, se procede con el diseño mediante software CAD con el mecanismo

seleccionado, se desarrolla un diseño interno correspondiente a la estructura como se muestra en la Figura 20.



**Figura 20.** Mecanismo de regulación de velocidad

El elemento principal del mecanismo diseñado en la Figura 20 es el cilindro neumático, debido a que es el encargado de generar la fuerza para la apertura y cierre de las garras. Según el mecanismo de regulación de velocidad que se seleccionó en la sección 2.3 se precisa de un accionamiento neumático para generar el desplazamiento lineal de las mordazas, se utiliza un pistón de doble efecto debido a que se tiene dos estados que son la apertura y el cierre del gripper, los parámetros para la selección del actuador neumático se establecen a continuación.

Según (Solé, 2007) establece que las principales variables a considerar en la selección de los cilindros neumáticos son la carga, la fuerza del cilindro, el consumo de aire y la velocidad del pistón.

Uno de los principales parámetros que se toma en cuenta para la selección del pistón es su carrera, se establece como dato primordial para realizar los respectivos cálculos, el valor es de 0.025 m además se precisa de un diámetro del cilindro de 0.032 m por el espacio limitado que debe tener la estructura interna del gripper.

#### a. Cálculos de parámetros para la selección del cilindro neumático

- **Fuerza del cilindro [F]**

La fuerza se calcula con la siguiente Ecuación 7, según (Solé, 2007):

$$F = P_{aire} \times \text{Área}_{pistón} \quad \text{Ecuación 7}$$

De la Ecuación 7 se divide para 10 por conversión de unidades, donde los parámetros se fijan convencionalmente para realizar los cálculos de manera que la fuerza se mide en [N], relacionada con la presión en [bar], el diámetro en [mm] y el área transversal en [mm<sup>2</sup>]. La fórmula de la fuerza se puede expresar:

$$F = \frac{P_{aire} \times A_{pistón}}{10} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- $F$ : Fuerza del cilindro en [N]
- $P_{aire}$ : Presión de aire en [bar]
- $A_{pistón}$ : Área del pistón en [mm<sup>2</sup>]

Según (Solé, 2007) establece que los cilindros de doble efecto (no poseen un mecanismo para retornar a su posición de equilibrio, por esta razón la fuerza no disminuye en la carrera de avance, pero sí en su carrera de retroceso, esto se da debido

a la disminución del área del émbolo por la existencia del vástago. Las expresiones matemáticas correspondientes son:

$$F_{avance} = P_{aire} \times \frac{\pi D^2}{40} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$F_{retroceso} = P_{aire} \times \frac{\pi(D^2 - d^2)}{40} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- $F_{avance}$ : Fuerza de avance en [N]
- $F_{retroceso}$ : Fuerza de retroceso en [N]
- $P_{aire}$ : Presión del aire [bar]
- $D$ : Diámetro del cilindro en [mm]
- $d$ : Diámetro del vástago del pistón en [mm]

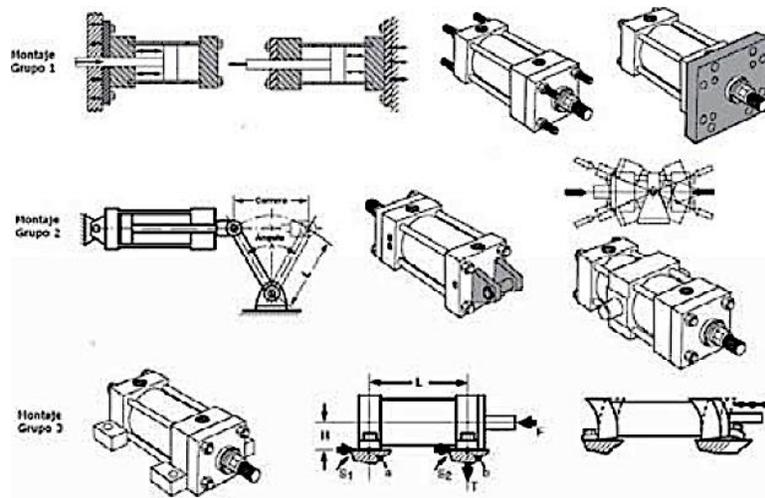
Al reemplazar los valores en la (Ecuación 9) se obtiene:

$$F_{avance} = 6bar \times \frac{\pi(32mm)^2}{40}$$

$$F_{avance} = 482,548 [N]$$

- **Fuerza de carga del cilindro [F]**

Para el cálculo de la fuerza de carga es necesario mencionar el tipo de montaje del cilindro, se escoge el montaje grupo 1 según la Figura 21, debido a que el pistón debe permanecer fijo. Es el mejor sistema ya que las fuerzas sobre el vástago están equilibradas y los elementos de fijación (tornillos, tuercas, arandelas, etc.) sólo están sometidos a una simple tensión o cizalladura (Solé, 2007)



**Figura 21.** Tipos de montajes de cilindros

Fuente: (Parker Hannfin Corporation, 2019)

Se utiliza la siguiente expresión: (Solé, 2007)

$$F_{carga} = P_{aire} \times \frac{\pi D^2}{40}$$

**Ecuación 11**

$$F_{carga} = 6bar \times \frac{\pi(32mm)^2}{40}$$

$$F_{carga} = 482,548 [N]$$

- **Longitud del vástago [m]**

Se calcula con la siguiente expresión:

$$longitud\ básica = Carrera\ actual \times Factor\ de\ pandeo$$

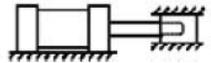
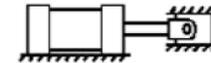
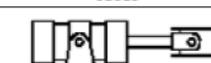
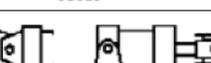
**Ecuación 12**

Donde el factor de pandeo se obtiene de la Figura 22, el valor es 2 de acuerdo a la conexión del vástago en el extremo que va unido al gancho de cuña, el tipo de conexión III soporte sin guiado rígido.

Se reemplaza los datos en la (Ecuación 12) y se tiene la longitud básica del vástago.

$$longitud\ básica = 0.025m \times 2$$

$$\text{longitud básica} = 0.05\text{m}$$

Tipos de montaje	Conexión del extremo del vástago	Tipo de conexión	Factor de pandeo
Grupos 1 o 3 - Los cilindros de gran longitud de carrera deben montarse usando en un extremo una base rígida y alineada para soportar la fuerza principal y en el extremo opuesto un soporte parecido. Se aconseja un soporte intermedio para el caso de carreras muy largas	Fijo y guiado rígido	I 	0,5
	Pivote y guiado rígido	II 	0,7
	Soporte sin guiado rígido	III 	2
Grupo 2	Pivote y guiado rígido	IV 	1
	Pivote y guiado rígido	V 	1,5
	Pivote y guiado rígido	VI 	2

**Figura 22.** Factor de pandeo

Fuente: (Parker Hannfin Corporation, 2019)

- **Consumo de aire [L/cm]**

Este dato se obtiene de la Tabla 11, expresa el consumo de aire en [Litros/cm] de carrera a una de presión de trabajo de 6 [bar] para varios tamaños estándares de cilindros a igual presión. (Solé, 2007)

**Tabla 11**

*Consumo de aire*

Diámetro pistón	Diámetro vástago	Extensión del vástago [L/cm]	Retracción del vástago [L/cm]	Consumo combinado [L/cm]
10	4	0,054	0,046	0,1
12	6	0,079	0,065	0,144
16	6	0,141	0,121	0,262
20	8	0,22	0,185	0,405
25	10	0,344	0,289	0,633
<b>32</b>	<b>12</b>	<b>0,563</b>	<b>0,484</b>	<b>1,047</b>
40	16	0,88	0,739	1,619

Fuente: (Solé, 2007)

- **Velocidad del pistón**

Se calcula con la siguiente expresión (Solé, 2007):

$$v_p = \frac{0,987 + P_{aire}}{0,987} \times \frac{l \times n}{100} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

- $v_p$ : Velocidad del pistón [dm/min]
- $l$ : carrera del pistón [mm]
- $n$ = número de ciclos por minuto

Se reemplazan los datos en la (Ecuación 13) de la velocidad del pistón para un número de ciclos por minuto de 10.

$$v_p = \frac{0,987 + 6bar}{0,987} \times \frac{32mm \times 10}{100}$$

$$v_p = \frac{17,7dm}{min} \times \frac{1m}{10dm} \times \frac{1min}{60s}$$

$$v_p = 0,0295 \frac{m}{s}$$

#### **b. Cilindro neumático de doble efecto**

Se selecciona el cilindro neumático de doble efecto Compact Pneumatic cylinders marca Parker, modelo 1QS032DC7N0025, (Figura 23); que tiene los parámetros establecidos y calculados en la sección 2.3.1-a. Las especificaciones técnicas del cilindro neumático tales como dimensiones se encuentran en el Anexo A1 y Anexo A2.



**Figura 23.** Cilindro de doble efecto

Fuente: (Parker Hannfin Cooperation , 2019)

Las principales características técnicas del pistón se presentan en la Tabla 12, obtenidos del catálogo del producto proporcionado por el fabricante.

**Tabla 12**

*Características principales cilindro doble efecto Parker*

Características técnicas	
Fuerza de avance	483 [N]
Fuerza de retroceso	362 [N]
Modelo	1QS032DC7N0025
Serie	P1Q-Económica
Versión	S-milímetros
Diámetro	32 [mm]
Funcionamiento	D- doble efecto
Material	C- acero inoxidable
Estilo de montaje	7- ambos extremos roscados
Funcionamiento magnético	N-magnético roscas NPT
Longitud de carrera	0025: 25 [mm]
Presión de operación	10 bar (145 PSIG) máx.
Rango de temperatura	-5°C to 60°C (23°F to 140°F)
Requisitos de filtración:	Aire seco filtrado de 40 micras
Error total de salida	1.5% a T ambiente = 25°C
Sensibilidad de salida	66 to 185 mV/A

Fuente: (Parker Hannfin Cooperation , 2019)

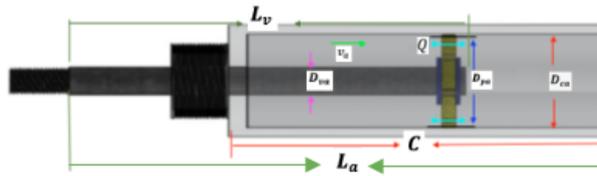
### c. Diseño del sistema de amortiguación

Los cilindros de doble efecto no poseen un muelle para generar el retorno del vástago a su posición inicial, por esta razón se plantea un cilindro magnetoreológico en el regreso del vástago con el fin de atenuar este movimiento, de esta manera se reduce la velocidad de carrera del gripper al momento de cerrar las mordazas conforme sea sujetado un objeto de prueba. Debido a la construcción interna del gripper el cilindro que va sujeto al gancho de cuña transmite su fuerza en el centro del mismo, se coloca dos amortiguadores a cada extremo del gancho de cuña para equilibrar las fuerzas ejercidas sobre este mecanismo, Figura 24.

Para el diseño del sistema de amortiguación se precisa de amortiguadores magnetoreológicos. Se establecen los parámetros para el diseño del amortiguador indicados en la siguiente Tabla 13:

**Tabla 13**  
*Parámetros de diseño del amortiguador*

Parámetro	Dato
Viscosidad plástica $\eta$ [Pa - s]	0,28
Carrera $C$ [m]	0,025
Diámetro del amortiguador $D_{ca}$ [m]	0,012
Diámetro del pistón $D_{pa}$ [m]	0,01
Longitud extendida $L_a$ [m]	0,09
Diámetro de vástago $D_{va}$ [m]	0,004
Longitud del vástago $L_v$ [m]	0,045



**Figura 24.** Esquema general del amortiguador

Se establece la velocidad del cilindro magnetoreológico de acuerdo al dato obtenido en la (sección 2.3.1-a) con respecto a la velocidad del cilindro neumático con un valor de  $v_a = 0.0295 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , este dato se toma en cuenta debido a que los dos cilindros van unidos al gancho de cuña, entonces se precisa que su movimiento sea uniforme.

Se determina el caudal ( $Q$ ) (Ecuación 15) que genera el fluido al pasar de una cámara a otra dentro de la cavidad interna del amortiguador, en función de la velocidad del amortiguador, además es necesario conocer el área transversal del amortiguador ( $A_a$ ) (Ecuación 14), el diámetro del pistón se establece acorde a las condiciones de la estructura interna del gripper conforme a sus dimensiones que se va a diseñar, planteando así un  $D_{pa} = 0.01 \text{ [m]}$ .

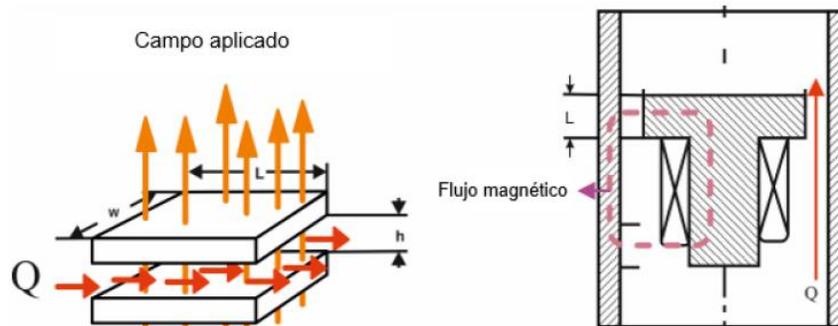
$$A_a = \frac{\pi(D_{ca})^2}{4} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$A_a = \frac{\pi(0.012m)^2}{4} = 1,130 \times 10^{-4} m^2$$

$$Q = A_a \times v_a \quad \text{Ecuación 15}$$

$$Q = (1,130 \times 10^{-4} m^2) \left( 0.0295 \frac{m}{s} \right) = 3,336 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

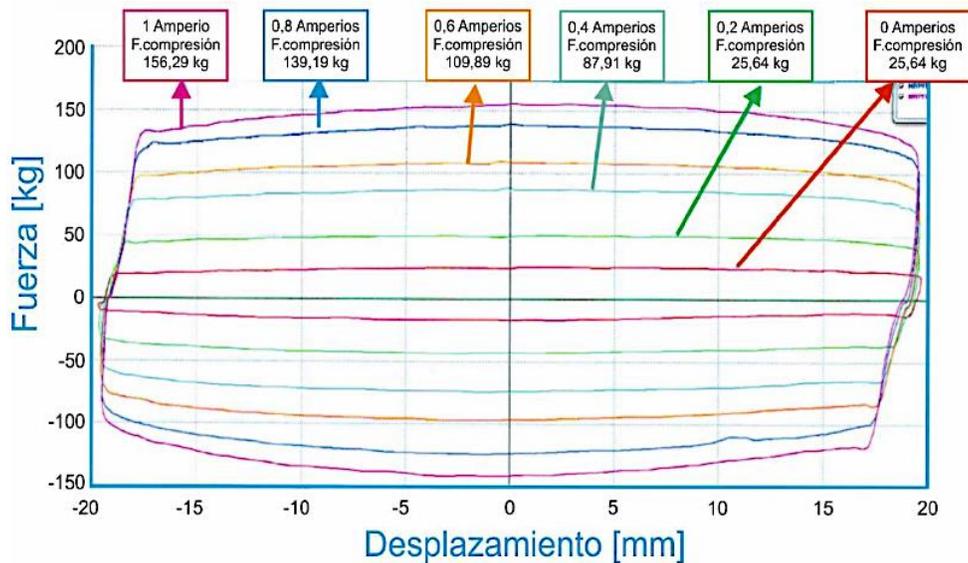
En la Figura 25, se observa el flujo magnético del fluido al pasar de una cavidad a otra dentro de la cámara del amortiguador MR cuando se aplica un campo magnético.



**Figura 25.** Uso de fluido MR en modo plato-paralelo

Fuente: (Escoraza & Medina , 2017)

Se parte de los datos de la Figura 26 por el amortiguador MR comercial RD-8040-1 (Carrera corta) de la empresa LORD para determinar la distancia entre hierro  $h$  a partir del rango dinámico  $R_D$  y el radio del pistón del amortiguador.



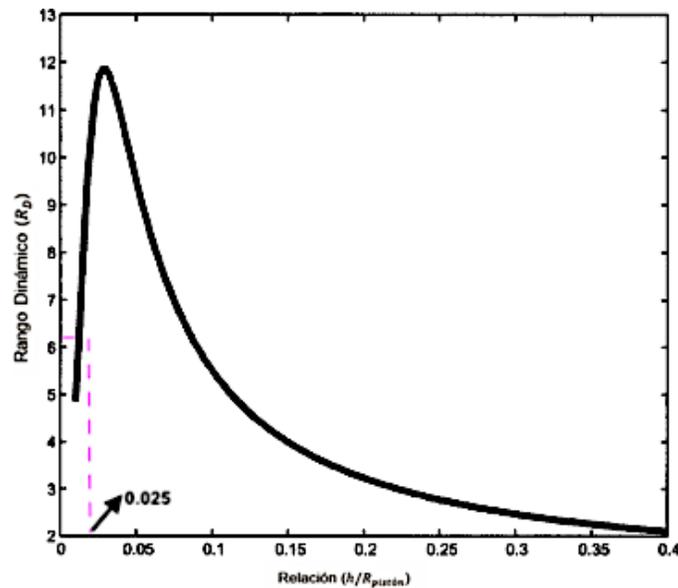
**Figura 26.** Comportamiento de amortiguador RD-8040-1 (Carrera corta)

Fuente: (Escoraza & Medina , 2017)

Se reemplazan los valores de la fuerza en la (Ecuación 4) y se obtiene:

$$R_D = 1 + \frac{156,29kg - 25,64kg}{25,64kg} = 6,1$$

De la Figura 27 se establece el dato que relaciona los parámetros de la distancia entre hierro y radio del pistón con el rango dinámico.



**Figura 27.** Rango dinámico vs Relación (h/R pistón)

Fuente: (Yang, Spencer, Carlson, & Sain, 2002)

$$\frac{h}{R_{pa}} = 0,025$$

**Ecuación 16**

$$h = 0,025 \times \left(\frac{0,01m}{2}\right)$$

$$h = 125 \times 10^{-6}m$$

Una vez determinada la distancia del entrehierro, se calcula la longitud del polo magnético ( $L$ ) en función de la fuerza incontrolable, de acuerdo a la estructura interna del gripper se emplea un cilindro neumático y dos amortiguadores para equilibrar las fuerzas

ejercidas sobre el gancho de cuña, se establece entonces que sea menor que la fuerza de retroceso ejercida por el cilindro neumático y si la fuerza de fricción tiende a cero por el uso del fluido magnetoreológico ya que muestra una base lubricada, entonces la fuerza incontrolable se define como:

$$F_{\eta} + F_f < \frac{F_{retroceso}}{2} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$F_{\eta} < \frac{F_{retroceso}}{2}$$

$$F_{\eta} < \frac{362N}{2} = 181 [N]$$

Se determina el ancho ( $w$ ) de área expuesta al campo magnético con la siguiente expresión:

$$w = \pi \left( \frac{D_{ca}}{2} + \frac{D_{pa}}{2} \right) \quad \text{Ecuación 18}$$

$$w = \pi \left( \frac{D_{pa} + 2h}{2} + \frac{D_{pa}}{2} \right) \quad \text{Ecuación 19}$$

$$w = \pi \left( \frac{0,01m + 2(125 \times 10^{-6}m)}{2} + \frac{0,01m}{2} \right) = 0,032m$$

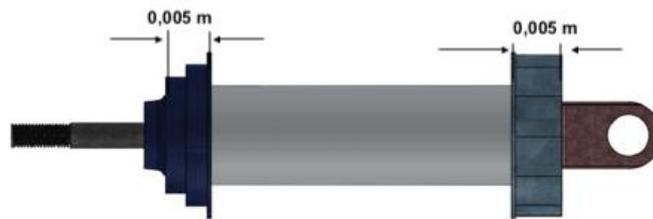
Al reemplazar los valores calculados en la (Ecuación 19) para determinar la longitud del polo magnético ( $L$ ), se emplea un valor de viscosidad constante del fluido MRF-140-CG de ( $\eta = 0,28Pa \times s$ ), se obtiene:

$$L = \frac{F_{\eta} w h^3}{12\eta Q A_a \left( 1 + \frac{w h v_a}{2Q} \right)} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$L = \frac{(181N)(0,032m)(125 \times 10^{-6}m)^3}{12 \left(0,28 \frac{Ns}{m^2}\right) \left(3,336 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right) (1,130 \times 10^{-4}m^2) \left[ 1 + \frac{(0,032m)(1259 \times 10^{-6}m) \left(0,0295 \frac{m}{s}\right)}{2 \left(3,336 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right)} \right]}$$

$$L = 10 \times 10^{-3}m$$

En la Figura 28, se visualiza la longitud del polo magnético para el amortiguador, cabe recalcar que se divide en dos secciones para incrementar el campo magnético los cuales pueden ser arbitrarios según la conexión de la salida PWM.



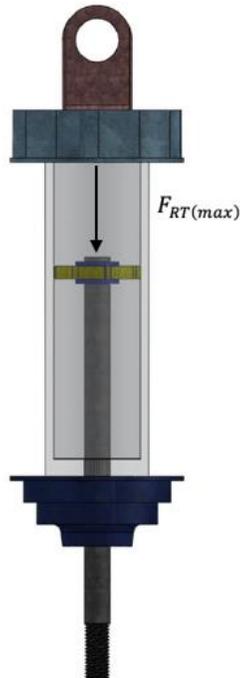
**Figura 28.** Distribución de polos

Además, se tiene que la mínima cantidad de volumen de fluido activo ( $V$ ) correspondiente al polo magnético está dada por la siguiente expresión.

$$V = Lwh \quad \text{Ecuación 21}$$

$$V = (10 \times 10^{-3}m)(0,032m)(125 \times 10^{-6}m) = 4 \times 10^{-8}m^3$$

Se procede a determinar la intensidad de campo magnético ( $B$ ), para generar una velocidad del amortiguador ( $v_a = 0,0295 \text{ m/s}$ ), el dato de la fuerza de resistencia total máxima del amortiguador  $F_{RT(max)}$  se estima que sea las terceras partes aproximadamente de la fuerza de retroceso del cilindro neumático. Se precisa que el vástago al retornar a su posición inicial disminuya su velocidad generando el efecto deseado en el cierre del gripper, Figura 29.



**Figura 29.** Fuerza de resistencia total

El esfuerzo cortante ( $\tau_0$ ) se determina con la fuerza total máxima establecida para el amortiguador  $F_{RT(max)}$  en base al valor de la fuerza de cizallamiento  $F_{\tau_0}$  al despejar esta variable de la (Ecuación 3) se obtiene:

$$F_{\tau_0} = F_{RT} - (F_{\eta} + F_f) \quad \text{Ecuación 22}$$

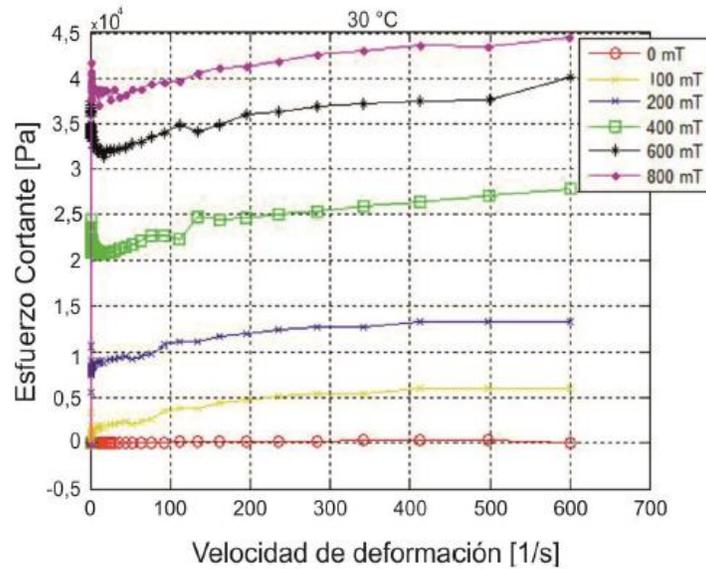
$$F_{\tau_0} = 240N - (181N - 0N) = 60N$$

Al reemplazar los datos obtenidos en la (Ecuación 22) y despejar el esfuerzo cortante inicial se obtiene:

$$\tau_0 = 2190Pa$$

Según el dato obtenido de  $\tau_0$ , se establece la intensidad de campo magnético ( $B \leq 0,1Teslas$ ), a través de los resultados presentados en las pruebas del amortiguador a diferentes campos magnéticos con una temperatura de  $30^{\circ}C$ , debido a que al crear un

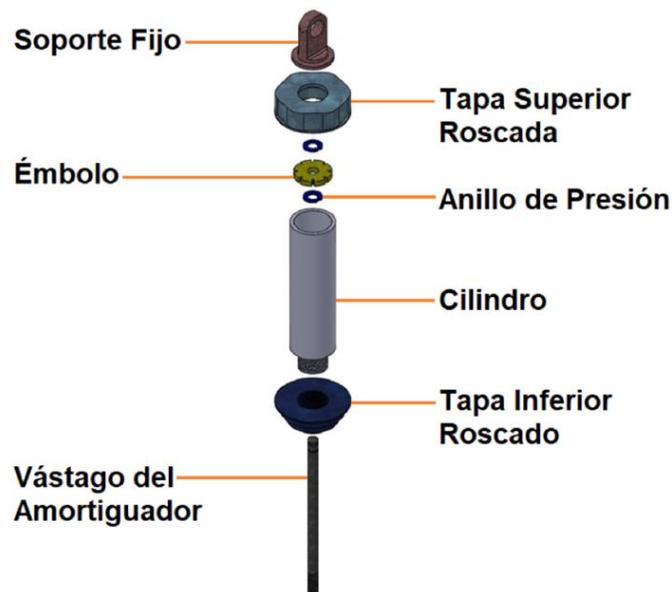
sistema de inducción magnética por medio de alambre conductor genera un incremento del calor, por motivo de la corriente durante un lapso de tiempo, Figura 30.



**Figura 30.** Esfuerzo de cizallamiento a diferentes campos magnéticos

Fuente: (Escoraza & Medina , 2017)

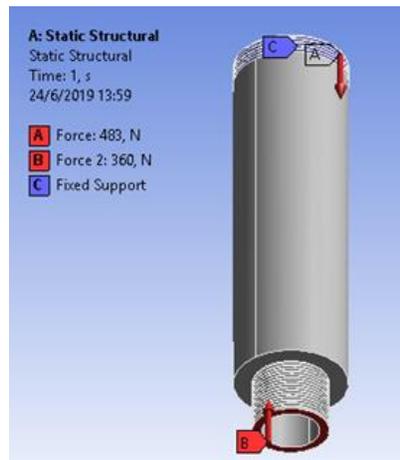
Luego de realizar los respectivos cálculos para el diseño del amortiguador se lleva a cabo el modelado en un software CAD como se observa en la Figura 31.



**Figura 31.** Partes del amortiguador

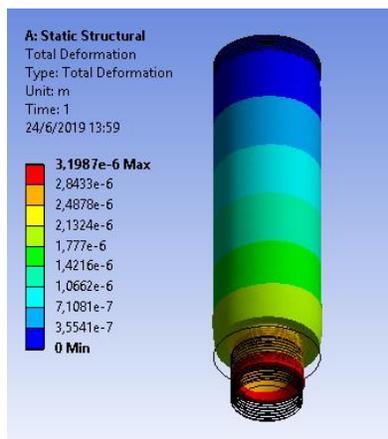
- **Análisis estructural del cilindro del amortiguador**

El material del cilindro del amortiguador se establece de aluminio 6061T6, se aplica una fuerza de avance 483N y la fuerza retroceso 360N generada por el pistón neumático con una longitud de 46mm y espesor de pared de 2 mm, Figura 32.



**Figura 32.** Análisis Estructural del cilindro de amortiguación

La máxima deformación del cilindro se presenta en la rosca inferior cuando se aplica la fuerza de amortiguación que tiene un valor de  $0.0000031987$  [m], el cual es aceptable y considerado como despreciable, Figura 33.



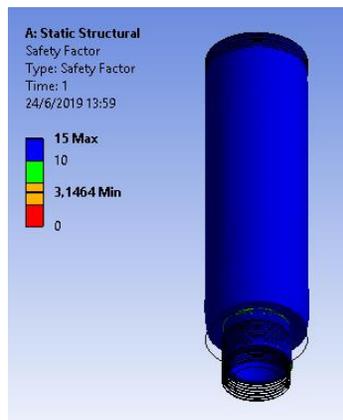
**Figura 33.** Deformación del amortiguador MR

El esfuerzo resultante de tensiones de Von Mises en toda la estructura del cilindro es relativamente bajo con un valor de 79.456 [MPa], en comparación al límite elástico del aluminio 6061-T6, que tiene un valor igual a 315 [MPa], por lo cual se concluye que el diseño es seguro, Figura 34.



**Figura 34.** Esfuerzos de Von-Mises del amortiguador MR

Para considerar una aceptación del diseño notamos que el factor de seguridad crítico del diseño es de  $N = 3,1464$  siendo mayor que el factor de seguridad admisible de  $N = 2$ , considerándose el diseño como seguro, Figura 35.



**Figura 35.** Factor de seguridad del cilindro de amortiguación

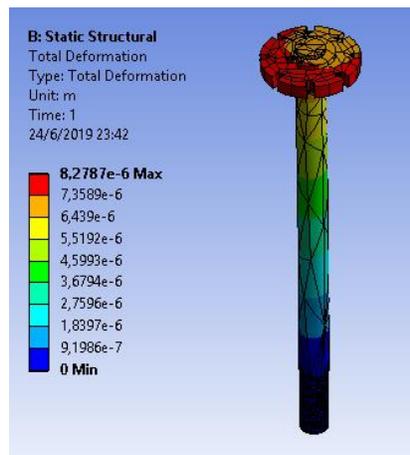
- **Análisis estructural del vástago del amortiguador**

Para el caso de estudio se propuso analizar el pandeo que produce la fuerza total máxima  $F_{RT}$ , establecida para el vástago del amortiguador es de aluminio 6061T6 igual a 240 N, ubicada en la superficie de contacto con el pistón, Figura 36.



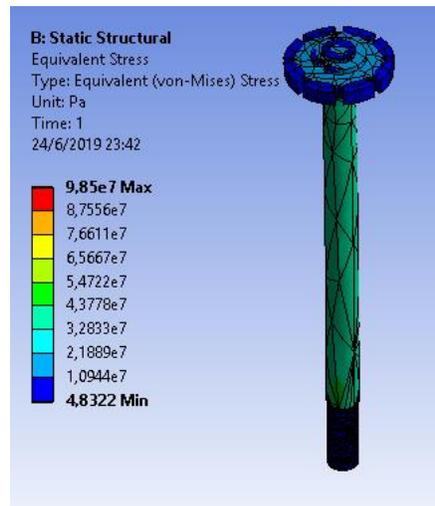
**Figura 36.** Análisis Estructural del cilindro de amortiguación

La máxima deformación del cilindro se presenta en la parte superior del vástago que tiene un valor de 0.0000082787 [m], el cual es aceptable y considerado como despreciable, Figura 37.



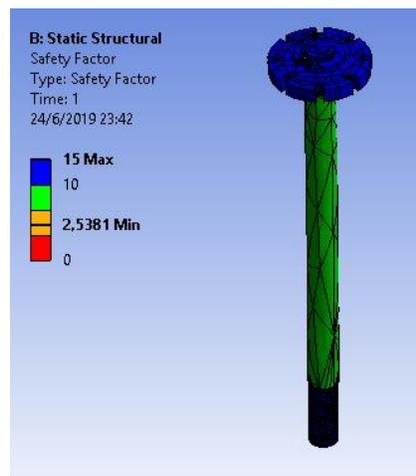
**Figura 37.** Deformación en el vástago de la amortiguación MR

El esfuerzo resultante de tensiones de Von Mises analizado en el vástago es relativamente bajo con un valor de 98.5 [MPa], en comparación al límite elástico del aluminio 6061-T6, que tiene un valor igual a 315 [MPa], por lo cual se concluye que el diseño es seguro, Figura 38.



**Figura 38.** Esfuerzos de Von-Mises del vástago del amortiguador MR

Para considerar una aceptación del diseño notamos que el factor de seguridad crítico del diseño es de  $N = 2,5381$ , siendo mayor que el factor de seguridad admisible de  $N = 2$ , considerándose el diseño como seguro, Figura 39.



**Figura 39.** Factor de seguridad del cilindro de amortiguación

- **Selección del amortiguador**

Luego de obtener los principales parámetros del amortiguador MR mediante cálculos y realizar el respectivo análisis estructural, se requiere seleccionar un amortiguador que cumpla con estas características, para lo cual se toma en cuenta la geometría, carrera, diámetro, longitudes y fuerza que soporta el dispositivo.

Los valores de estos parámetros son carrera mínima 0,025 [m], diámetro exterior mínimo 0,01 [m], fuerza máxima 100 [N], cualidades que cumple el amortiguador de la marca hobbypark. Figura 40.



**Figura 40.** Amortiguador Hobby Park

Fuente: (Hobby Park, 2019)

Cabe mencionar que se selecciona el amortiguador por la geometría y dimensiones acorde a la estructura interna del gripper, para lo cual se realiza modificaciones del mismo para ser implementado en el mecanismo de regulación de carrera, Las principales características del amortiguador se presentan en la Tabla 14.

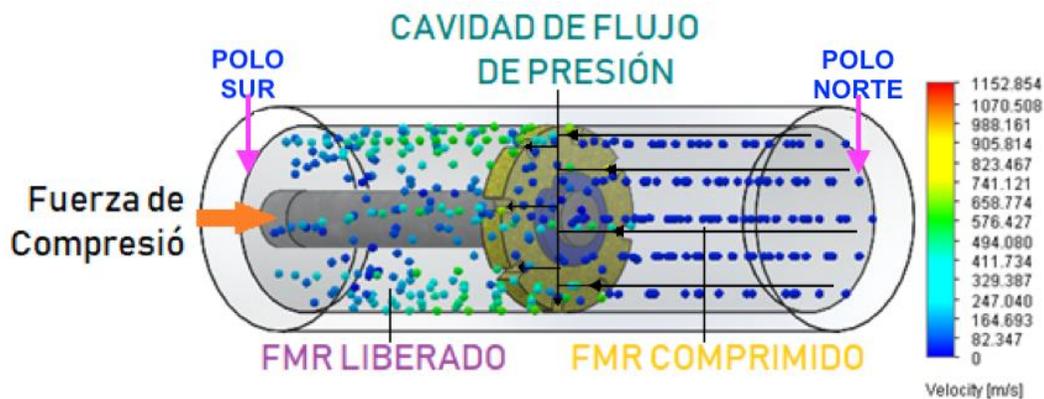
**Tabla 14**  
Características amortiguador Hobby Park

Parámetro	Dato
Fuerza [N]	100
Carrera mínima [m]	0,025
Diámetro del amortiguador [m]	0,012
Diámetro del pistón [m]	0,01
Longitud mínima [m]	0,07
Longitud total extendida [m]	0,1
Diámetro de vástago $D_{va}$ [m]	0,004
Longitud del vástago $L_v$ [m]	0,045

Fuente: (Hobby Park, 2019)

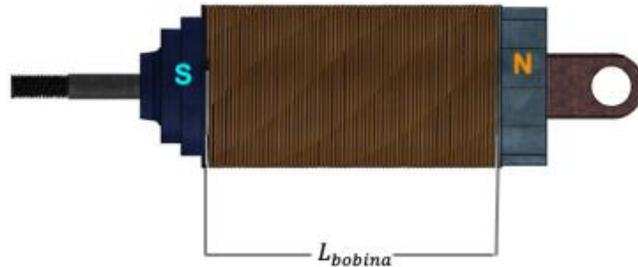
- **Diseño del electroimán**

Se plantea el diseño de un electroimán fundamentado en el principio de un solenoide, para generar un campo magnético que admita la saturación del fluido MRF-140CG en la cámara interna del amortiguador magnetorreológico, las líneas de flujo magnético se dirigen del polo norte hacia el polo sur dentro del campo magnético como se visualiza en la Figura 41.



**Figura 41.** Funcionamiento electroimán

Se crea una bobina en base a la longitud del electroimán y la geometría del amortiguador MR, en los parámetros se tiene que la longitud de la bobina es  $L_{bobina} = 0,036 \text{ m}$ , Figura 42.



**Figura 42.** Longitud del bobinado

Es prioritario utilizar una fuente de alimentación para la demanda de voltaje y corriente del sistema en general, capaz de suministrar  $12 \text{ V}$  de voltaje y  $0,8 \text{ A}$  de corriente al electroimán diseñado.

Se establece el calibre del alambre conductor con los valores normalizados AWG (ver Anexo B1), el calibre seleccionado es AWG 22 de resistividad  $5,6 \Omega/100 \text{ m}$ , capacidad máxima de corriente de  $0,92 \text{ A}$ , con un diámetro del alambre conductor de  $6,44 \times 10^{-4} \text{ m}$ . Se calcula el número de espiras del bobinado con la siguiente expresión:

$$N = \frac{L_s}{D_{al}}$$

**Ecuación 23**

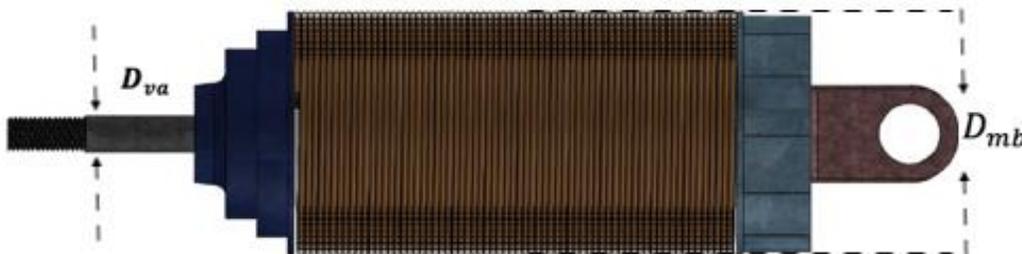
Donde:

- $L_s$ : Longitud de la bobina
- $D_{al}$ : Diámetro del alambre conductor

$$N = \frac{0,036m}{6,44 \times 10^{-4}m}$$

$$N = 56 \text{ espiras}$$

Se aumenta el número de capas del bobinado  $N_c$ , para incrementar el campo magnético generado, se precisa de un diámetro máximo del bobinado de  $D_{mb} = 0,022m$  debido a las limitaciones en la estructura interna del gripper ya que se ocuparán dos amortiguadores para equilibrar la fuerza que se aplica en el mecanismo de gancho de cuña, Figura 43.



**Figura 43.** Parámetros de diseño del electroimán

Para el cálculo del número de capas de la bobina se utiliza la Ecuación 24:

$$N_c = \frac{D_{mb} - D_{vástago}}{2(D_{cable})} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$N_c = \frac{0,022m - 0,005}{2(6,44 \times 10^{-4}m)} = 5,43 \text{ capas} \approx 6 \text{ capas}$$

Los resultados obtenidos permiten establecer el campo magnético teórico ( $B$ ) generado en el interior del amortiguador, para el cálculo del campo magnético como tal se reemplazan los valores calculados en la Ecuación 25:

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r N i}{L_s}$$

**Ecuación 25**

Donde:

- $B$ : Campo magnético generado por un solenoide
- $\mu_0$ : Permeabilidad magnética de vacío
- $\mu_r$ : Permeabilidad magnética relativa del núcleo
- $N$ : Número de espiras del bobinado
- $i$ : corriente que transita por el conductor

Al incrementar el número de capas del bobinado y estar en contacto capa con capa la intensidad de campo magnético se acrecienta como se establece en la siguiente expresión:

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r N i}{L_s} \times N_c$$

**Ecuación 26**

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{NA}^{-2})(100)(56)(0,8A)}{0,036} \times 6 = 0,938 \text{Teslas}$$

Para determinar el campo magnético en la periferia del solenoide se emplea la siguiente expresión.

$$B_x = \frac{\mu_0 \mu_r N i}{2\pi z} \times N_c$$

**Ecuación 27**

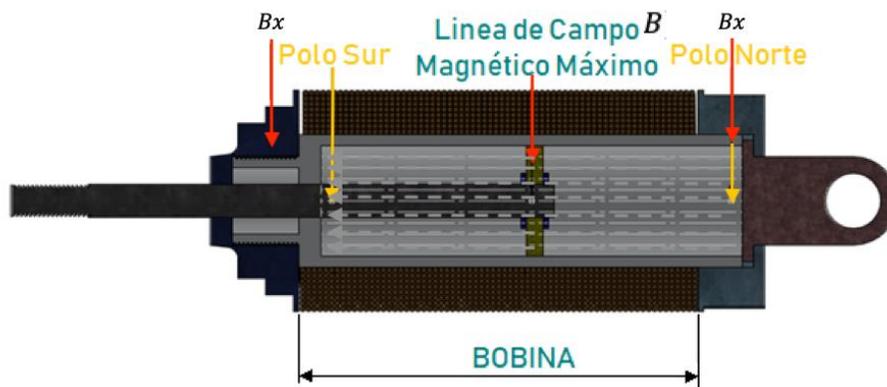
Donde:

- $B_x$ : Campo magnético en la periferia del solenoide
- $z$ : Distancia externa al solenoide

$$B_x = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{NA}^{-2})(100)(0,8A)}{2\pi \left(\frac{D_{tb}}{2} - R_{pistón}\right)} \times 13$$

$$B_x = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{NA}^{-2})(100)(0,8A)}{2\pi \left(\frac{0,022}{2} \text{m} - 0,006\text{m}\right)} \times 13 = 0,0192 \text{Teslas}$$

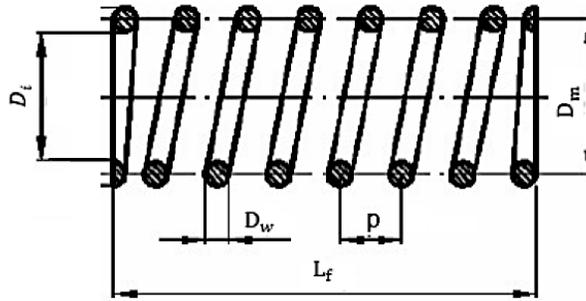
De acuerdo con la Figura 44, se observa que por cada émbolo del pistón se obtiene dos campos ( $B_x$ ) y un campo ( $B$ ) ya que el polo magnético total fue dividido en un principio.



**Figura 44.** Electroimán

- **Diseño del resorte**

Se requiere diseñar un resorte que permita el retorno del mecanismo del gancho de cuña sujeto al vástago del amortiguador, es decir, una fuerza aproximada a 90N para generar un desplazamiento máximo por parte del gancho de cuña de 0,025m. Bajo estas condiciones se precisa establecer las dimensiones como longitud máxima 0,05 m y un diámetro interno del resorte de 0,01 m según corresponda en la Figura 45.



**Figura 45.** Parámetros de diseño del resorte

Según (Mott, 2006) menciona que los parámetros de diseño del resorte se calculan a partir de la Figura 45, en base a las siguientes ecuaciones:

$$C = \frac{D}{D_w} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$D_m = CD_w \quad \text{Ecuación 29}$$

$$D_i = D_m - D_w \quad \text{Ecuación 30}$$

$$D_e = D_m + D_w \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:

- $C$ : índice del resorte (entre 5 y 12)
- $D_i$ : Diámetro interior
- $D_e$ : Diámetro exterior
- $D_m$ : Diámetro medio
- $D_w$ : Diámetro del alambre

Se procede a reemplazar la (Ecuación 29) en la (Ecuación 30) y se despeja el diámetro del alambre  $D_w$  se obtiene:

$$D_i = CD_w - D_w$$

$$D_w = \frac{D_i}{C - 1} = \frac{0,01m}{8 - 1} = 1,43 \times 10^{-3}m$$

Se establece el calibre del alambre para resorte según la tabla de calibres y diámetros de alambre para resorte (ver Anexo B4) corresponde el calibre 17, con diámetro 0,0014 m. En seguida se sustituye este dato en la (Ecuación 29), la constante del resorte  $k_r$  (Ecuación 31) y el número de espiras del reporte  $n_a$  (Ecuación 33) respectivamente.

$$D_m = CD_w = 8(0,0014m) = 0,0112m$$

$$D_e = D_m + D_w = 0,0112m + 0,0014 = 0,0126m$$

$$k_r = \frac{F_0}{L_f - L_0}$$

**Ecuación 32**

Donde:

- $k_r$ : constante del resorte
- $F_0$ : Fuerza de operación
- $L_f$ : Longitud independiente
- $L_0$ : Longitud de operación

$$k_r = \frac{90N}{0,05m - 0,01m}$$

$$k_r = 2250 \frac{N}{m}$$

$$n_a = \frac{GD_w^4}{8D_m^3k_r} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

- $n_a$ : número de espiras
- $G$ : Módulo de elasticidad en cortante del acero ASTM A231 (ver Anexo B3)

$$n_a = \frac{(77,2 \times 10^9 Pa)(0,0014m)^4}{8(0,0112m)^3 \left(2250 \frac{N}{m}\right)}$$

$$n_a = 11,72 \text{ espiras} \approx 12 \text{ espiras}$$

Se establece que el resorte tenga extremos planos y rectificadas, implicando una longitud de compresión y libre equivalente a:

$$L_s = D_w(n_a) \quad \text{Ecuación 34}$$

$$L_s = (0,0014)(12) = 0,0168$$

$$L_f = p(n_a + 1) \quad \text{Ecuación 35}$$

Se despeja el paso  $p$  de la (Ecuación 35)

$$p = \frac{L_f}{n_a + 1}$$

Donde:

- $l_s$ : Longitud comprimida
- $p$ : paso

$$p = \frac{0,05m}{12} = 4,17 \times 10^{-3}m$$

En base al (Anexo B2) se tiene que el valor del esfuerzo de diseño para resortes en extensión y compresión en condiciones de servicio promedio con respecto al diámetro  $D_w = 0,0014m$  corresponde un  $\tau_D = 1062,5MPa$  según la curva de servicio ligero para este material.

En seguida, se calcula el factor de Wahl,  $K$  (ver Anexo B5) con la siguiente expresión para un valor de  $C = 8$ :

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$K = 1,18$$

Se calcula el esfuerzo del resorte  $\tau_0$  cuando  $F = F_0 = 80N$  con la siguiente ecuación:

$$\tau_0 = \frac{8KF_0C}{\pi D_w^2} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\tau_0 = \frac{8(1,18)(90N)8}{\pi(0,0014m)^2} = 1,103GPa$$

Se procede a calcular la Fuerza para longitud comprimida  $F_s$  del resorte mediante la siguiente ecuación según (Mott, 2006):

$$F_s = k_r(L_f - L_s) \quad \text{Ecuación 38}$$

$$F_s = 2250 \frac{N}{m} (0,05m - 0,0168) = 74,7N$$

El esfuerzo en la longitud comprimida se calcula mediante  $\tau_s$  la siguiente ecuación:

$$\tau_s = \tau_0 \frac{F_s}{F_0} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$\tau_s = 1,103MPa \left( \frac{74,7N}{90N} \right) = 915,49MPa$$

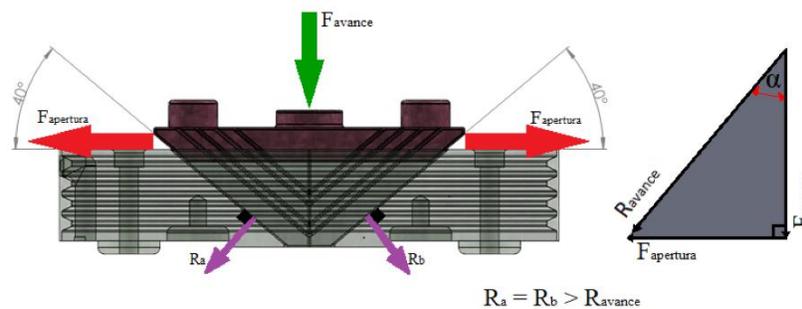
Se concluye que el diseño es satisfactorio debido a que el esfuerzo real de operación  $\tau_s$  calcula es menor que el valor del esfuerzo de diseño de 1062,5 MPa.

#### d. Cálculo de la fuerza de apertura y cierre del gripper.

Para el diseño del siguiente elemento del mecanismo de regulación de velocidad que es la cuña, es necesario analizar de principio de gancho de cuña para determinar la fuerza de cierre y apertura del gripper neumático.

Se determina la fuerza de apertura del gripper de acuerdo al mecanismo gancho de cuña el cual transforma una fuerza aplicada en dos fuerzas perpendiculares a la arista en contacto principio que sirve para desplazar las garras de forma lineal, Figura 46.

#### • Cálculo de la fuerza de apertura



**Figura 46.** Comportamiento de gancho de cuña (Apertura)

$$R_a = R_b > F_{avance}$$

**Ecuación 40**

$$\cos(\alpha) = \frac{F_{avance}}{R_a, R_b}$$

**Ecuación 41**

$$\tan(\alpha) = \frac{F_{apertura}}{F_{avance}}$$

**Ecuación 42**

Donde:

- $F_{avance}$ : Fuerza de avance del pistón
- $F_{apertura}$ : Fuerza de apertura en las garras del gripper
- $R_a = R_b$  Reacción fuerza de contacto en la apertura

Despejo  $F_{apertura}$  de la (Ecuación 42).

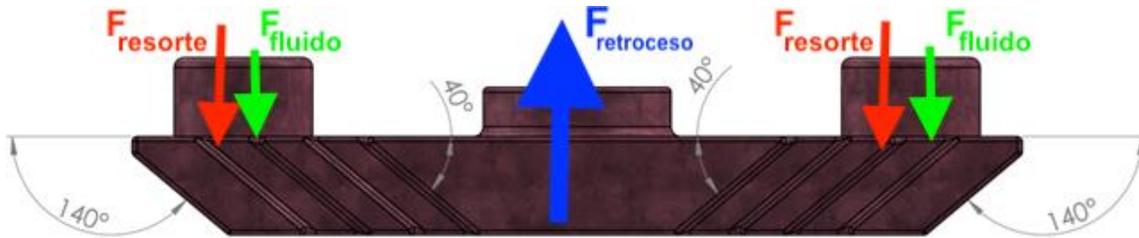
$$F_{apertura} = F_{avance}[\tan(\alpha)]$$

$$F_{apertura} = 483N[\tan(40^\circ)] = 405,28[N]$$

La fuerza de apertura del gripper es  $R_b = 405,28[N]$ , se estima que la fuerza de rozamiento en contacto del gancho de cuña con el Jack y la carcasa es un valor muy bajo es decir tiende a 0 razón por la cual no hay pérdidas por fricción.

- **Cálculo de la fuerza de cierre del gripper**

Se determina la fuerza de cierre del gripper en base a la suma vectorial entre la fuerza de retroceso del pistón, fuerza de resistencia del fluido y del resorte; cabe mencionar que se utilizan dos resortes y dos amortiguadores unidos al mecanismo de gancho de cuña para establecer un equilibrio en las fuerzas, Figura 47.



**Figura 47.** Fuerza en gancho de cuña

$$\sum F_c = F_{retroceso} - F_{resistencia} = F_{rreal} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$F_{resistencia} = 2(F_{resorte} + F_{fluido}) \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

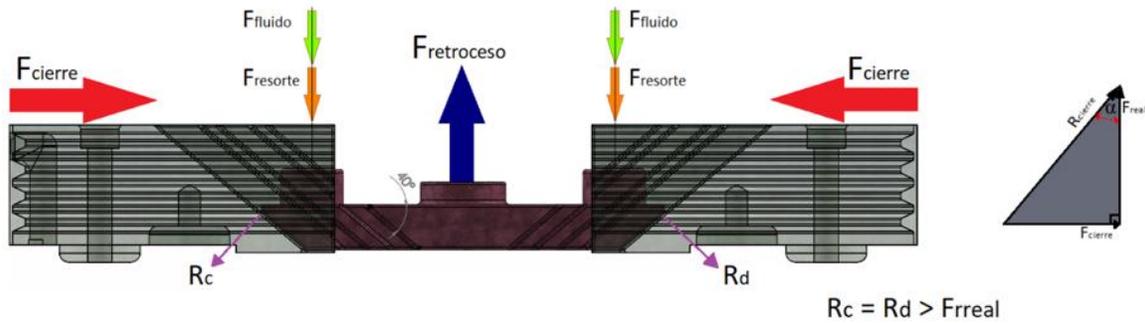
- $\sum F_c$ : Sumatoria de fuerzas en la cuña
- $F_{rreal}$ : Fuerza de retroceso real
- $F_{retroceso}$ : Fuerza de retroceso del pistón
- $F_{resistencia}$ : Fuerza de resistencia
- $F_{fluido}$ : Fuerza de resistencia del fluido
- $F_{resorte}$ : Fuerza de resistencia del resorte

$$F_{rreal} = F_{retroceso} - 2(F_{fluido} + F_{resorte})$$

$$F_{rreal} = 360N - 2(30N + 90N)$$

$$F_{rreal} = 120N$$

El valor obtenido de la fuerza de cierre  $F_{rreal}$  es el que produce el retorno del gripper en el mecanismo de regulación de velocidad por medio del cilindro neumático, Figura 48, se precisa calcular el valor de cierre en las garras del gripper con la siguiente expresión:



**Figura 48.** Comportamiento de gancho de cuña (Cierre)

$$R_c = R_d > F_{rreal} \quad \text{Ecuación 45}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{F_{rreal}}{R_c, R_d} \quad \text{Ecuación 46}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{F_{cierre}}{F_{rreal}} \quad \text{Ecuación 47}$$

Donde:

- $F_{cierre}$ : Fuerza de cierre del gripper

Despejo  $F_{cierre}$  de la (Ecuación 47).

$$F_{cierre} = F_{rreal}[\tan(\alpha)]$$

$$F_{cierre} = 120N[\tan(40^\circ)] = 100[N]$$

La cuña es un amplificador de fuerzas (tiene ganancia mecánica). Su forma de actuar es muy simple, ya que transforma una fuerza aplicada en dirección al ángulo agudo (F)

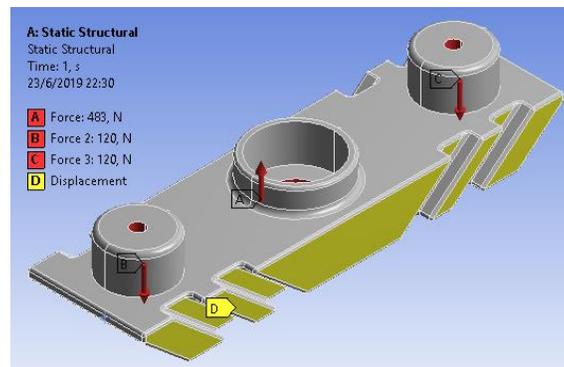
en dos fuerzas que son perpendiculares a los planos que forman la arista afilada ( $F_1$  y  $F_2$ ); la suma vectorial de estas fuerzas es igual a la fuerza aplicada. (Landín, 2013)

La cuña transforma una fuerza vertical en dos horizontales antagonistas. El ángulo de la cuña determina la proporción entre las fuerzas aplicada y la resultante, de un modo parecido al plano inclinado. (Landín, 2013)

#### e. Diseño de la cuña

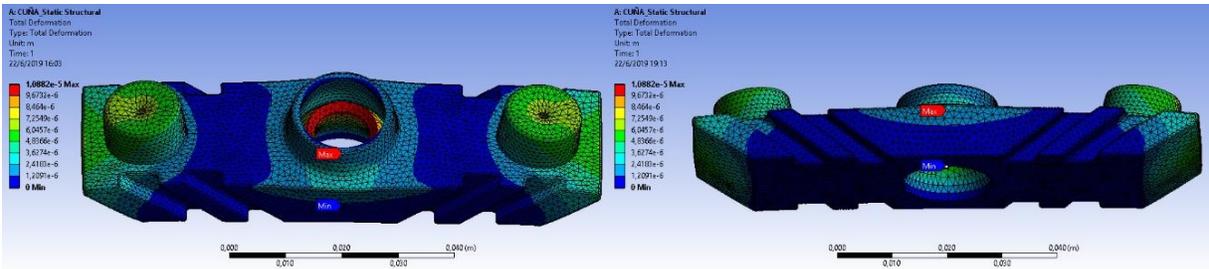
- **Análisis Estructural Cuña**

Este diseño tiene gran importancia en la transmisión del movimiento del pistón neumático, se aplica una fuerza de avance de 483 N en el centro de gravedad, y fuerzas de amortiguación de 120N ubicadas a 0,03375 m. Además, este elemento se encuentra sometido a desplazamiento en el interior de los Jacks, Figura 49.



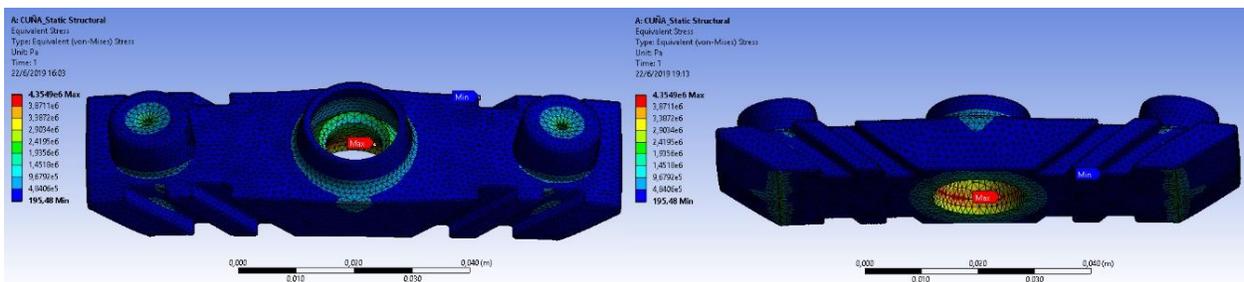
**Figura 49.** Análisis estructural de la cuña

La máxima deformación se presenta en la unión que existe con el eje del pistón y el tornillo M8 avellanado que sujeta la parte inferior de la cuña tiene un valor de 0.000010882 [m], el cual es aceptable y considerado como despreciable, Figura 50.



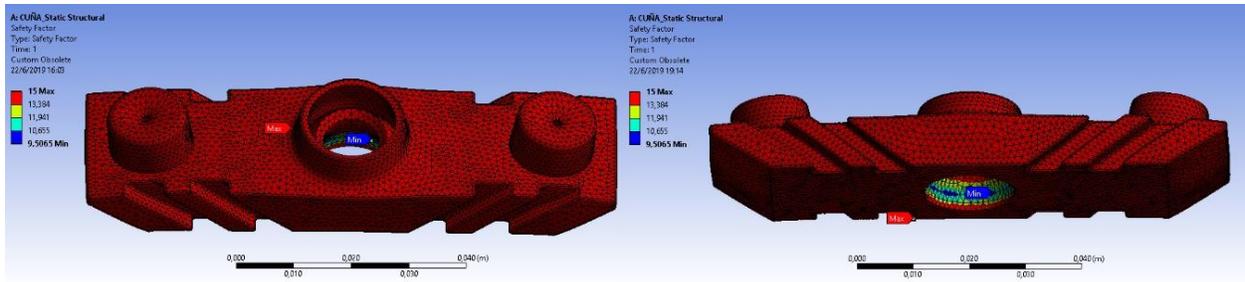
**Figura 50.** Deformación provocada por las cargas aplicadas en la cuña

El esfuerzo resultante de tensiones de Von Mises en toda la estructura de la cuña es relativamente bajo con un valor de 4.3549 [MPa], en comparación al límite elástico del material de impresión 3D (ABS) sometido a ensayos, tiene un promedio de 30,505 [MPa], por lo cual se concluye que el diseño es seguro, Figura 51.



**Figura 51.** Esfuerzos de Von-Mises en la cuña

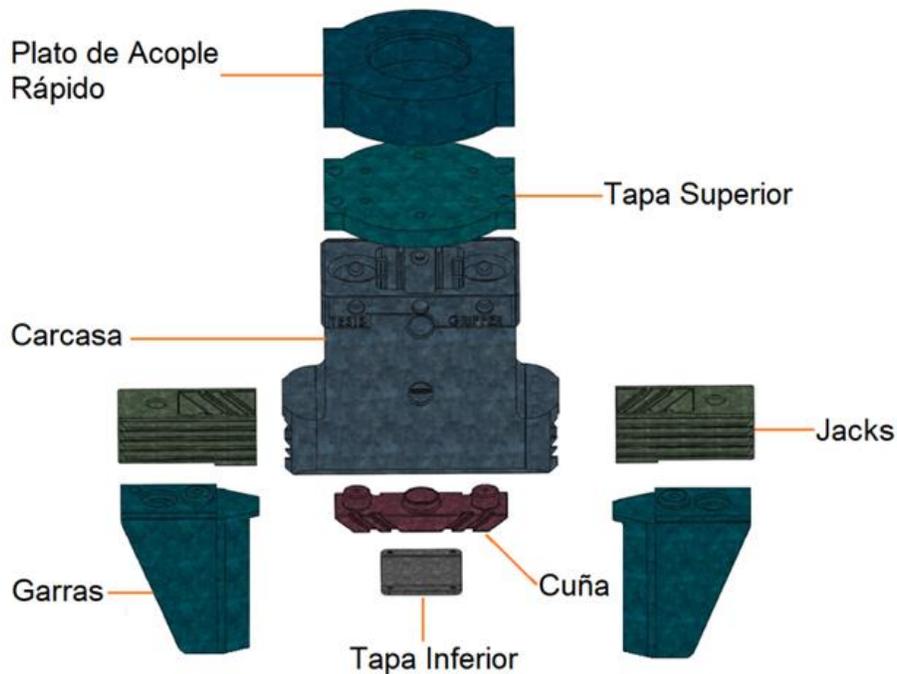
Para considerar una aceptación del diseño notamos que el factor de seguridad crítico del diseño es de  $N = 9.5065$ , siendo mayor que el factor de seguridad admisible de  $N = 2$ , considerándose el diseño como seguro, Figura 52.



**Figura 52.** Factor de seguridad de la Cuña

### 2.3.2 Diseño de la estructura del modelo de gripper

Se establece la estructura general del gripper según la Figura 53, a continuación, se procede con el diseño individual de cada pieza que conforma el modelo del gripper.

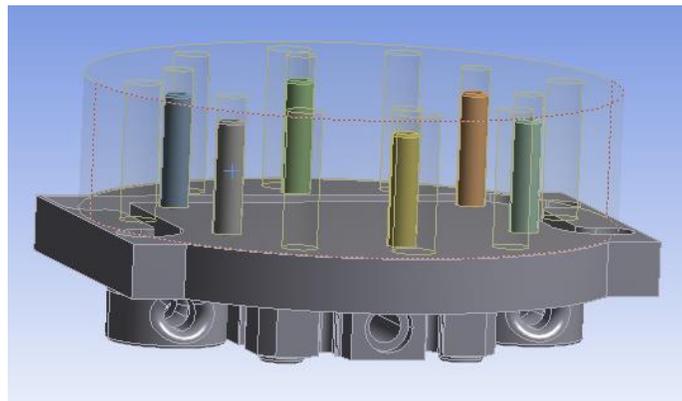


**Figura 53.** Estructura general del gripper neumático

#### a. Diseño de la tapa superior

Se realiza el diseño de la tapa superior según la Figura 54, en base a los parámetros como el eje de rotación de la muñeca genera la manipulación del brazo robótico donde

su velocidad es de 630 °/s con carga nominal, este eje cuenta con un sensor de colisión, lugar donde se une la tapa superior de la herramienta mediante 6 pernos M5x0.8 según la tabla (Ver anexo C) de la nomenclatura de roscas métricas. Para la correcta selección de los pernos que sujetan la tapa del gripper calculamos su resistencia ante la mayor fuerza de trabajo en el eje X e Y de 4000N que genera el brazo robótico a su máxima velocidad, con la Ecuación 48, Ecuación 49, Ecuación 50 por puestas por (Mott, 2006).



**Figura 54.** Diseño de la tapa superior

La fuerza que soporta cada perno es la fuerza total del movimiento de la muñeca dividida para el número de pernos que sujetan la tapa del gripper, con la siguiente expresión:

$$F_{perno} = \frac{Fuerza_{nominal}}{Número\ de\ pernos} \quad \text{Ecuación 48}$$

$$F_{perno} = \frac{4000\ N}{8}$$

$$F_{perno} = 500\ N$$

Los pernos están sometidos a esfuerzo cortante directo ( $\sigma$ ), que se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{F}{A_c}$$

**Ecuación 49**

$$\sigma = \frac{500 N}{\frac{\pi \phi_p^2}{4}}$$

$$\sigma = \frac{4 * 500 N}{\pi * (0,005m)^2}$$

$$\sigma = 25.46 [MPa]$$

Las propiedades mecánicas del perno M5x0.8 clase 4.6, son  $S_p = 240 [MPa]$ , y  $S_{ut} = 400 [MPa]$ .

La carga admisible para cada perno se calcula de acuerdo a la siguiente expresión, donde  $nd$  es el factor de diseño igual a 1.5.

$$\tau = \frac{F}{\frac{4\pi d^2}{4}}$$

**Ecuación 50**

$$\tau = \frac{F}{\frac{4\pi d^2}{4}} = \frac{0.577S_p}{nd}$$

Por lo tanto, la fuerza que soporta cada perno a cortante es:

$$F = \frac{0.577\pi d^2 S_p}{nd}$$

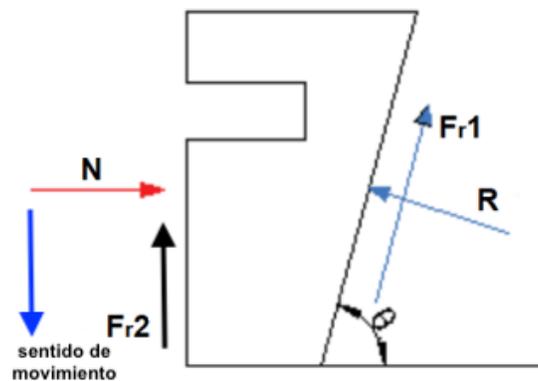
$$F = \frac{0.577\pi(5mm)^2 * 240 [Mpa]}{1.5}$$

$$F = 7.250 [kN]$$

Como se observa la fuerza que es capaz de soportar cada perno es relativamente alta respecto a los 500 [N] teóricos que necesitan soportar para ser un diseño seguro y que no falle con respecto al esfuerzo cortante.

### b. Diseño de las garras

El diseño mecánico de las garras es orientado para sujetar piezas prismáticas, la forma de las garras representa el sistema de acople paralelo con una superficie de 1,55 cm<sup>2</sup> de contacto, este modelo se emplea para tener medida homogéneas y proporcionales que contribuye a la disminución de peso del sistema, Figura 55.



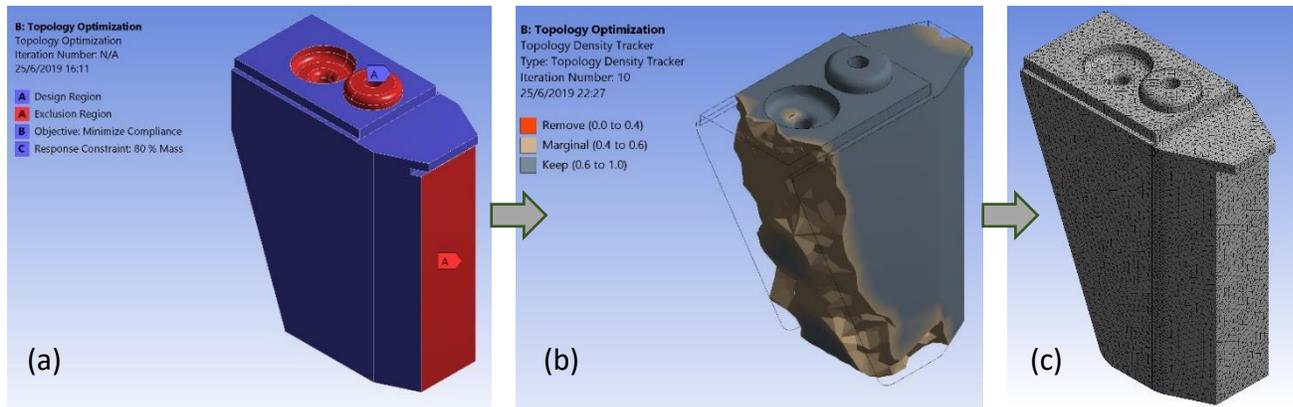
**Figura 55.** Diagrama de cuerpo libre durante la sujeción de un cuerpo prismático.

Luego de realizar el diagrama de cuerpo libre de la Figura 55, en base a sumatoria de fuerzas que se realiza para determinar el valor de la fuerza de reacción que actúa sobre el cuerpo donde:

- R: es la reacción generada entre las superficies del cuerpo y las garras.
- N: es la Normal o reacción entre el cuerpo prismático y la garra.
- Fr1: es la fuerza de rozamiento generada por la reacción R.
- Fr2: es la fuerza de fricción generada por la normal

- $\theta$ : es el ángulo de inclinación

La Optimización de Topología Multifase (OPTM), aplicada en el diseño de las garras es una técnica de simulación basada en el método de elementos finitos, la cual determina la distribución óptima de la forma del material bajo cargas y superficies de contacto, pudiendo reducir el peso, pero manteniendo las funcionalidades mecánicas de las garras. En la Figura 56 se observa el proceso de optimización de material que mejora el diseño debido a que se ocupa menos material por esta razón el peso disminuye.

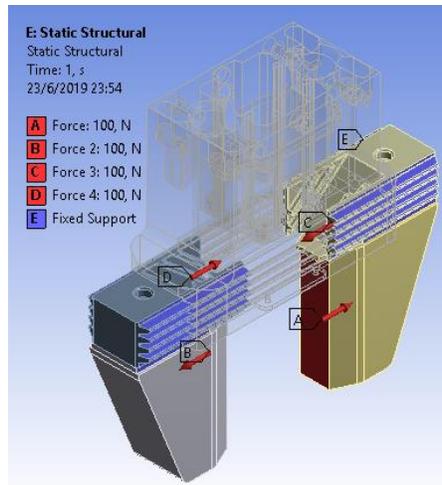


**Figura 56.** (a) Diseño inicial de garras. (b) Optimización. (c) Diseño final de las garras.

- **Análisis estructural de las garras**

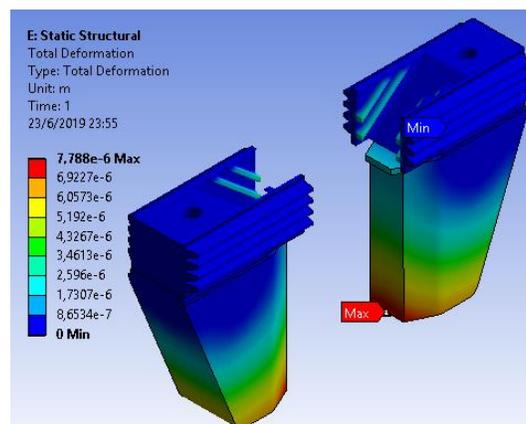
Para el análisis estático de las garras se analiza la fuerza de cierre del gripper debido a que es la fuerza que se emplea para sujetar un objeto y está en contacto. El análisis estático estructural de las garras se realiza mediante Ingeniería Asistida por Computador (CAE) y Análisis de Elementos Finitos (FEA). Para este análisis se considera la fuerza de cierre de 100 N, que genera el pistón neumático transmitido a la cuña, a los jacks y posteriormente a las garras. Considerando la ley de acción y reacción se aplica una

fuerza de igual magnitud y dirección en sentido contrario, ubicado en las caras paralelas de contacto a la sujeción de objetos, Figura 57.



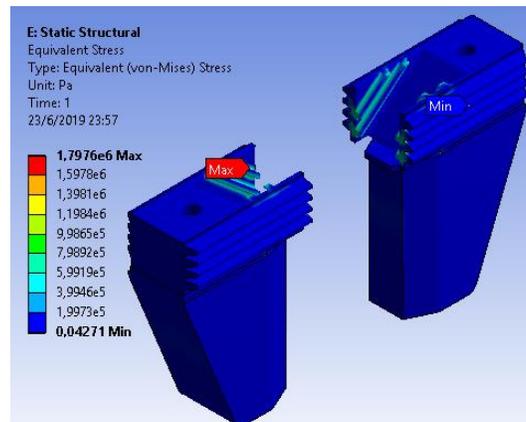
**Figura 57.** Análisis Estructural de las Garras

La máxima deformación se presenta en la parte inferior de las garras, a 0,085 m de la unión con los jacks, mientras exista contacto con algún objeto que se opone al movimiento, cuyo valor es de 0.000007788 [m], el cual es aceptable y considerado como despreciable, Figura 58.



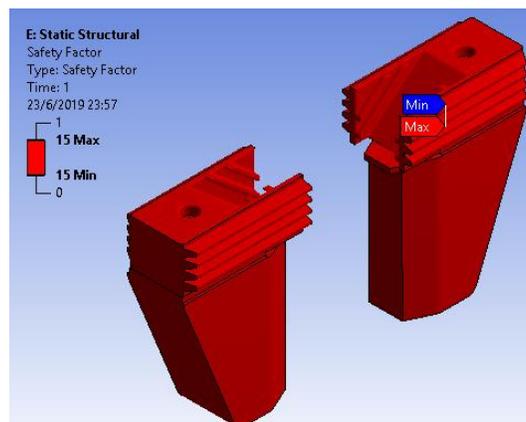
**Figura 58.** Deformación provocada por las cargas aplicadas en las garras

El esfuerzo resultante de tensiones de Von Mises en toda la estructura de las garras es relativamente bajo con un valor de 1.7976 [MPa], en comparación al límite elástico ABS sometido a ensayos tiene un promedio de 30,505 [MPa], por lo cual se concluye que el diseño es seguro, Figura 59.



**Figura 59.** Esfuerzos de Von-Mises en las Garras

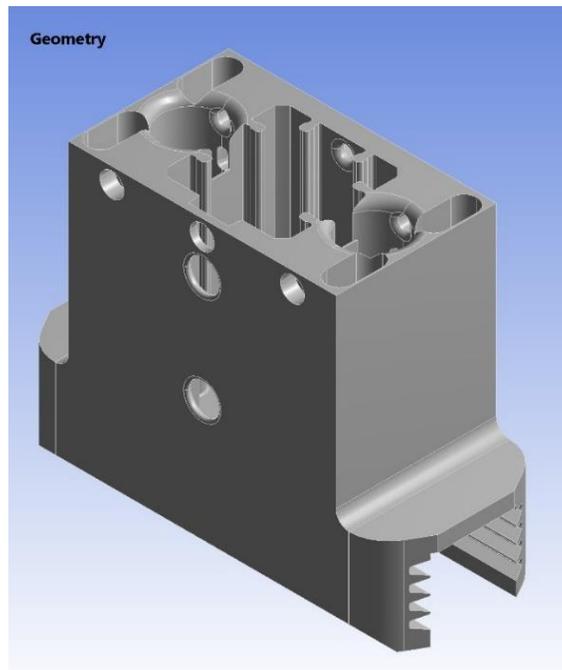
Para considerar una aceptación del diseño notamos que el factor de seguridad crítico del diseño es de  $N = 15$ , siendo mayor que el factor de seguridad admisible de  $N = 2$ , considerándose el diseño como seguro, Figura 60.



**Figura 60.** Factor de seguridad del gancho de cuña

### c. Diseño de la carcasa

El diseño de la carcasa es orientado a la protección de componentes mecánicos internos y para la adaptación de elementos electrónicos. Su forma es rectangular con dimensiones de 0.11 m de alto 0.145 m de ancho 0.06 m de espesor, Figura 61.



**Figura 61.** Diseño de la carcasa

## 2.4 Selección de materiales.

Dentro de las tecnologías FDM (Fused Deposition Modeling) en la sección 1.3.5 se menciona los dos materiales más utilizados para realizar este proceso.

### 2.4.1 Selección de material termoplástico para impresión 3D

#### a. Alternativas para la selección de material para impresión 3D

En la Tabla 15 se presenta las dos alternativas para la selección del material termoplástico para impresión 3D con sus respectivas características para realizar la selección de manera adecuada.

**Tabla 15**  
*Alternativas de selección de material para impresión 3D*

Alternativa 1. PLA	Alternativa 2. ABS
	
<b>Características</b>	<b>Características</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureza: Alta,</li> <li>• Flexibilidad: Baja</li> <li>• Durabilidad: Media</li> <li>• Dificultad de uso: Baja</li> <li>• T de impresión 180 °C – 230 °C</li> <li>• T de la cama caliente: 20 °C – 60 °C (aunque no necesaria)</li> <li>• Contracción/deformación: Mínima</li> <li>• Soluble: No</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureza: Alta, Flexibilidad: media, Durabilidad: Alta</li> <li>• Dificultad de uso: Media</li> <li>• Temperatura de impresión 210 °C – 250 °C</li> <li>• Temperatura de la cama de impresión 80 °C – 110 °C</li> <li>• Contracción/deformación: Considerable</li> <li>• Soluble: En ésteres, cetonas y acetona</li> </ul>

### **b. Criterios de selección de material termoplástico de impresión 3D**

Se considera los siguientes parámetros para la selección del material de impresión de acuerdo a características mecánicas, uso a nivel industrial y demás parámetros que se presentan en seguida.

- Dureza
- Durabilidad
- Fragilidad
- Resistencia al desgaste

- Resistencia al impacto
- Resistencia térmica
- Resistencia al agua
- Flexibilidad
- Soluble
- Costo

### c. Selección de mejor alternativa del material termoplástico para impresión 3D

En la Tabla 16 se presenta la validación de las dos alternativas, según la escala de prioridades que se otorga a cada criterio de selección.

**Tabla 16**

*Validación de alternativas para la selección del material de impresión 3D*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2
<b>Dureza</b>	5	5
<b>Durabilidad</b>	3	4
<b>Fragilidad</b>	4	5
<b>Resistencia al desgaste</b>	2	3
<b>Resistencia al impacto</b>	4	3
<b>Resistencia térmica</b>	2	2
<b>Resistencia al agua</b>	2	2
<b>Flexibilidad</b>	4	5
<b>Soluble</b>	5	5
<b>Costo</b>	5	5
<b>Total</b>	36	39

Según el dato obtenido de la valoración de las cuatro alternativas que se propone en la Tabla 16, la opción que más se adapta a los parámetros establecidos es la alternativa 2 por lo cual se utiliza el ABS como material termoplástico para impresión 3D por su

flexibilidad, resistencia al desgaste, dureza y aplicación en a nivel industrial, como características más notables y superiores a las de la otra alternativa mencionada.

Luego de seleccionar el material para la impresión 3D se procede a realizar pruebas según el método de impresión 3D. Se realizó probetas según la norma ASTM- D695-15 con las diferentes técnicas de deposición por material fundido. Según los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, la técnica más indicada en base a sus óptimas propiedades mecánicas es la impresión a 0° y 90° según la orientación de las fibras. Los resultados totales de las pruebas se observan en el Anexo D.

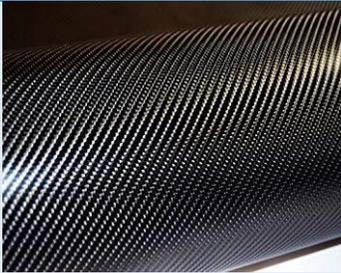
## 2.4.2 Selección del material compuesto para el recubrimiento.

Para la selección del material se realizó una búsqueda de los principales materiales compuestos comerciales dentro del medio local, las características mecánicas primordiales de cada uno de ellos se presentan dentro de las siguientes alternativas, como se presenta en la Tabla 17 con sus respectivas características.

### a. Alternativas de selección del material compuesto

**Tabla 17**

*Alternativas de selección del material compuesto*

Alternativa 1. Material de refuerzo fibra de carbono	Alternativa 2. Material de refuerzo fibra de vidrio
	
<p align="center"><b>Características</b></p>	<p align="center"><b>Características</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilidad: Alta</li> <li>• Resistencia a la tracción: Alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureza: Alta</li> <li>• Flexibilidad: Baja</li> </ul>

**CONTINÚA** 

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso: Bajo</li> <li>• Tolerancia a altas temperatura</li> <li>• Laminado estructural: Multidireccional</li> <li>• Matriz polimérica: Epoxi</li> <li>• Campo de aplicación: Industria aeronáutica, automotriz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso: Bajo</li> <li>• Resistencia a la tracción: Alta</li> <li>• Matriz polimérica: Epoxi</li> <li>• Campo de aplicación: Industria naval, automotriz</li> </ul> |
|--|---|

**b. Criterios de selección del material compuesto para el recubrimiento de la estructura.**

Se considera analizar las siguientes características según ciertas propiedades mecánicas, el uso del material además de otros parámetros mencionados a continuación.

- Resistencia a la tracción.
- Flexibilidad.
- Fragilidad
- Dureza
- Tipo de matriz
- Laminado estructural
- Resistencia a agua
- Costo

**c. Selección de la mejor alternativa del material compuesto para el recubrimiento.**

En la Tabla 18 se presenta la validación de las dos alternativas para la selección del material compuesto, según la escala de prioridades que se otorga a cada criterio de selección.

**Tabla 18***Valoración de alternativas para selección del material compuesto*

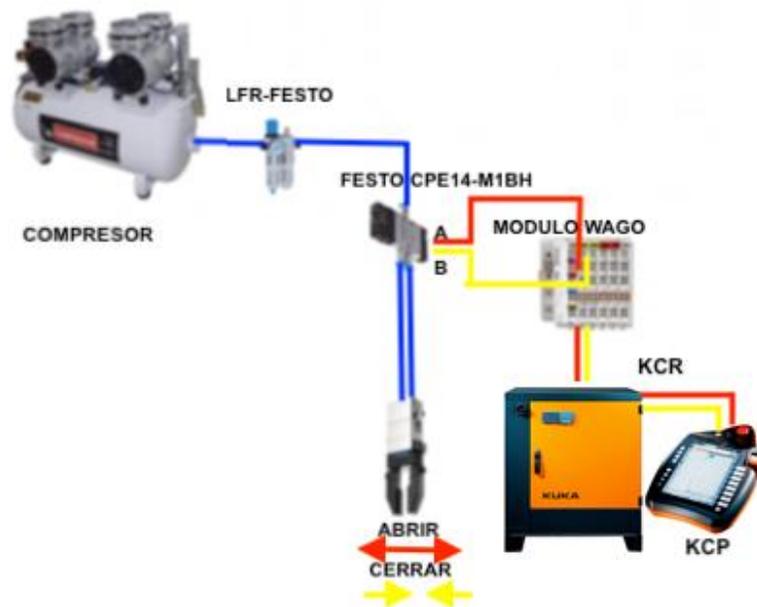
Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2
Resistencia a la tracción	5	5
Flexibilidad	4	3
Fragilidad	4	2
Dureza	5	5
Tipo de matriz	5	5
Tipo de laminado	4	4
Resistencia al agua	4	3
Costo	4	5
<b>Total</b>	<b>35</b>	32

Según el dato obtenido de la valoración de las dos alternativas que se propone en la Tabla 18, la opción que más se adapta a los parámetros establecidos es la alternativa 1 por lo cual se utiliza la fibra de carbono como material compuesto para el recubrimiento de la estructura por su flexibilidad, resistencia al agua y fragilidad como características más sobresalientes que la otra alternativa mencionada.

## 2.5 Control electro-neumático del gripper

Es necesario mencionar que el gripper neumático será incorporado en el robot KUKA KR-16, este brazo robótico se encuentra ubicado en el Laboratorio de Robótica Industrial de la universidad. Posee un compresor que alimenta de aire comprimido a las celdas de manufactura robotizadas, una unidad de filtro y regulación (LFR-FESTO) para quitar impurezas del aire y establecer la presión adecuada, la mayoría de dispositivos fijan su presión de trabajo en 6 [bar], el aire suministrado pasa por una válvula solenoide (FESTO CPE14-M1BH) que permite el paso del aire en dos direcciones, esta válvula es accionada mediante una señal enviada desde el Control Panel (KCP) al controlador del robot (KCR)

y luego al módulo WAGO (módulo de entradas y salidas digitales) para activar las dos señales de la válvula A y B para abrir gripper y cerrar el gripper, señal se emplea para activar el campo magnético por medio del controlador del gripper para atenuar el retorno de las garras del gripper por medio amortiguador MR y cilindro neumático . Este proceso se visualiza de manera general en la Figura 62, desde el KCP se envía una señal al presionar el botón de activación para realizar el accionamiento del gripper. El diagrama que complementa el control electro-neumático se presenta en el ANEXO H.



**Figura 62.** Accionamiento del gripper

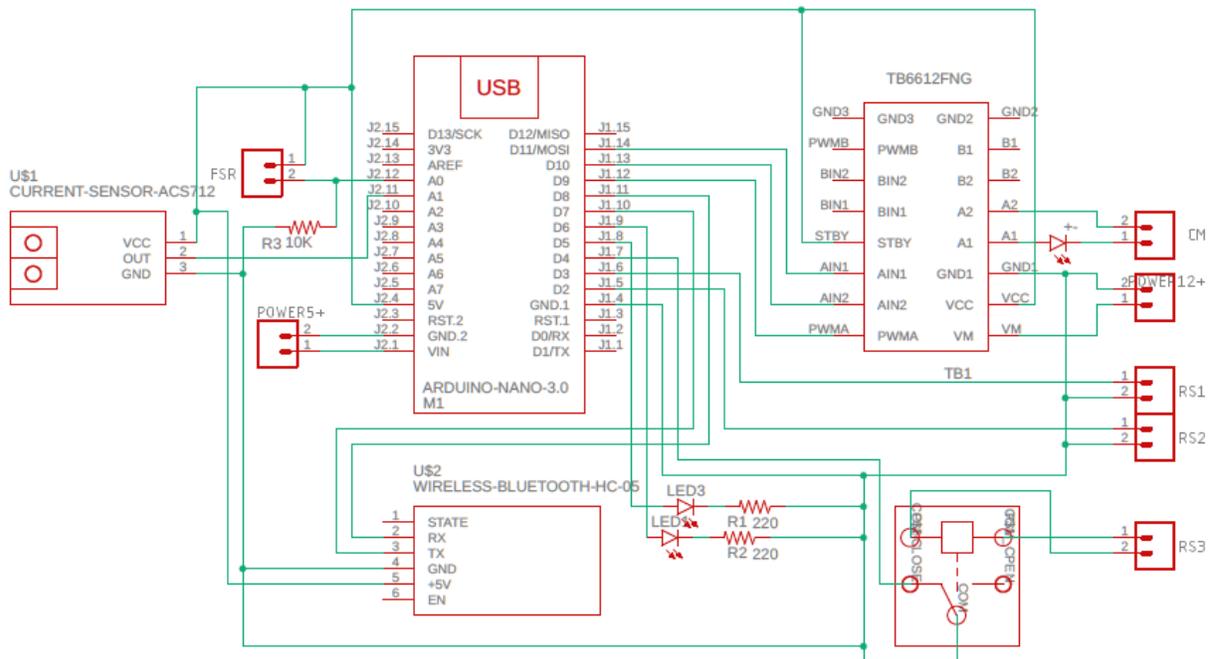
## 2.6 Control de velocidad de carrera

Para el diseño del control de velocidad de carrera, se pretende disminuir la velocidad en el cierre del gripper, al realizar una oposición al movimiento con la aplicación de los fluidos magnetoreológicos, para lo cual se establecen los diferentes dispositivos tales como sensores, tarjetas controladoras, módulos de control, para generar el campo magnético al activar la señal proveniente del módulo WAGO, para alimentar al

electroimán del amortiguador MR en función de la cantidad de corriente que se suministra al sistema. Además en la placa de control se adicionan diodos de silicio que permitan rectificar cada señal del circuito, se diseñan las líneas de pista para un voltaje de alimentación de 12 [V] y una corriente de 1 [A].

### 2.6.1 Diseño del circuito de control de velocidad con amortiguación

En la Figura 63 se visualiza el diagrama esquemático del diseño del circuito de control de velocidad con amortiguación, donde se presenta la conexión de cada elemento. Para complementar el diseño del circuito de control de velocidad con amortiguación se emplea el esquema eléctrico de conexión con el módulo WAGO. (Ver Anexo I)



**Figura 63.** Diseño del circuito de control

## **2.7 Selección de componentes**

La estructura del gripper neumático es íntegra, consta de un control electro-neumático descrito en la sección 2.5 y de un control de velocidad de carrera proporcionado por la arquitectura interna del gripper, por medio de sus amortiguadores magnetoreológicos que en función de la intensidad de campo magnético cambian las propiedades de los fluidos internos para generar la oposición al movimiento al cerrar el gripper. Se selecciona cada componente a adquirir, teniendo en cuenta el espacio reducido de la estructura interna, el peso y dimensiones de la herramienta con la finalidad de obtener un producto estético y de funcionalidad correcta.

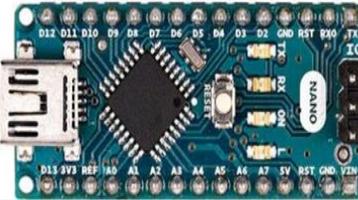
### **2.7.1 Tarjeta de control del sistema de amortiguamiento**

La tarjeta de control debe tener integrada señales digitales y analógicas para el posterior control de las mismas, con la medición de magnitudes físicas por medio de sensores. La tarjeta de control a seleccionar debe tener comunicación serial con la finalidad de visualizar de manera confiable y en tiempo real los datos que se obtienen de los distintos sensores.

#### **a. Alternativas de selección para tarjeta de control**

En la Tabla 19, se presenta las tres alternativas para la selección de la tarjeta de control del sistema de amortiguamiento con sus respectivas características a tener en cuenta.

**Tabla 19***Alternativas de selección para tarjeta de control de velocidad*

Alternativa 1. BeagleBone Pocket	Alternativa 2. Raspberry Zero	Alternativa 3. Arduino Nano
		
Características	Características	Características
<ul style="list-style-type: none"> <li>• V de operación: 5 [V]</li> <li>• Clases de comunicación: HS USB</li> <li>• I/O digitales: 44,</li> <li>• I analógicas: 8</li> <li>• Costo: \$35</li> <li>• Dimensiones: 78.74 x 76 [mm]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de operación: 5 [V]</li> <li>• Clases de comunicación: Micro USB, HDMI</li> <li>• I/O digitales: 40</li> <li>• Costo: \$50</li> <li>• Dimensiones: 65 x 30 x 5 [mm]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de operación: 5 [V]</li> <li>• Clases de comunicación: Serial, USB</li> <li>• I/O digitales: 22, PWM: 6, I analógicas: 8</li> <li>• Costo: \$8</li> <li>• Dimensiones: 18x 45 [mm]</li> </ul>

**b. Criterios de selección para la tarjeta de control**

Para la selección de la tarjeta de control del sistema de amortiguamiento se interpreta según las prioridades ver (Tabla 5), de los siguientes parámetros.

- Voltaje de polarización
- Tipo de comunicación
- Costo
- Tamaño
- Memoria RAM
- Corriente de salida

### c. Selección de la mejor alternativa para la tarjeta de control.

En la Tabla 20 se presenta la validación de las tres alternativas para la selección de la tarjeta de control, según la escala de prioridades que se otorga a cada criterio de selección.

**Tabla 20**

*Valoración de las alternativas para la selección de la tarjeta de control*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Voltaje de polarización	5	5	5
Tipo de comunicación	5	5	5
Costo	4	3	5
Tamaño	3	4	5
Memoria RAM	5	5	3
Corriente de salida	4	4	5
Peso	4	4	5
<b>Total</b>	30	30	<b>33</b>

Según el dato obtenido de la valoración de las dos alternativas que se propone en la Tabla 20, la opción que más adecuada es la alternativa 3, por lo cual se utiliza un Arduino Nano como tarjeta de control del sistema de amortiguamiento por su peso, tamaño y costo, como características más sobresalientes que las otras alternativas mencionadas.

### 2.7.2 Controlador del amortiguador MR

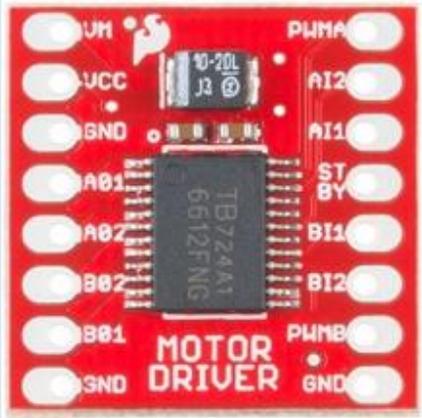
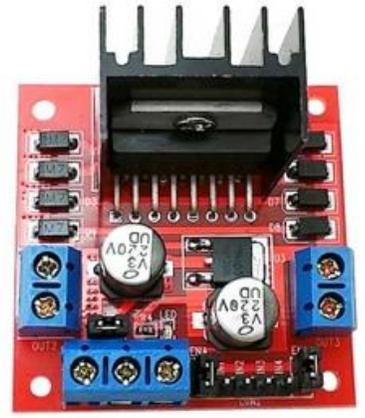
Una de las principales características que debe tener el amortiguador magnetoreológico es variar su fuerza de oposición al movimiento de las mordazas en el cierre del gripper, se pretende adquirir un controlador capaz modificar su salida tensión por medio de una señal digital PWM.

#### a. Alternativas de selección del control del amortiguador MR

En la Tabla 21, se presenta las tres alternativas para la selección del controlador de amortiguador MR con sus respectivas características.

**Tabla 21**

*Alternativas para la selección del controlador del amortiguador*

Alternativa 1. Módulo driver TB6612FNG	Alternativa 2: Módulo driver L298N
 <p>The image shows a red PCB motor driver module. It features a central black integrated circuit labeled 'TB724A1 6612FNG'. The board has various pins labeled: UH, UCC, GND, A01, A02, B01, B02, 3ND, PUMA, AI2, AI1, ST, BY, BI1, BI2, PUMB, and GND. A small capacitor is visible near the top.</p>	 <p>The image shows a red PCB motor driver module with a large black heat sink. It has several pins labeled: A01, A02, B01, B02, GND, and PUMB. There are also two electrolytic capacitors labeled '100µF 5V' and '100µF 5V'.</p>
<b>Características</b>	<b>Características</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensión máxima: 12-15 [V]</li> <li>• Corriente de trabajo: 1.2 [A] por canal, 3 [A] pico</li> <li>• Entradas PWM: 2, Canales: 2</li> <li>• Dimensiones: 2x2cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensión máxima: 12-35 [V]</li> <li>• Corriente de trabajo: 2 [A] por canal, 3 [A]pico</li> <li>• Canales: 2, Entradas PWM:2</li> <li>• Dimensiones: 4.3x4.3x2.7 [cm]</li> </ul>

### **b. Criterios de selección del controlador del amortiguador MR**

Para la selección del controlador del amortiguador MR se interpretó entre las principales características que se mencionan en continuación.

- Tensión máxima
- Corriente de trabajo
- Tamaño
- Peso
- Costo

- Canales de operación

### c. Selección de la mejor alternativa del controlador del amortiguador MR

En la Tabla 22 se presenta la validación de las tres alternativas para la selección del controlador del amortiguador MR, según la escala de prioridades que se otorga a cada criterio de selección.

**Tabla 22**

*Valoración de alternativas para selección controlador del amortiguador MR*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2
Tensión Máxima	4	5
Corriente de trabajo	4	5
Tamaño	5	4
Canales de Operación	5	5
Peso	5	4
Costo	5	4
<b>Total</b>	<b>28</b>	27

Según el dato obtenido de la valoración de las dos alternativas que se propone en la Tabla 22, la opción que más adecuada es la alternativa 1 por lo cual se utiliza el módulo driver TB6612FNG para el controlador del amortiguador magnetoreológico por su peso, tamaño y costo, como características más sobresalientes que la otra alternativa mencionada.

### 2.7.3 Sensor de Fuerza

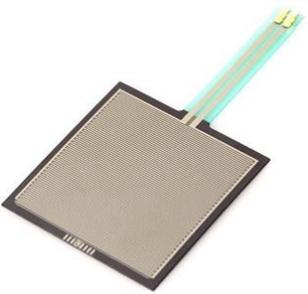
Se requiere de un sensor capaz de medir la variación de fuerza al sujetar un objeto de prueba por las mordazas de gripper, para determinar la fuerza de cierre en las garras del gripper.

### a. Alternativas de selección del sensor de fuerza

En la Tabla 23, se presenta las dos alternativas para la selección del sensor de fuerza con sus respectivas características a considerar para su selección.

**Tabla 23**

*Alternativas para la selección del sensor de fuerza*

Alternativa 1. Sensor Resistivo circular	Alternativa 2. Sensor resistivo cuadrado
	
Fuente: (Brico Geek, 2019)	Fuente: (Brico Geek, 2019)
<b>Características</b>	<b>Características</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud: 62[mm], grosor: 1[mm], diámetro: 18[mm]</li> <li>• Resistencia sin presionar: 1[MΩ]</li> <li>• Costo: \$16</li> <li>• Rango de fuerza: 1-100 [N]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud: 89[mm], grosor: 1[mm], superficie táctil: 44.4x38[mm]</li> <li>• Resistencia sin presionar: 1[MΩ]</li> <li>• Costo: \$22</li> <li>• Rango de fuerza: 1-100 [N]</li> </ul>

### b. Criterios de selección del sensor de fuerza

Para la selección del sensor de fuerza se establece las principales características de acuerdo a los parámetros que se mencionan a continuación.

- Tamaño
- Costo
- Rango de fuerza
- Facilidad de Adecuación

### c. Selección de la mejor alternativa del sensor de fuerza

En la Tabla 24 se presenta la validación de las dos alternativas para la selección del sensor de fuerza, según la escala de prioridades que se otorga a cada criterio de selección.

**Tabla 24**

*Valoración de las alternativas para selección del sensor de fuerza*

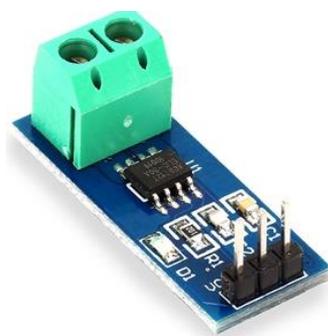
Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2
Tamaño	5	4
Costo	5	4
Rango de fuerza	5	5
Facilidad de adecuación	5	4
Total	20	17

Según el dato obtenido en la valoración de las dos alternativas que se propone en la Tabla 24, la opción más adecuada es la alternativa 1, por lo cual se emplea un sensor de la serie FSR 400 para medir la fuerza en las garras del gripper, al sujetar un objeto por su costo, tamaño y facilidad de adecuación como características más sobresalientes que la otra alternativa mencionada.

#### 2.7.4 Sensor de corriente ACS712

La característica principal del módulo driver TB6612FNG seleccionado en la sección 2.7.2 es que tiene hasta 1.2 [A] en teoría a la salida de cada canal, se convierte en una de las principales variables del sistema de amortiguación. Es primordial medir la intensidad de corriente que circula en la bobina del cilindro magnetoreológico por esta razón se utiliza un sensor de corriente ACS712 para visualizar los datos en serial de Arduino y asegurar de manera efectiva que se genera el campo magnético necesario para cambiar las propiedades del fluido en base a la variación del nivel de flujo magnético.

En la Figura 64, se presenta el sensor de corriente, en la tabla se visualizan las características técnicas del módulo ACS712.



**Figura 64.** Sensor ACS712

Fuente: (Electronilab, 2019)

**Tabla 25**

*Datos técnicos módulo sensor de corriente ACS712*

Características técnicas	
<b>Voltaje de salida</b>	Analog output 66mV / A
<b>Salida de voltaje sin corriente</b>	VCC/2
<b>Voltaje de operación</b>	4.5-5.5 [VDC]
<b>Ancho de banda</b>	80 kHz
<b>Dimensiones PCB</b>	31x14 [mm]
<b>Error total de salida</b>	1.5% at TA = 25°C
<b>Resistencia interna</b>	1.2 mΩ
<b>Sensibilidad de salida</b>	66 to 185 mV/A

Fuente: (Electronilab, 2019)

### 2.7.5 Sensor Magnético

El cilindro neumático que se seleccionó en la sección 2.3.1- b tiene un funcionamiento magnético, al extender y contraer su vástago la parte imantada del pistón cambia de posición para poder determinar el estado del mismo, se hace uso del sensor magnético reedswitch TDA-93 para captar la señal de apertura y cierre de las garras del gripper que permite realizar la activación del campo magnético solo al cierre de la pinza. En la Figura

65 se visualiza el sensor magnético, por su tamaño es el ideal para implementarlo en la estructura inter de la pinza, en la Tabla 26 se mencionan los datos técnicos principales del sensor reedswitch TDA-93.



**Figura 65.** Reedswitch CT TDA-93

Fuente: (Chanto Air Hydraulics Co., Ltd., 2019)

**Tabla 26**

*Datos técnicos reedswitch*

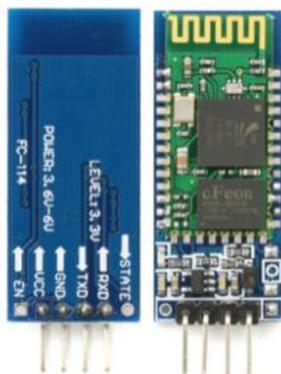
Características técnicas	
<b>Serie</b>	TDA-93
<b>Sensor tipo</b>	Reedswitch
<b>Voltaje operativo</b>	DC/AC 5~120
<b>Corriente de conmutación</b>	100 [mA]
<b>Temperatura</b>	-10 ~ 70 °C
<b>Grado de protección</b>	IP67
<b>Sensibilidad de respuesta</b>	2.1 [mT]

Fuente: (Chanto Air Hydraulics Co., Ltd., 2019)

### 2.7.6 Modulo Bluetooth HC-06

Una de las principales normas de seguridad al trabajar en una celda robotizada es que el operario debe permanecer fuera del área de alcance del manipulador robótico, o a su vez fuera de la celda robotizada por eso se precisa de un módulo que permita transmitir y recibir los datos de las variables del sistema para visualizar esta información en la pantalla del ordenador por medio de un puerto serial, se hace uso de un módulo bluetooth

HC-06 que opera solo en modo esclavo para el envío de información. Se establece una conexión de tal manera que el flujo de datos se da entre el módulo bluetooth HC-06, la placa Arduino nano y el puerto serial del ordenador, Figura 66. En la Tabla 27 se presentan las principales características del módulo seleccionado.



**Figura 66.** Bluetooth HC-06

Fuente: (Electronilab, 2019)

**Tabla 27.**

*Datos técnicos módulo bluetooth HC-06*

Características técnicas	
<b>Compatible de protocolo</b>	Bluetooth V2.0
<b>Voltaje de alimentación</b>	3.3-6 [VDC]
<b>Voltaje de operación</b>	3.3 [VDC]
<b>Baud rate ajustable</b>	1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200
<b>Tamaño</b>	4.4x1.6x0.7 [cm] (1.73x0.63x0.28 [in])
<b>Corriente de operación</b>	< 40 [mA]
<b>Corriente modo sleep</b>	<1[mA]

Fuente: (Electronilab, 2019)

### 2.7.7 Relé

El módulo WAGO ubicado en el armario de controlador del robot KUKA KR-16 emite una señal 24 [V] de salida que es receptada por la válvula solenoide para cerrar el gripper, se precisa que la señal sea de 5 VCD para establecer como entrada para el Arduino y realizar el control. Se selecciona el Relé SDR-05VCD para captar las señales del WAGO

y permitir la activación de la salida PWM a los amortiguadores magnetoreológicos para atenuar el cierre de las garras, Figura 67. En la Tabla 28 se presentan las principales características del módulo seleccionado.



**Figura 67.** Relé SDR-05VCD

Fuente: (EBAY, 2019)

**Tabla 28.**

*Datos técnicos de Relé SDR-05VCD*

Características técnicas	
Número de pines	5
Contactos	SPDT
Carga nominal	10[A] 250 [VAC], 10[A] 30[VDC]
Corriente máx. conmutación	10 [A]
Potencia	0,45 [Watt]
Voltaje máx. conmutación	110VDC / 250VAC
Contactos	C:1 (NO/NC)

Fuente: (EBAY, 2019)

## CAPÍTULO III

### CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL GRIPPER

#### 3.1. Estructura mecánica.

Una vez realizado el diseño de las piezas que conforman la estructura mecánica del gripper mediante el análisis de elementos finitos de esfuerzos y cargas y validar mediante los resultados obtenidos, se procede a la fabricación de toda la estructura aplicando las técnicas de deposición fundida (específicamente la técnica de impresión de forma rectangular 0° y 90°) con el material de impresión seleccionado (ABS). Se realiza la impresión en 3D cada una de las piezas con un porcentaje de relleno de acuerdo a cada una, temperatura de impresión 230 °C, temperatura de la cama caliente 80°C logrando piezas compactas, solidas, livianas con la mayor calidad de impresión y el acabado adecuado para permitir el acople de toda la estructura y la implementación del gripper en la muñeca del robot.

A continuación, se describe el proceso de impresión 3D que se realizó para los componentes de la estructura del gripper neumático.

##### 3.1.1. Impresión 3D de los Jacks

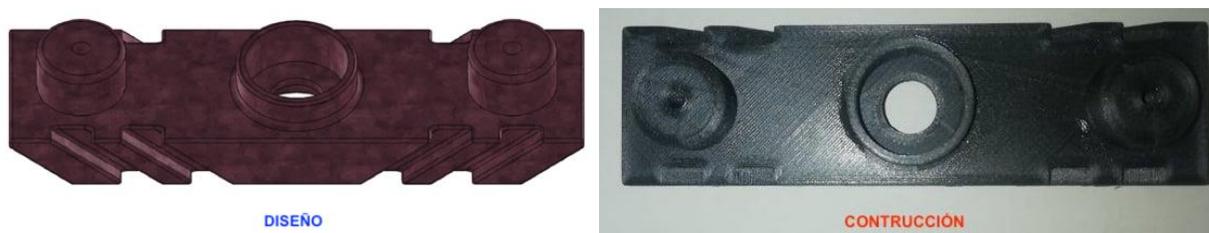
Se precisa de dos piezas denominada jack debido a que el gripper consta de dos garras, de tal manera que encaje con el gancho de cuña conjuntamente con la carcasa del gripper, como se visualiza en la Figura 68.



**Figura 68.** Jack fabricado

### 3.1.2. Impresión 3D del gancho de Cuña

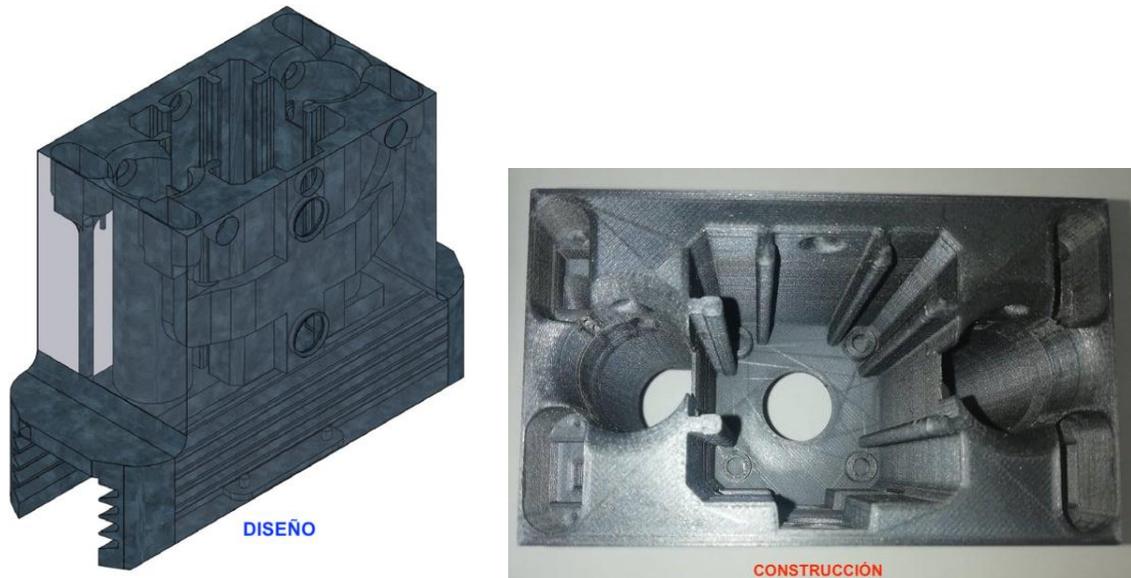
Se procede a realizar la fabricación del gancho de cuña, esta pieza permite el desplazamiento lineal de los jacks de acuerdo al principio de máquina simple de cuña, de tal manera que encaje con la carcasa del gripper, Figura 69.



**Figura 69.** Fabricación gancho de cuña

### 3.1.3. Impresión 3D de carcasa

Se procede a realizar la fabricación de la carcasa del gripper, esta pieza abarca todos los elementos, dispositivos, amortiguador MR, cilindro neumático del gripper, además junto a los jacks permite el desplazamiento lineal de las garras, Figura 70.



**Figura 70.** Fabricación de la carcasa

#### 3.1.4. Impresión 3D de la tapa inferior

Se procede a realizar la fabricación de la tapa inferior, este elemento es sumamente importante ya que delimita la incursión del gancho de cuña en los jacks, estableciendo la carrera por garra del gripper, Figura 71.



**Figura 71.** Fabricación de la tapa inferior

### 3.1.5. Impresión 3D de la tapa superior

Se procede a realizar la fabricación de la tapa superior, este elemento es de vital importancia debido a que soporta el peso total de la herramienta es decir la carcasa conjuntamente con sus elementos, además es la pieza que permite que el gripper se acople a la muñeca del brazo robótico, Figura 72.



**Figura 72.** Fabricación de la tapa superior

### 3.1.6. Impresión 3D de las garras

Se precisa de dos piezas denominada garras que van sujetas a los jacks, este elemento es el que más desgaste va a tener debido a que debe agarrar el objeto para moverlo de posición, por esta razón se realiza el proceso de recubrimiento con material de fibra de carbono, dando un mejor acabado del mismo, Figura 73.



**Figura 73.** Fabricación de garras

### 3.1.7. Recubrimiento de material compuesto de las garras del gripper

Se realiza el proceso de recubrimiento de material compuesto, con fibra de carbono usando el método de hidrografía, que permite adherir una fina película de la fibra a la pieza, sin formar pliegues ni discontinuidades en las aristas de pieza, Figura 74.



**Figura 74.** Acabado de garras

Las características establecidas para la impresión 3D de cada pieza se visualizan en la Tabla 29.

**Tabla 29.**  
*Características de impresión 3D de piezas*

Pieza	Cantidad	Peso C/U [kg]	Tiempo [horas]	% Relleno
Jack	2	0,060	7,283	90
Gancho de cuña	1	0,016	7,167	100
Carcasa	1	0,337	44,93	60
Tapa inferior	1	0,003	0,55	100
Tapa superior	1	0,109	12,633	80
Garra	2	0,158	12,667	80

### 3.1.8. Construcción del amortiguador MR

#### a. Adecuación del amortiguador

Como se establece en la sección 2.3.1-c de diseño del amortiguador, los elementos que conforman este dispositivo se visualizan en la Figura 75, aparecen dos artículos de cada uno ya que se implementan dos amortiguadores, que a su vez están listas para el ensamble del amortiguador. En la Figura 76 se visualiza el ensamble parcial del amortiguador MR, a falta de implementar el electroimán en la zona destinada para el bobinado del solenoide.



**Figura 75.** Elementos del amortiguador



**Figura 76.** Ensamble amortiguador

### b. Implementación del electroimán

Se procede a realizar el bobinado del solenoide, el área designada se delimita con cinta aislante para evitar el contacto con la parte de aluminio del amortiguador (Figura 77), en seguida se procede con la elaboración del electroimán (Figura 78)



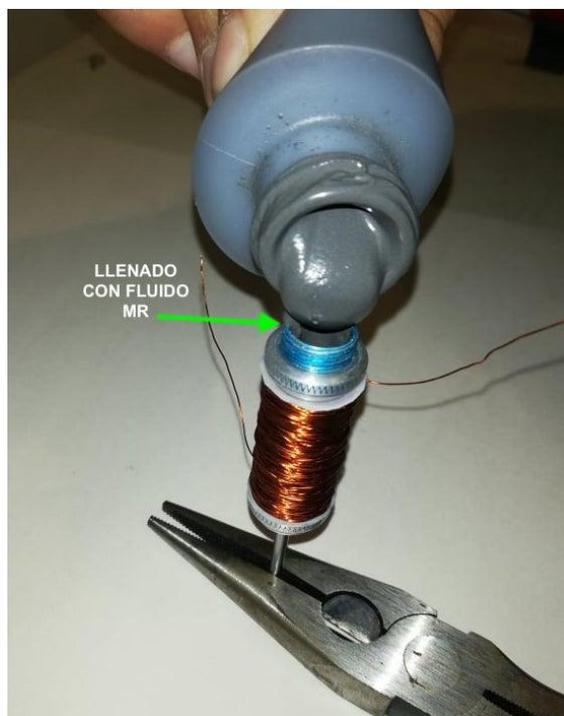
**Figura 77.** Área del bobinado



**Figura 78.** Elaboración electroimán

### c. Llenado del fluido magnetoreológico

Se procede hacer el llenado de la cavidad del amortiguador con el fluido magnetoreológico (Figura 79), posteriormente se coloca la tapa del amortiguador ubicando un sellador para evitar que el líquido se derrame con el uso continuo.



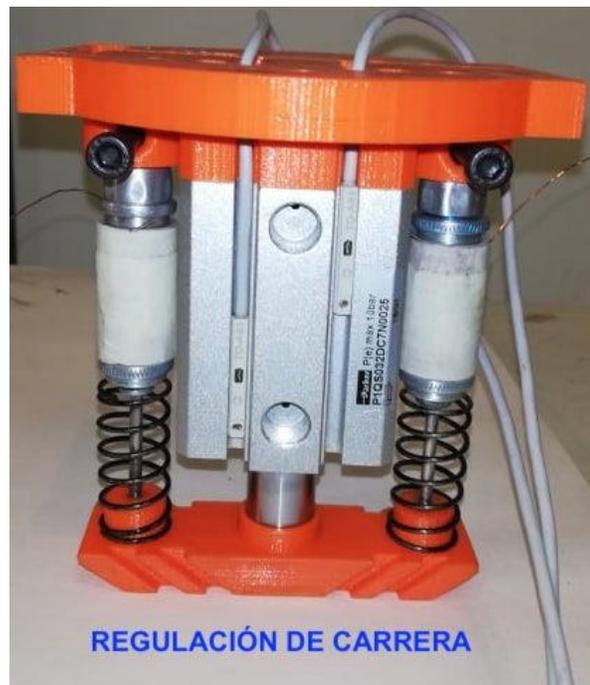
**Figura 79.** Llenado del amortiguador con fluido MR

### 3.2. Regulación de velocidad de carrera.

Se procede a realizar el ensamble del mecanismo de regulación de velocidad de carrera como tal, consta de los dos amortiguadores con sus respectivos resortes, el cilindro neumático, el gancho de cuña y los jacks, este sistema en conjunto con su controlador permite atenuar el desplazamiento de las garras al cerrar el gripper.

### 3.2.1. Mecanismo de regulación de velocidad de carrera

Se procede a implementar los dispositivos que integran este mecanismo de tal manera que los amortiguadores MR y el cilindro neumático se sujeten a la tapa superior de tal manera que al ejercer el movimiento estos elementos permanezcan en su posición establecida, Figura 80.

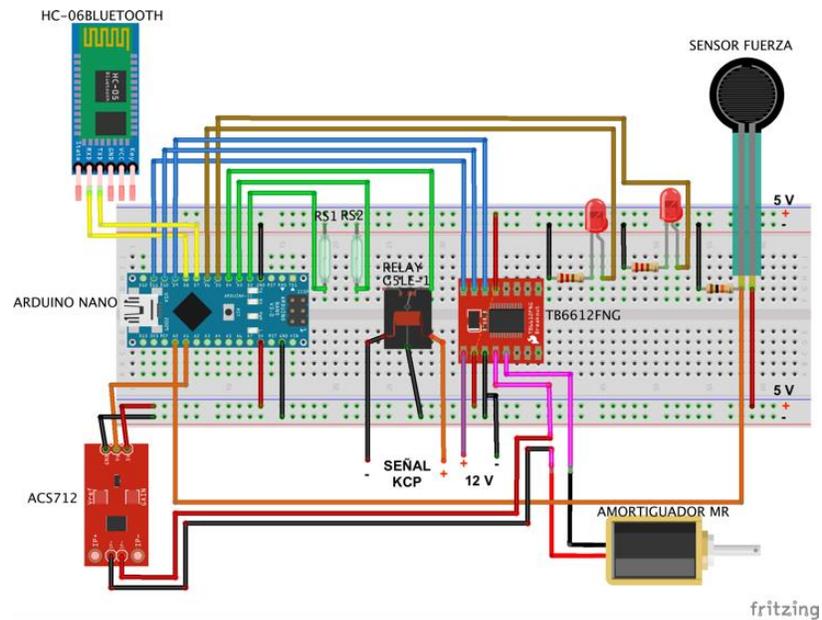


**Figura 80.** Mecanismo de regulación de velocidad

### 3.2.2. Control de regulación de velocidad de carrera con amortiguación

#### a. Diagrama de conexiones del circuito de control.

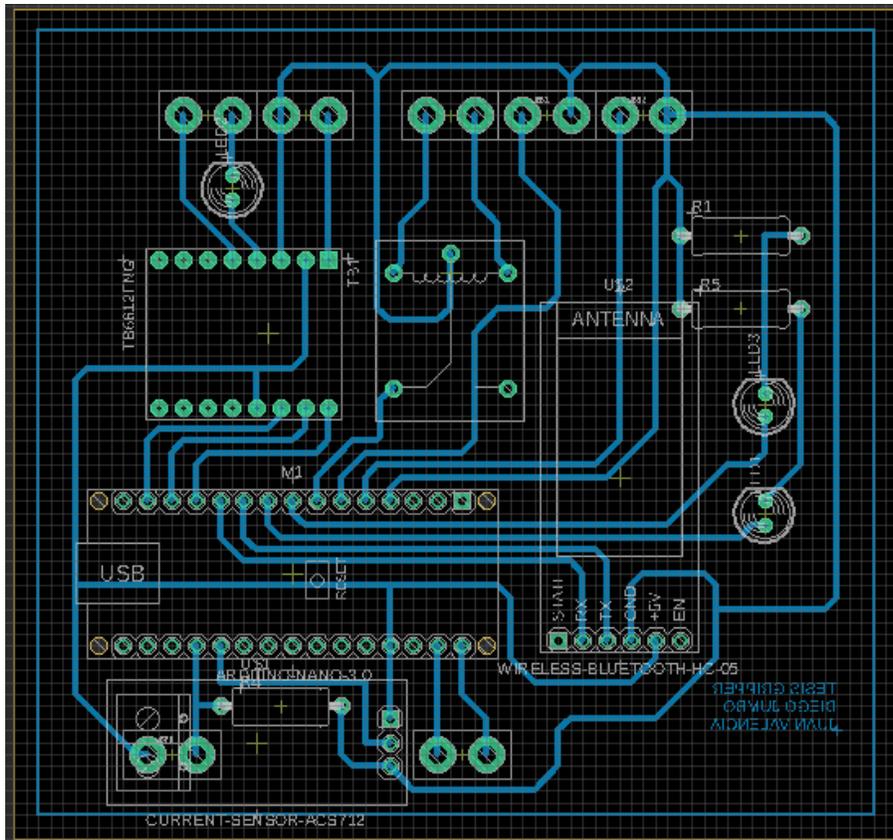
Dentro del sistema eléctrico del gripper, se debe describir cada conexión existente entre los componentes internos en un esquema con tal información, como se muestra en la Figura 81.



**Figura 81.** Esquema de conexión del circuito eléctrico

### b. Fabricación de la placa PCB

Luego de seleccionar cada elemento del circuito de control de velocidad de carrera con amortiguación, se procede a diseñar el PCB de la placa del circuito de control con él se procede a la fabricación del diseño PCB en placa Figura 82, mediante el uso de un programa para la simulación de circuitos.



**Figura 82.** Esquema PCB de la placa del circuito de control

Al concluir, con la elaboración de la placa para el circuito de control, se tiene dimensiones de 0,09 m de largo por 0,09 m de ancho, en seguida se procede con la soldadura de todos los componentes que integran el circuito de control con los respectivos terminales para la conexión de sensores y alimentación, que se encuentran en la estructura del gripper, Figura 83.



**Figura 83.** Placa PCB final

### 3.3. Implementación de dispositivos

La parte de implementación electrónica sensores, actuadores, elementos de control se describe a continuación.

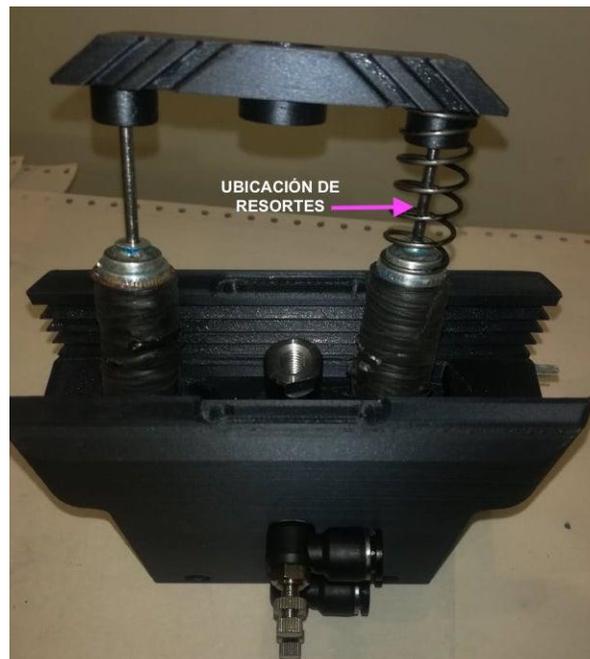
#### 3.3.1. Implementación de amortiguadores

Se ubica los amortiguadores MR en el sitio designado en la estructura interna, están cubiertos de cinta aislante para evitar el rozamiento del alambre conductor y que lo se desgaste con el continuo uso. Los amortiguadores MR se ubican en el área designada Figura 84, el anillo de sujeción va junto a la tapa superior y el otro extremo roscado va junto al gancho de cuña.



**Figura 84.** Implementación amortiguadores MR

Se colocan los resortes de tal manera que ayuden a la atenuación de los jacks en el mecanismo de regulación al cerrar el gripper al contraerse, Figura 85.



**Figura 85.** Ubicación de resortes

### 3.3.2. Implementación de cilindro neumático

Se ubica el cilindro neumático dentro de la estructura interna del gripper Figura 86, con la conexión del extremo del vástago al gancho de cuña con tornillo M4x0,5 según el grupo 1 establecido en la (sección 2.3.1-a) de tal manera que al extender el vástago realice el movimiento de apertura de las garras del gripper. El montaje del cilindro neumático se realiza conforme a lo establecido en la (sección 2.3.1-a), el cual va empotrado con tornillos M4x0,5 a la estructura del gripper y a la tapa superior. En los orificios designados para el ingreso de aire comprimido al pistón se acopla los racords (2x1/8 NPT de diámetro de 0,008 m) Figura 87, sellados con teflón para evitar fugas de aire.



**Figura 86.** Ubicación de cilindro neumático



**Figura 87.** Acople de racords al cilindro neumático

#### a. Calibración de sensores magnéticos

Se procede a realizar la calibración de los sensores magnéticos ubicándolos de forma estratégica, Figura 88; los reedswitch muestran el estado del gripper al abrir (sensor S2) y cerrar (sensor S1) las garras con un indicador luminoso (LED), se activan por la parte imantada del cilindro neumático al contraer (activa S1) y extender (activa S2) el vástago.



**Figura 88.** Calibración sensores magnéticos

### 3.3.3. Ubicación de los jacks

Se colocan los jacks en la estructura interna del gripper (Figura 89), para establecer el área de contacto con el gancho de cuña, el desplazamiento de esta pieza se da por el contacto que presenta con la carcasa, posee guías que permite el deslizamiento de manera lineal mientras se abre y cierra el gripper.



**Figura 89.** Ubicación de los jacks

### 3.3.4. Ubicación del sensor de fuerza en las garras

Se ubica el sensor de fuerza en la garra, debido a que es la parte que se encuentra en contacto con el objeto a sujetar, para medir la fuerza de cierre del gripper. La estructura interna de las garras presenta cavidades para establecer la conexión del sensor con la placa de control, Figura 90.



**Figura 90.** Implementación sensor FSR

### 3.3.5. Ubicación de las garras

Se colocan las garras con el recubrimiento de material compuesto, por medio de tornillos M5x0,5 se sujeta las garras a los jacks (Figura 91), de esta manera al generar el movimiento se desplazan las dos piezas de forma conjunta al activar al gripper.



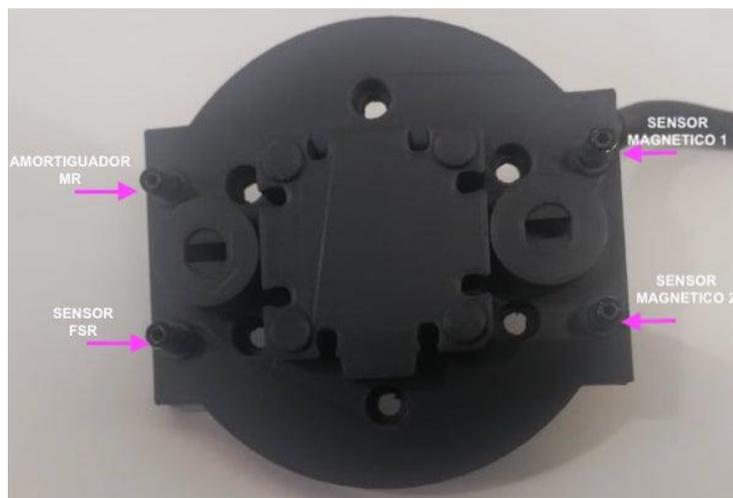
**Figura 91.** Ubicación de garras

### 3.3.6. Implementación de la tapa superior

Se ubica la tapa superior del gripper; por medio de pernos M5x0,5 se sujeta a la carcasa (Figura 92), además la tapa posee 4 cavidades internas que contiene plugs (Figura 93) que permite la conexión de los sensores y los amortiguadores a la placa de control, de esta manera el gripper neumático en general posee una estructura simétrica y estética.



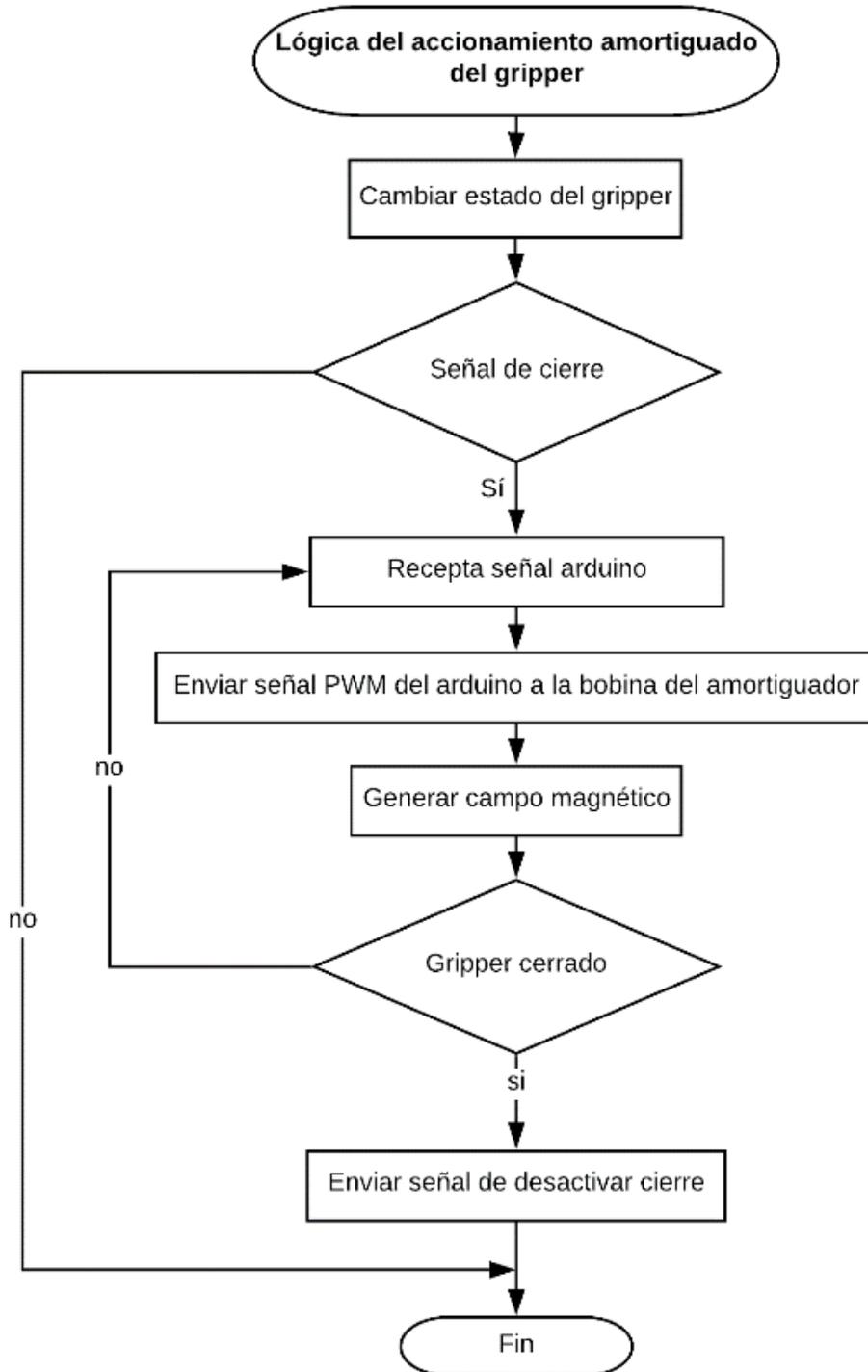
**Figura 92.** Ubicación de tapa superior



**Figura 93.** Tapa superior (vista interna)

### 3.3.7. Lógica el accionamiento del amortiguador en el gripper

En el diagrama de flujo de la Figura 94 se muestra el algoritmo de programación para tomar un objeto prismático con la herramienta gripper.

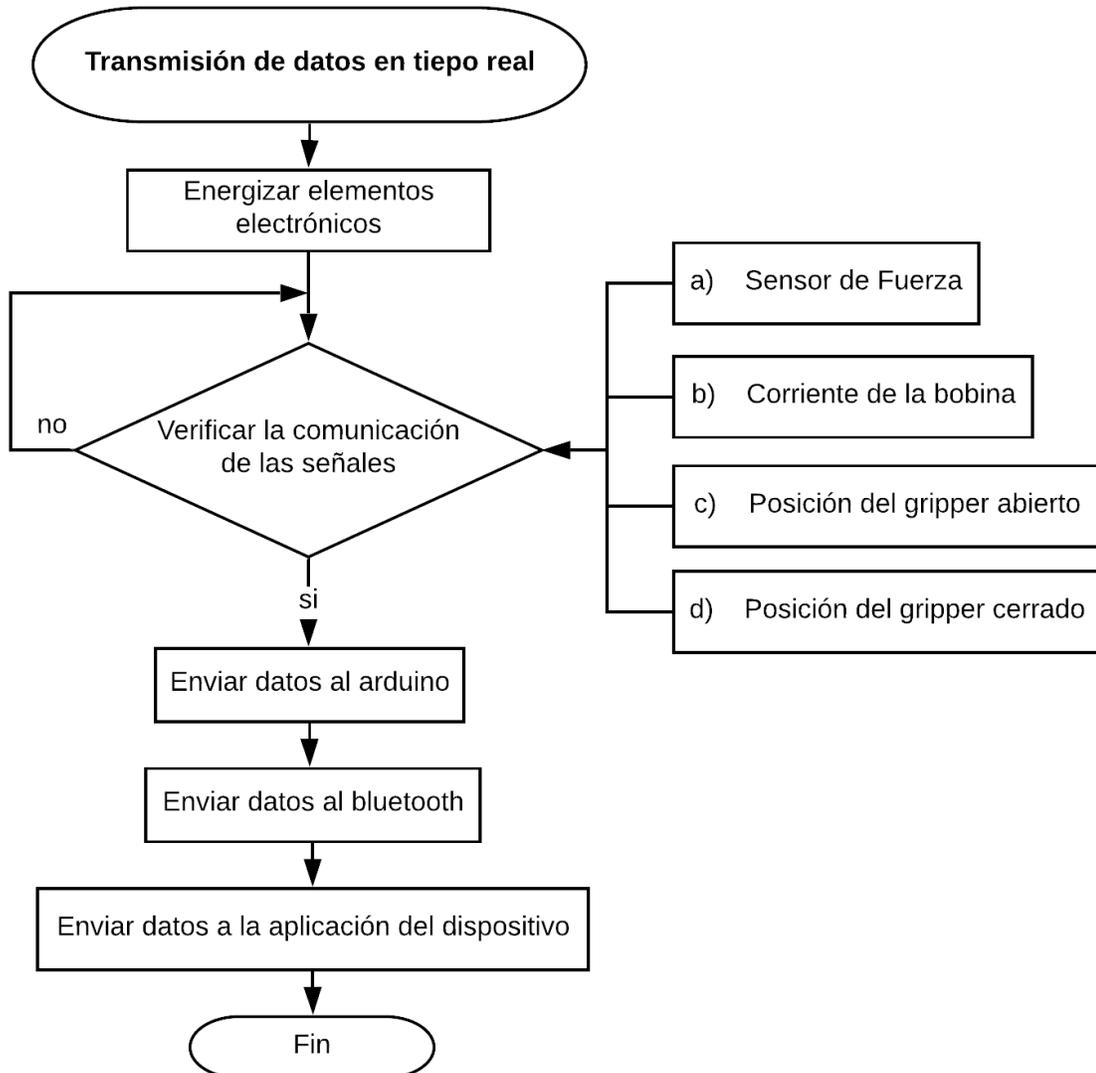


**Figura 94.** Diagrama de flujo para la amortiguación del gripper

### 3.3.8. Algoritmo de envío y recepción de datos

#### a) Envío de datos en tiempo real

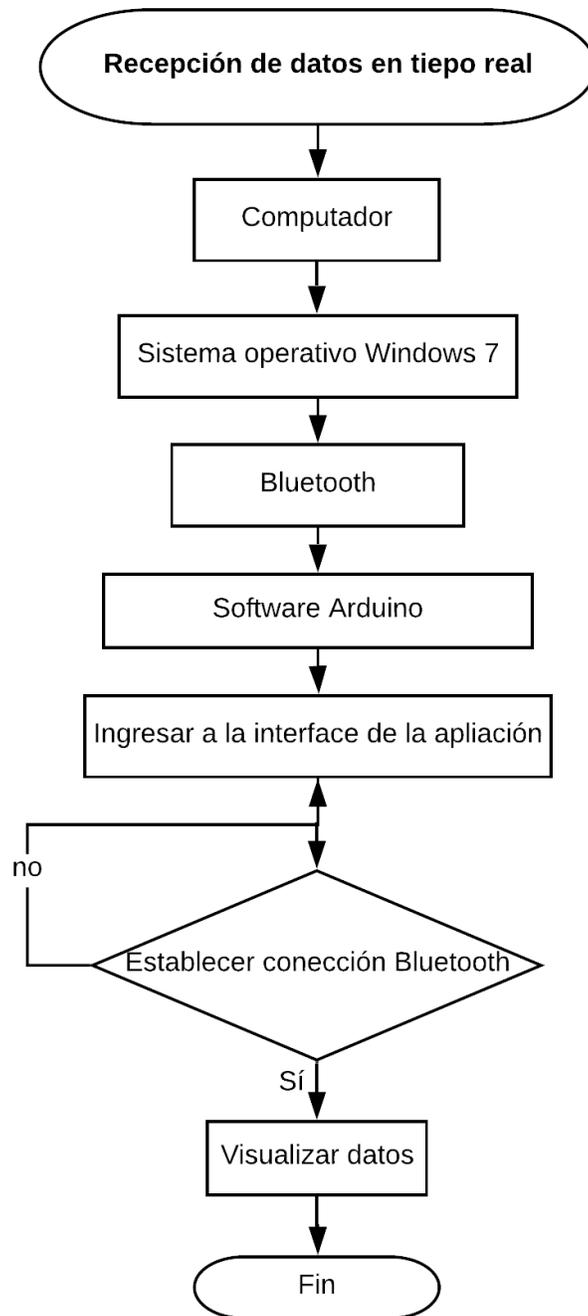
La transmisión de datos se realiza en base al diagrama de flujo de la Figura 95, donde se muestra la lógica para enviar datos desde el emisor al receptor.



**Figura 95.** Diagrama de flujo para el envío de datos

**b) Recepción de datos en tiempo real**

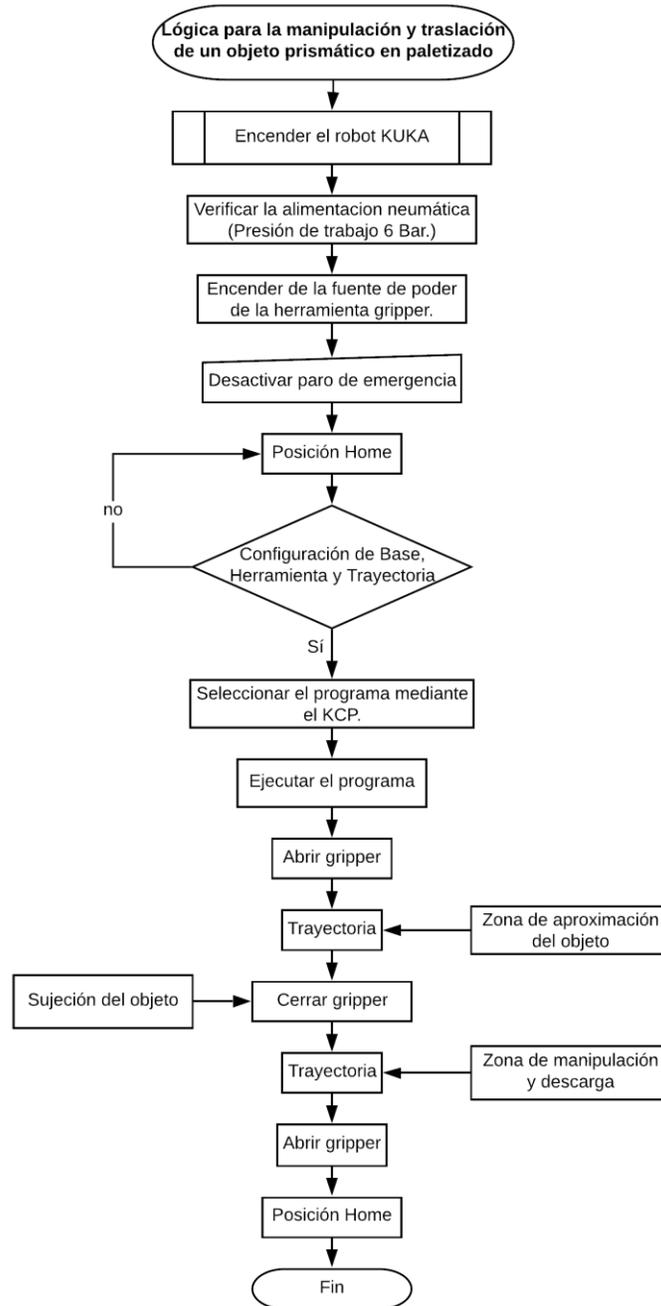
La recepción de datos se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 96, donde se muestra el algoritmo de programación para la tener una interface de visualización de datos transmitidos.



**Figura 96.** Diagrama de flujo para la recepción de datos

### 3.3.9. Lógica de manipulación y traslación de objetos.

En el diagrama de flujo de la Figura 97 se muestra el algoritmo de programación para tomar un objeto prismático y moverlo de una posición a otro con la herramienta gripper.



**Figura 97.** Diagrama de flujo para tomar un objeto en paletizado.

### 3.3.10. Algoritmo de control de velocidad de carrera del gripper

En la estructura principal del programa que se realizó para la aplicación del control de velocidad de carrera se establece las variables que intervienen en el proceso, se incluyen librerías y definición de puertos que se disponen de la tarjeta del control de la forma que se establece en la Figura 98. Se establece los puertos de comunicación serial mediante el Wireless con el módulo bluetooth HC-06, en las variables del amortiguador MR se utilizan puertos PWM para variar la salida de voltaje que ingresa al amortiguador de esta manera la atenuación se da de manera proporcional al cerrar el gripper, además se establece el valor de sensibilidad del sensor de corriente ACS712 de acuerdo a sus características técnicas.

```
#include <SoftwareSerial.h> // Incluimos la librería SoftwareSerial
SoftwareSerial BT(7,8); // Definimos los pines RX y TX del Arduino conectados al Bluetooth

//REED SWITCH
const int pinSensor = 2;
const int pinSensor1 = 3;
const int pinSensor2 = 4;

//LED'S
const int pinLED = 5;
const int pinLED1 = 6;

//SENSOR DE FUERZA
int fsrPin = 0;
int fsrReading;
int fsrVoltage;
unsigned long fsrResistance;
unsigned long fsrConductance;
long fsrForce;

//CILINDRO MAGNETOREOLÓGICO
int STBY; //standby
int PWMA = 9; //Speed control
int AIN1 = 10; //Direction
int AIN2 = 11; //Direction

//SENSOR DE CORRIENTE
float Sensibilidad=0.100; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 20A
```

**Figura 98.** Definición de variables del algoritmo de control

Luego de establecer los puertos para las variables que intervienen en el control de velocidad, se inicializa el puerto serial donde se visualizan los datos de estos parámetros además de designar las entradas y salidas del sistema para los sensores como también los indicadores LED y las variables de control del amortiguador MR.

Para la estructura del programa principal de la aplicación se precisa del envío del dato por medio del bluetooth a un puerto serial donde se visualizan los datos de sensores, mediciones como la corriente, fuerza y estado del gripper. De acuerdo al funcionamiento del gripper, se activa una señal desde el módulo WAGO para que la válvula solenoide permita el paso del aire comprimido y cerrar el gripper, esta señal es empleada para la activación del campo magnético al variar el voltaje que ingresa a los amortiguadores MR, solo cuando esta señal este activa de lo contrario el módulo driver no envía ningún nivel de voltaje al amortiguador MR.

Si el gripper se encuentra en su estado abierto (encendido de led verde) se precisa determinar la fuerza al sujetar u objeto, por esta razón con la programación se procede a calibrar el sensor FSR para determinar esta la fuerza de agarre del gripper.

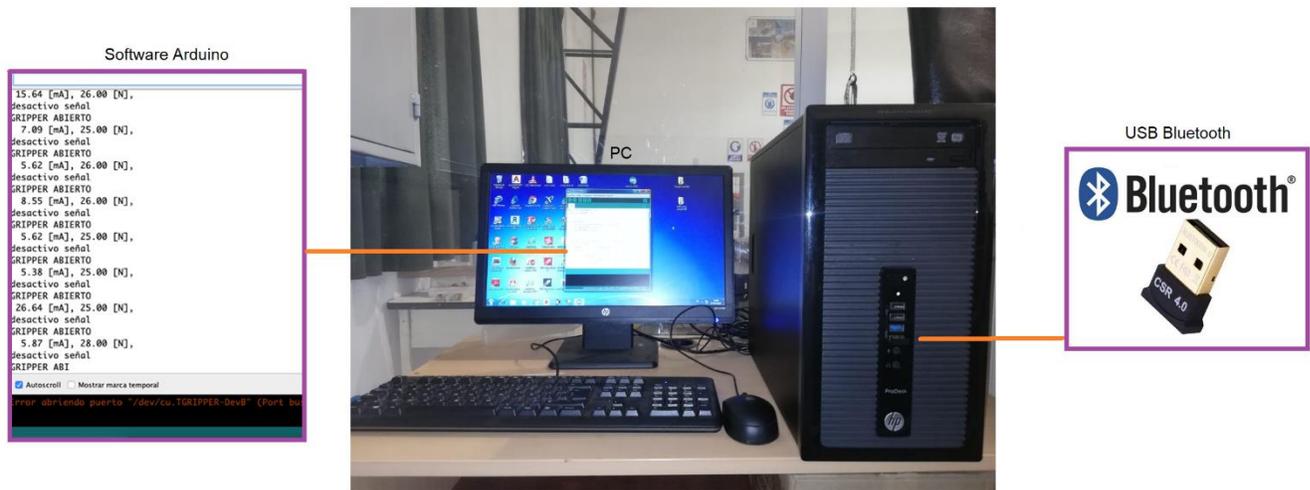
De la misma al tener el estado de cierre del gripper (encendido de led rojo), se precisa que la señal del módulo driver para alimentar de voltaje a los amortiguadores MR no esté activa, ya que la atenuación de la fuerza se dará solo al cerrar el gripper. Además, se realiza la toma el muestro de la corriente que ingresa a los amortiguadores MR ya que debe ir variando para aumentar el campo magnético.

La función que permite el control de los niveles de intensidad para variar el campo magnético al incrementar la señal de salida PWM del módulo driver TB6612FNG, donde establece el nivel de voltaje que se suministra a los amortiguadores MR.

Para la lectura del valor de la corriente se emplea las siguientes líneas de programación, para obtener un valor de medición más aproximado a la realidad se establece un promedio de mediciones de acuerdo al número de muestras.

### 3.3.11. Visualización de información.

Se realiza la conexión entre el arduino uno y el ordenador mediante el módulo bluetooth, para visualizar los datos provenientes del control del gripper, en la interface del monitor serial del programa Arduino, como se muestra en la Figura 99.

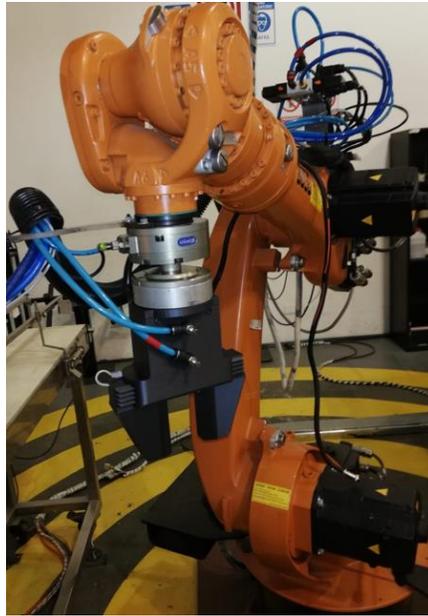


**Figura 99.** Recepción de datos

## 3.4. Ensamblaje

### 3.4.1. Montaje del gripper neumático a la muñeca del robot

Una vez realizado el ensamble del gripper con sus componentes se precede a implementar en el robot KUKA, de manera que toda la estructura permanezca unida al plato interface del manipulador por medio de la tapa superior se sujeta con pernos M8x1, de esta manera se fija con precisión, al operar el brazo robótico, Figura 100.



**Figura 100.** Montaje del gripper neumático

### **3.4.2. Montaje del circuito de control de velocidad en el robot**

Una vez realizado el acople del gripper neumático se inserta la placa del control de velocidad al brazo oscilante del manipulador, se ubica el circuito dentro de una caja sujeta por medio de tonillos M3x0,35, de esta manera se tiene un enlace de conexión con los dispositivos de señalización y alimentación del circuito que viene de la fuente de energía, además se utiliza un fusible de protección, Figura 101.



**Figura 101.** Montaje del circuito de control de velocidad

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Con el objetivo de asegurar que el diseño y la construcción de un gripper neumático industrial cumple con los parámetros para el cual fue diseñado, se realizó varias pruebas de trabajo para obtener datos de velocidad real a la que se desplazan las garras conforme al uso de los fluidos inteligentes y sin la aplicación de los mismos para determinar la variación de velocidad, en dos modos, con amortiguación y sin amortiguación; además se observa el comportamiento del gripper neumático al sujetar distintos materiales con diferentes pesos para ser transportados de un determinado lugar a otro, simulando ambientes industriales de paletizado. Los resultados obtenidos servirán para el respectivo análisis para la validación de la hipótesis planteada en el presente proyecto.

#### **4.1 Velocidad de carrera del gripper.**

En la sección 2.3.1-a se habla de la velocidad que ejerce el cilindro neumático en el cierre y apertura de las garras, que depende de varios factores que intervienen en el sistema neumático de alimentación para la activación del gripper. Se establece un valor de velocidad experimental de carrera del gripper, se realizan pruebas tanto para los modos de trabajo con amortiguación y sin amortiguación.

##### **4.1.1. Cálculo de velocidad lineal en el cierre del gripper**

Para el cálculo de la velocidad lineal en el cierre del gripper se establecen los parámetros que intervienen en el proceso como son la presión que se mantiene en los 6 [bar], la distancia que recorre las garras  $d_g$  que son siempre constantes cuando se

cierran las garras, el valor de acuerdo al diseño de la estructura se establece en 0,06m y el tiempo que se demora en llegar al estado inicial. En base a estas consideraciones se realizan pruebas para el cálculo de la velocidad conforme se muestra a continuación.

Donde:

- $V_{ca}$ : velocidad de carrera con amortiguación.
- $V_{sca}$ : velocidad de carrera sin amortiguación.
- $t_a$ : tiempo de amortiguación.
- $t_{sa}$ : tiempo sin amortiguación
- $d_g$ : distancia que recorren las garras

En la Tabla 30 se presenta los datos de las pruebas realizadas tanto para los tiempos que se registran según los 20 ensayos realizados, para los dos modos de operación velocidad de carrera con amortiguación y sin amortiguación.

**Tabla 30.**

Para el cálculo de la velocidad de carrera en el cierre del gripper, con amortiguación y sin amortiguación  $V_{ca,csa}$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{ca,csa} = \frac{d_g}{t_{a,sa}} \quad \text{Ecuación 51}$$

Donde:

- $V_{ca}$ : velocidad de carrera con amortiguación.
- $V_{sca}$ : velocidad de carrera sin amortiguación.
- $t_a$ : tiempo de amortiguación.
- $t_{sa}$ : tiempo sin amortiguación

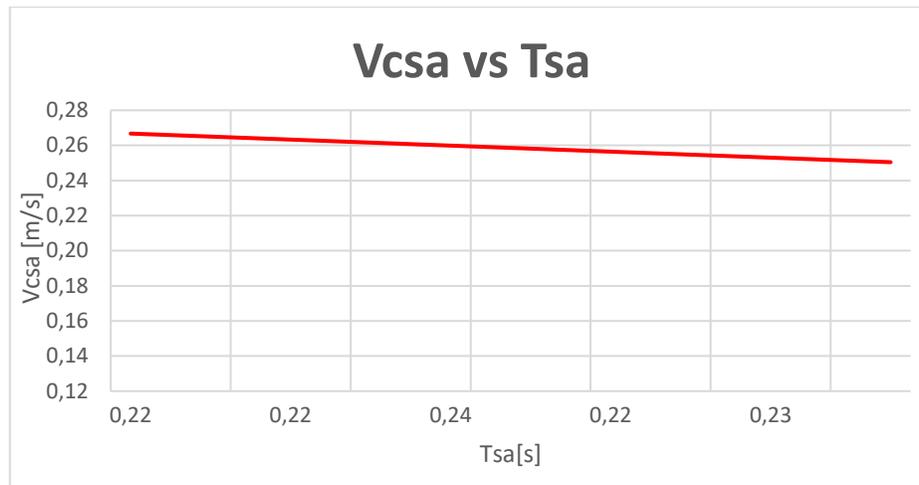
- $d_g$ : distancia que recorren las garras

En la Tabla 30 se presenta los datos de las pruebas realizadas tanto para los tiempos que se registran según los 20 ensayos realizados, para los dos modos de operación velocidad de carrera con amortiguación y sin amortiguación.

**Tabla 30**  
*Pruebas de velocidad de carrera del gripper neumático*

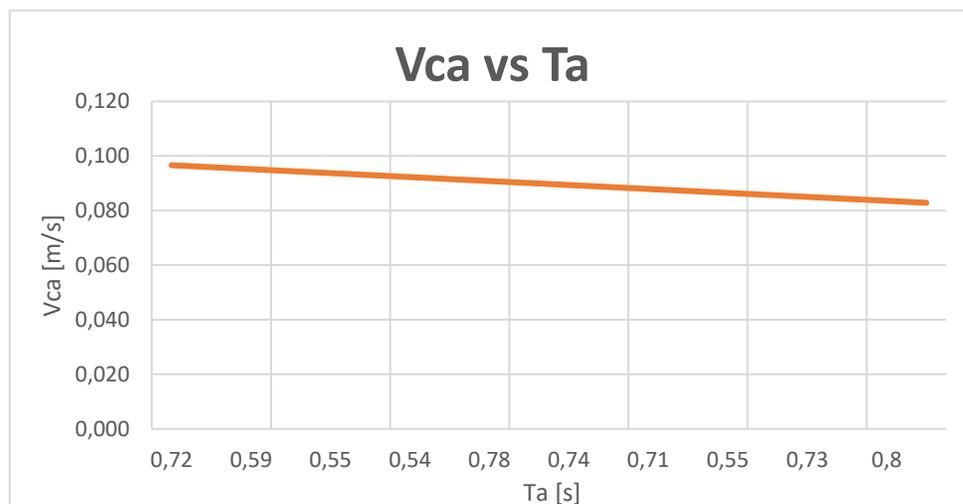
# Ensayos	$T_{sa}$	$V_{sa}$	$T_a$	$V_a$
1	0,22	0,273	0,72	0,083
2	0,23	0,261	0,66	0,091
3	0,22	0,273	0,59	0,102
4	0,24	0,250	0,69	0,087
5	0,22	0,273	0,55	0,109
6	0,23	0,261	0,58	0,103
7	0,22	0,273	0,54	0,111
8	0,23	0,261	0,7	0,086
9	0,24	0,250	0,78	0,077
10	0,23	0,261	0,71	0,085
11	0,24	0,250	0,74	0,081
12	0,23	0,261	0,68	0,088
13	0,22	0,273	0,71	0,085
14	0,25	0,240	0,72	0,083
15	0,24	0,250	0,55	0,109
16	0,25	0,240	0,63	0,095
17	0,23	0,261	0,73	0,082
18	0,25	0,240	0,71	0,085
19	0,24	0,250	0,8	0,075
20	0,22	0,273	0,77	0,078
<b>Prom.</b>	0,259		0,090	

En la Figura 102 se observa la gráfica velocidad de carrera sin amortiguación en función del tiempo sin amortiguación, que se obtiene al realizar los 20 ensayos con registro de datos y cálculos.



**Figura 102.** Velocidad de carrera sin amortiguación (cierre)

En la Figura 103 se observa la gráfica velocidad de carrera con amortiguación en función del tiempo sin amortiguación que se obtiene al realizar los 20 ensayos con registro de datos y cálculos.



**Figura 103.** Velocidad de carrera con amortiguación (cierre)

Según los resultados de la Tabla 30, se obtiene una velocidad promedio con amortiguación de 0,09 m/s y una velocidad promedio sin amortiguación de 0,259m/s, a partir de estos valores se procede a calcular con qué porcentaje la velocidad con amortiguación atenúa el cierre de las garras del gripper, se compara con el dato de la velocidad sin amortiguación haciendo una regla de tres, de esta manera se establece la relación que existe entre los dos modos de trabajo del gripper neumático.

A partir de la velocidad promedio sin amortiguación, se calcula el porcentaje de amortiguación en función de los datos de los datos experimentales con la siguiente expresión:

$$\%_a = \frac{V_a \times 100\%}{V_{sa}} \quad \text{Ecuación 52}$$

$$\%_a = \frac{0,09 \frac{m}{s} \times 100\%}{0,259 \frac{m}{s}}$$

$$\%_a = 34,74\%$$

De forma experimental se observa que el dato del porcentaje obtenido  $\%_a$ , permite establecer que la velocidad de cierre del gripper al ser comparado con el dato promedio de la velocidad sin amortiguación disminuye en un tercio, de esta manera se puede apreciar en base a los resultados de las pruebas realizadas que existe una atenuación al cerrar el gripper.

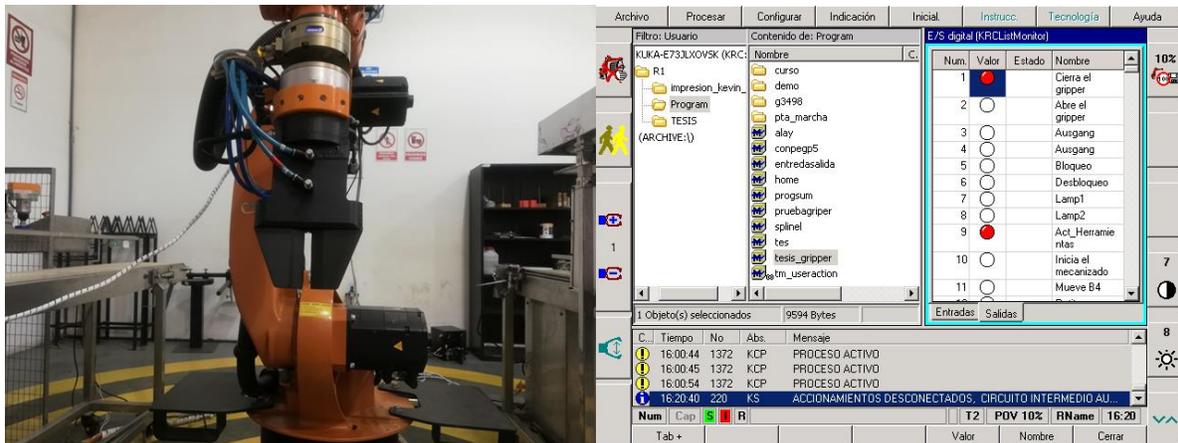
## 4.2 Control del gripper.

El control del gripper se da a través de una señal digital del KCP, esta señal es transmitida por la unidad de control hacia una válvula solenoide, neumáticamente el gripper recibe la orden de apertura o cierre.

### 4.2.1. Control del gripper en estado cerrado.

Esta etapa se logra mediante un valor binario, en las condiciones de entradas y salidas digitales, para lo cual se tiene que activar las siguientes señales, Figura 104.

- Señal #9 correspondiente a la activación de herramientas.
- Señal #1 correspondiente al cierre del gripper.



**Figura 104.** Control de cierre con amortiguación del gripper neumático

### 4.2.2. Posición del gripper en estado abierto

De igual manera esta transición se logra mediante un valor binario, en las condiciones de entradas y salidas digitales, para lo cual se tiene que activar las siguientes señales, Figura 105.

- Señal #9 correspondiente a la activación de herramientas.

- Señal #2 correspondiente a la apertura del gripper.

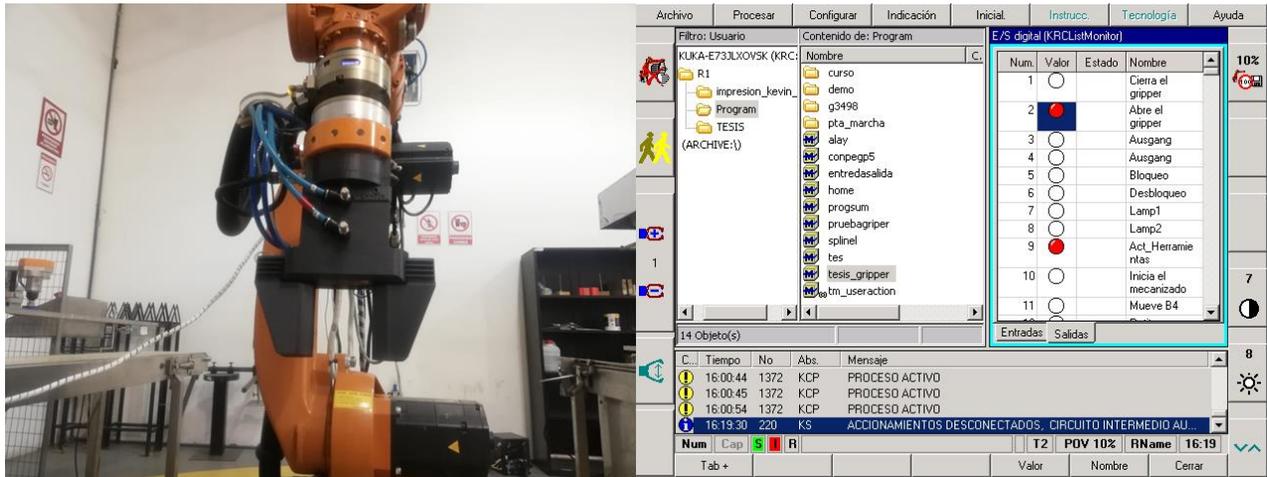


Figura 105. Control de apertura del gripper neumático

### 4.3 Pruebas en ambientes industriales de paletizado.

Con la elaboración del código de paletizado se pudo facilitar las órdenes hacia el robot industrial para la ejecución del proceso, Figura 106.

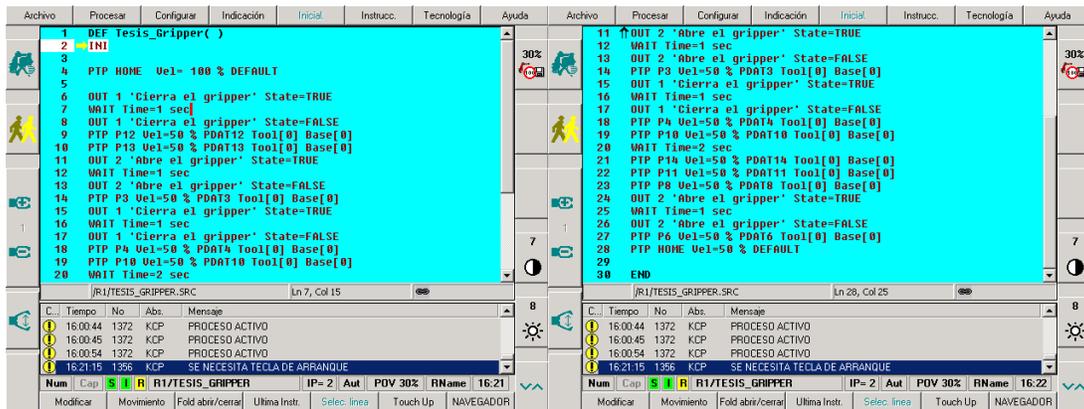


Figura 106. Aplicación de paletizado en robot KUKA

Al ejecutar las pruebas en el ambiente que se implementó, los objetos se colocaron sobre la superficie de una banda transportadora, la cantidad de doce objetos, ubicados a cierta distancia para que el manipulador pueda concluir con el proceso con cada cuerpo

de prueba, que de forma individual poseen dimensiones, material y peso diferentes, cuya manipulación y transporte de forma secuencial, simulando la llegada de piezas de forma alternada, benefició para comprobar que el gripper neumático diseñado se puede utilizar en ambientes industriales como paletizado, como se plantea que la herramienta diseñada se implementó en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L, las pruebas se llevaron a cabo en la celda de trabajo número tres.

**Tabla 31**  
*Pruebas del gripper en aplicaciones de paletizado*

# Prueba	Forma	Objeto posición inicial	Manipulación	Objeto posición final
<b>Plásticos</b>				
1	Circular			
2	Rectangular			

CONTINÚA 

3 Hexagonal



Madera

4 Rectángulo



5 Cuadrado



Aluminio

CONTINÚA 

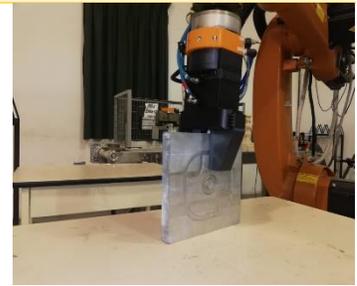
6

Circular



7

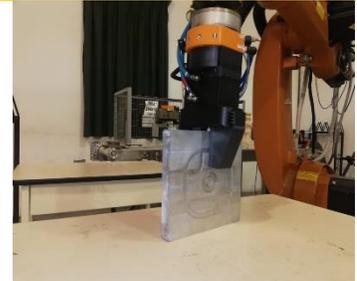
Circular



**Piedra**

8

Cuadrado



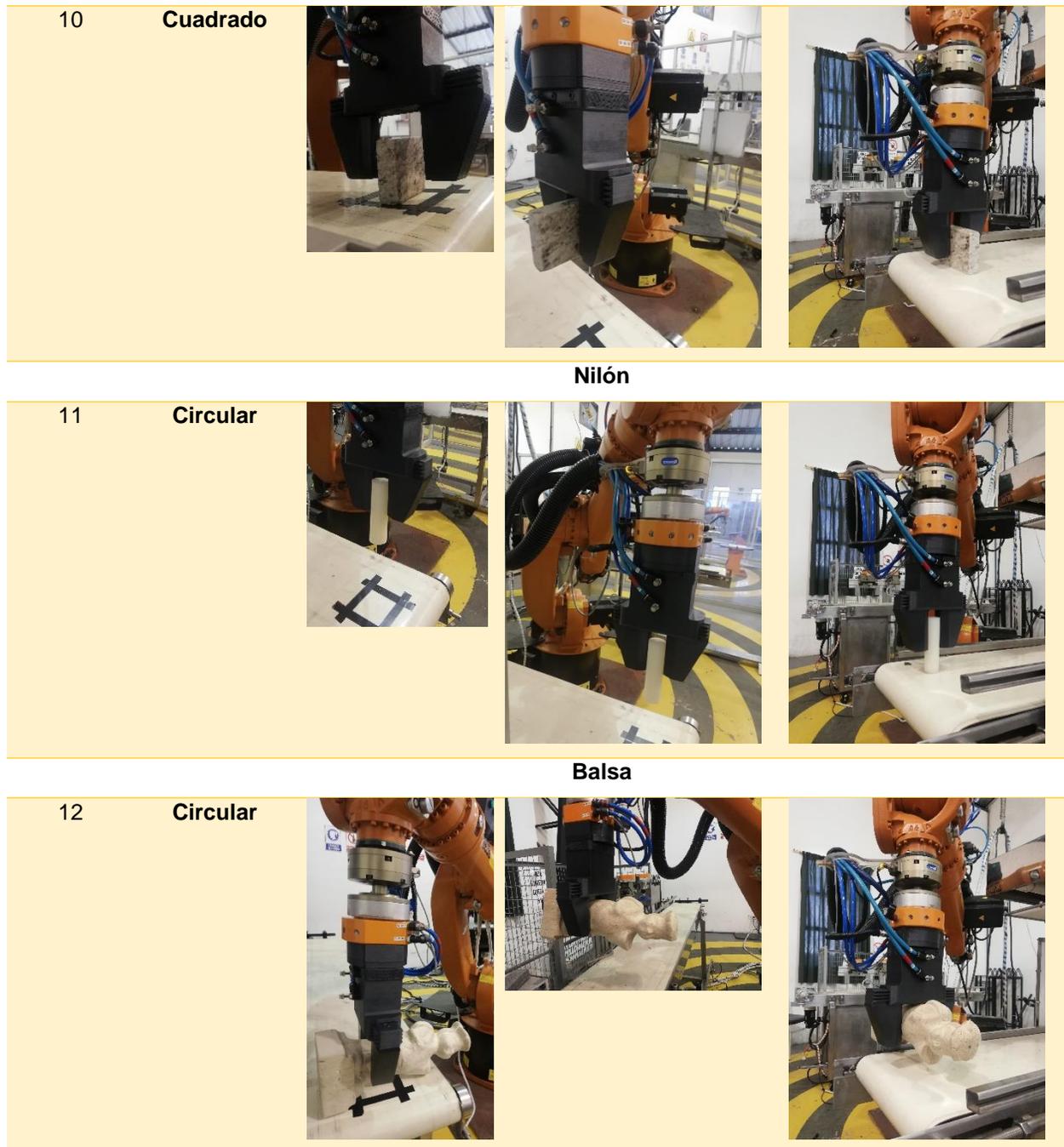
9

Rectángulo



**Cerámica**

CONTINÚA 



Como se observa en la Tabla 31, el gripper neumático cumple la función destinada, con la aplicación de ambientes industriales de agarre de objetos en paletizado, debido a que en todas las pruebas realizadas con objetos de prueba diferentes, el gripper manipula los objetos de una posición inicial a una final por medio del robot KUKA.

## 4.4 Validación de la hipótesis

### 4.4.1 Planteamiento de la Hipótesis

¿El gripper neumático industrial de dos garras para brazo robótico KUKA KR16 servirá para ambientes de aplicaciones industriales en paletizado?

- Variable independiente: Gripper neumático industrial de dos garras
- Variable dependiente: Aplicaciones industriales

### 4.4.2 Desarrollo de la hipótesis

Para realizar la hipótesis y cumplir con la misma se utiliza el método de Chi-cuadrado en función de las pruebas ejecutadas con el gripper neumático en ambientes industriales en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L, donde se realizó la programación del robot para sujetar objetos de distinto peso y material, de una banda transportadora y trasladar a otra dentro la celda robotizada donde se analizan los parámetros de precisión, aplicación y agarre. Se plantea tanto la hipótesis alternativa y la hipótesis nula.

- **H1 (hipótesis alternativa):** El gripper neumático industrial de dos garras para brazo robótico KUKA KR16 servirá para ambientes de aplicaciones industriales en paletizado.
- **H0 (hipótesis nula):** El gripper neumático industrial de dos garras para brazo robótico KUKA KR16 no servirá para ambientes de aplicaciones industriales en paletizado.

El dato del valor observado de método Chi-cuadrado ( $\chi^2$ ), se calcula con la siguiente ecuación:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Ecuación 53

Donde:

- $O_i$  = Frecuencia absoluta observada o empírica
- $E_i$  = Frecuencia esperada
- Nivel de confianza = 95%

En la Tabla 32 se observa las pruebas realizadas para los diferentes materiales, con distintos pesos y formas de los objetos de prueba, se registra la fuerza y la corriente al generar la amortiguación en la velocidad de carrera en el cierre de las garras para cada ensayo realizado.

**Tabla 32**  
*Pruebas de funcionamiento*

Nº	Material	Parámetros	Peso [Kg]	Fuerza de agarre [N]	Corriente [mA]	Eficaz	No eficaz	Nº Ensayos
1	Plástico	Precisión				10	0	10
		Agarre	0,150	40	200	10	0	10
		Paletizado				10	0	10
2	Aluminio	Precisión				10	0	10
		Agarre	2	55	300	10	0	10
		Paletizado				10	0	10
3	Hierro	Precisión				9	1	10
		Agarre	5	75	400	9	1	10
		Paletizado				5	5	10
TOTAL						83	7	90

El método menciona que el primer paso es calcular la frecuencia para los ensayos eficaces, mediante la siguiente ecuación:

$$E_i(\text{eficaz}) = \frac{\text{repeticiones} \times \# \text{ ensayos eficaces}}{\# \text{ ensayos totales}}$$

**Ecuación 54**

$$E_i(\text{funcional}) = \frac{10 \times 83}{90}$$

$$E_i(\text{funcional}) = 9,22$$

Enseguida se efectúa el cálculo de la frecuencia para los ensayos no eficaces:

$$E_i(\text{No eficaz}) = \frac{\text{Repeticiones} \times \# \text{ ensayos no eficaces}}{\# \text{ pruebas totales}}$$

**Ecuación 55**

$$E_i(\text{No funcional}) = \frac{10 \times 7}{90}$$

$$E_i(\text{No funcional}) = 0,78$$

Las dos frecuencias calculadas se colocan en la Tabla 33, con la finalidad de deducir las frecuencias esperadas a partir de las frecuencias observadas en las pruebas.

**Tabla 33**  
Cálculo de frecuencias esperadas

Material	Parámetros	O	E	O - E	(O - E) <sup>2</sup>	$\frac{(O - E)^2}{E}$
<b>Plástico eficaz</b>	Precisión	10	9,22	0,78	0,608	0,066
	Agarre	10	9,22	0,78	0,608	0,066
	Paletizado	10	9,22	0,78	0,608	0,066
<b>Aluminio eficaz</b>	Precisión	10	9,22	0,78	0,608	0,066
	Agarre	10	9,22	0,78	0,608	0,066
	Paletizado	10	9,22	0,78	0,608	0,066
<b>Hierro eficaz</b>	Precisión	9	9,22	-0,22	0,048	0,005
	Agarre	9	9,22	-0,22	0,048	0,005
	Paletizado	5	9,22	-4,22	17,808	1,931
<b>Plástico no eficaz</b>	Precisión	0	0,78	-0,78	0,608	0,779
	Agarre	0	0,78	-0,78	0,608	0,779
	Paletizado	0	0,78	-0,78	0,608	0,779

**CONTINÚA** 

<b>Aluminio no eficaz</b>	Precisión	0	0,78	-0,78	0,608	0,779
	Agarre	0	0,78	-0,78	0,608	0,779
	Paletizado	0	0,78	-0,78	0,608	0,779
<b>Hierro no eficaz</b>	Precisión	1	0,78	0,22	0,048	0,062
	Agarre	1	0,78	0,22	0,048	0,062
	Paletizado	5	0,78	4,22	17,808	22,83

Reemplazando en la Ecuación 53, se tiene:

$$\lambda_{calculado}^2 = 29,966$$

Se calcula los grados de libertad mediante la siguiente ecuación:

$$v = (\#de\ ensayos - 1)(\#de\ opciones - 1)$$

**Ecuación 56**

$$v = (9 - 1)(2 - 1)$$

$$v = 8$$

Para un nivel de confianza 95% y 8 grados de libertad se escoge el valor del  $\lambda_{tabulado}^2$  (ver tabla ANEXO E), de donde se obtiene un valor de:

$$\lambda_{tabulado}^2 = 15,507$$

Para comprobar el cumplimiento de la hipótesis alternativa, se comparan los valores:

$$\lambda_{calculado}^2 \geq \lambda_{tabulado}^2$$

$$28,966 \geq 15,507$$

#### 4.4.3 Análisis del desarrollo de la Hipótesis

Según el método de chi-cuadrado, el margen de error que se aprecia cuando el gripper neumático sujeta piezas de hierro, en las pruebas, posee un valor insignificante debido a

que no afecta en el desempeño para aplicaciones industriales como paletizado en el agarre de objetos, ya que debe sujetar un objeto y ser transportado de posición a otra por la trayectoria definida para el robot en la programación, de esta manera, el gripper si servirá en aplicaciones industriales.

En las demás pruebas, que se realizaron para sujetar objetos con material se cumple que el gripper realiza la aplicación de paletizado deseada con una gran efectividad ya que sujeta objetos con pesos elevados que se emplean en ambientes industriales. Los resultados finales de las pruebas se visualizan en la Tabla 34 donde se puede apreciar los datos con sus porcentajes.

**Tabla 34**  
*Resultados de pruebas*

Material	Parámetros	Nº Ensayos	Eficaz	No eficaz	%Eficaz	%No eficaz
Plástico	Precisión	10	10	0	33,33	0,0
	Agarre	10	10	0		
	Paletizado	10	10	0		
Aluminio	Precisión	10	10	0	33,33	0,0
	Agarre	10	10	0		
	Paletizado	10	10	0		
Hierro	Precisión	10	9	1	25,56	7,78
	Agarre	10	9	1		
	Paletizado	10	5	5		
<b>TOTAL</b>		90	83	7	92,22	7,78

#### 4.5 Alcances y limitaciones

Para determinar los alcances y limitaciones que tiene el gripper neumático se realiza el siguiente cuadro comparativo de acuerdo a los dos modos de operación del gripper como se observa en la Tabla 35.

**Tabla 35***Alcances y limitaciones en comparación de los dos modos de operación*

<b>Herramienta en modo cierre con amortiguación</b>	<b>Herramienta en modo cierre sin amortiguación</b>
Permite sujetar objetos con textura diferente sin que sufran algún daño	Permite sujetar objetos la mayoría de ellos duros para no sufran algún daño a diferencia de otro modo.
La velocidad de cierre disminuye por la activación de los fluidos MR	La velocidad de cierre se mantiene sin cambios a diferencia del otro modo, pero limita el agarre de objetos frágiles.
La gripper neumático requiere de las condiciones apropiadas del sistema para observar su atenuación en el estado de cierre	Si las condiciones de alimentación neumática del sistema el gripper neumático seguirán con su normal funcionamiento con respecto al control en el cierre y apertura.
El diseño del gripper para este modo necesita de una alimentación neumática respecto a presión de 4 [Bar] para observar el efecto de amortiguación.	El diseño del gripper para este modo necesita de una alimentación neumática respecto a presión mínima de 3 [Bar] para observar el cierre y apertura del gripper.
Para monitorear las variables del gripper respecto a los sensores incluso el efecto de la señal que activa el campo magnético, se necesita la ayuda de un teléfono inteligente con sistema operativo ADROID, y descargar la aplicación por medio del enlace.	Para monitorear las variables del gripper respecto a los sensores se necesita la ayuda de un teléfono inteligente, y descargar la aplicación por medio del enlace.
En este modo permite la sujeción de objetos frágiles debido a que por la atenuación tiende a no sujetas objetos pesados	En este modo permite tomar objetos pesados con gran presión.
Se precisa de colocar el objeto a sujetar por lo menos en 2/3 de la superficie de contacto de la garra para la activación del sensor de fuerza	De manera similar en este modo se precisa de colocar el objeto a sujetar por lo menos en 2/3 de la superficie de contacto de la garra para la activación del sensor de fuerza
El alcance del módulo bluetooth se limita a una distancia de 5-10m para establecer conexión entre el control electrónico del gripper y el teléfono celular	De manera similar en este modo el alcance del módulo bluetooth se limita a una distancia de 5-10m para establecer conexión entre el control electrónico del gripper y el teléfono celular

#### 4.5.1 Análisis económico del proyecto

Al finalizar el diseño y construcción del gripper neumático con velocidad de carrera, se procede con el análisis de los gastos generados para el desarrollo mecánico, electrónico y de control del proyecto como se observa en la Tabla 36.

**Tabla 36**  
*Gastos del proyecto*

<b>SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL</b>			
<b>CANTIDAD</b>	<b>DETALLE</b>	<b>VALOR UNITARIO \$</b>	<b>VALOR TOTAL \$</b>
1	Sensor FSR 400	10	10
2	Sensor Reedswitch	10	20
1	Driver TB6612FNG	9	9
1	Contactor industrial	10	10
1	Sensor de corriente	15	15
1	Módulo Bluetooth HC-06	8	8
2	LED's	2	4
1	Fusible	1	1
1	Arduino NANO	10	10
8	Bornera Conector DC De Corriente	0,5	4
1	Fabricación de placa de control	20	20
1	Baquelita de 18*20	5	5
5	Bornera 26 pines	0,70	3,5
3	Resistencias	0,25	0,75
3	Diodos de silicio	0,25	0,75
1	Fuente de alimentación	20	20
30	Cable multihilos calibre 22	1 cada m	30
20	Alambre para conductor eléctrico	0,70 m	14
4	Conectores 9 pines	4	16
<b>SUBTOTAL 1</b>			<b>171</b>
<b>SISTEMA MECÁNICO</b>			
<b>CANTIDAD</b>	<b>DETALLE</b>	<b>VALOR UNITARIO \$</b>	<b>VALOR TOTAL \$</b>
2	Racords 1/8	3	6

**CONTINÚA** 

3	Manguera para aire comprimido	5 cada m	15
1	Construcción de caja para fuente	50	50
2	Recubrimiento de material compuesto	40	80
2	Resortes	3,5	7
1	Fibra de carbono	50	50
3	ABS rollo	35	105
1	Impresiones 3D de piezas (total)	300	300
1	Cilindro neumático	60	60
1	Juego de amortiguadores Hobbypark	80	80
1	Fluido MR LORD 200 ml	200	200
<b>SUBTOTAL 2</b>			<b>1064</b>
<b>DETALLE</b>			<b>Valor Total \$</b>
Herramientas			100
Mecanizado de amortiguadores			50
<b>TOTAL</b>			<b>1214</b>

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó el gripper neumático industrial de dos garras, para lo cual se empleó diferentes técnicas según la orientación de las fibras en el modelado por deposición fundida, se seleccionó el material ABS para la impresión 3D, las propiedades mecánicas de este material permiten usar esta herramienta para aplicaciones en ambientes industriales específicamente en paletizado.
- En base a la correcta selección del material utilizado para impresión 3D, se realizó pruebas de resistencia mecánica, como se establece en la norma ASTM D695-15 para ensayos de compresión en termoplásticos, se diseñó las probetas para cada prueba con diferente técnica de modelado por deposición fundida, se obtuvo como resultado que los métodos más óptimos para impresión 3D son: 0°, 90° y de panal de abeja que se utilizan en la fabricación de cada pieza de la estructura del gripper neumático, para disminuir el peso en general de la herramienta.
- El control del gripper neumático permitió que el fluido magnetoreológico comercial de serie RD-8040-1 de la empresa LORD, que se encuentra dentro del amortiguador MR, cambie sus propiedades en presencia de campo magnético lo que permite atenuar la velocidad de carrera en el cierre del gripper, en una relación de uno a tres, las misma que se obtiene en base a las pruebas realizadas.
- La cinta rugosa que se colocó en la superficie de contacto de las garras con el objeto, aumenta el coeficiente de fricción, lo cual permitió el agarre de cuerpos

sometidos a ensayos que tienen diferentes texturas, hasta una carga máxima de 5kg, resultado que se obtuvo al realizar la aplicación en ambientes de paletizado, por medio de la programación del robot para que traslade un objeto de un lugar a otro a través del accionamiento del gripper.

- Se realizó el recubrimiento de piezas, de acuerdo a la selección del material compuesto con fibra de carbono en los componentes del gripper neumático, para obtener un mejor acabado superficial y evitar que las áreas de contacto tengan un alto desgaste por rozamiento.
- La visualización de datos en tiempo real de las variables que intervienen en el sistema como son: el estado del gripper, la fuerza y la corriente, se presentan en el monitor serial de software Arduino IDE, esta información se transmite mediante la comunicación wireless entre la tarjeta de control, el módulo de conexión inalámbrica bluetooth HC-06 y el computador.
- La herramienta industrial que se diseñó bajo los parámetros establecidos, posee los siguientes datos técnicos: las dimensiones de la herramienta (0.2 m x 0.23 m x 0.06 m), peso (1,30 Kg), Presión de trabajo (6 Bar), Capacidad de carga máxima (5 Kg) y Voltaje de alimentación (5 [V]).
- Al utilizar un material de impresión 3D, se redujo el peso total de la herramienta, en un 60% en relación con el gripper comercial de carrera corta que existe en el laboratorio de robótica industrial de la institución.
- Se colocó un aceite lubricante para máquinas, en todas las áreas de contacto presentes en los elementos internos de la estructura mecánica del gripper neumático, para mejorar el funcionamiento de la herramienta y disminuir la pérdida de energía por contacto con elementos móviles entre componentes.

## 5.2 Recomendaciones

- Para el desarrollo de futuros proyectos se puede recomendar el uso del ABS como material para impresión 3d, sin embargo, se requiere de impresoras que tengan un óptimo entorno de trabajo para la regulación de temperatura.
- Se recomienda hacer uso de las técnicas de modelado por deposición fundida de 0° y 90° y la técnica del panel de abaja que de acuerdo a los ensayos realizados de las propiedades mecánicas del material son las más apropiadas para la fabricación de la estructura de cualquier herramienta que se vaya a diseñar.
- Para trabajos futuros se recomienda analizar las características del fluido a ser utilizado, considerando de gran importancia el grado de sedimentación por parte de las partículas ferromagnéticas del fluido.
- Se aconseja utilizar cinta antideslizante en las dos caras planas de las garras del gripper neumático industrial para lograr una mejor sujeción de objetos a ser transportados.
- Es recomendable visualizar los datos de las variables que interviene en el control del gripper neumático como son la corriente, presión y estado del gripper en la manipulación de distintos objetos en un monitor donde se aprecie esta información en tiempo real.
- Es necesario tener en cuenta las características técnicas de la herramienta diseñada para el correcto uso y normal funcionamiento.
- Se recomienda realizar un mantenimiento en la lubricación de los elementos móviles periódicamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ROBOTEC. (2016). *Herramientas para brazo robótico industrial* . Obtenido de [https://www.robotec.cl/accesorios\\_grippers.php](https://www.robotec.cl/accesorios_grippers.php) . Recuperado 2 de Octubre 2018
- OMEGA. (2018). *OMEGA SPECERIS COMPANY*. Obtenido de <https://mx.omega.com/prodinfo/pinzas-grippers.html>. Recuperado 3 de Octubre 2018
- SCHUNK. (2018). *SCHUNK*. Obtenido de SCHUNK: [https://schunk.com/es\\_es/sistemas-de-agarre/series/pzn-plus/](https://schunk.com/es_es/sistemas-de-agarre/series/pzn-plus/). Recuperado 29 de Octubre de 2018
- Eitel, E. (2010). *Machine Design*. Obtenido de <https://www.machinedesign.com/robotics/history-gripping-and-gripper-technologies-and-available-options-todays-engineer>. Recuperado 01 de Diciembre de 2019
- Mezquida, C., & Jorge, L. (2011). INTRODUCCIÓN A LOS FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS CON APLICACIONES EN INGENIERÍA. *Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.*, 1.
- Derek, H. (2003). *Introducción a los Materiales Compuestos*. Barcelona-España: Reverté S. A.
- Iraza, I., & Falkner, A. (2003). *Amortiguaciones por fluidos Magnetereológicos*. Cupich Miguel.
- García, J., & Rodrigues, C. (2012). *Diseño de prótesis transtibial amortiguada*. México D. F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Schunk. (2018). *Gripper Parelelo PNG 125*. Obtenido de Schunk : [www.schunk.com](http://www.schunk.com). Recuperado el 17 de Diciembre de 2018
- ORAMAS, M. V. (2014). *Modelación y analisis de la cinemática directa e inversa del manipulador stanford de seis grados de libertad* . Quito.
- RONSPRINGERO. (2013). *Desarrollo de brazo robótico para multiples aplicaciones*. México: Feria de las Ciencias UNAM.
- KUKA Roboter. (2010). *Operating and Programming Instructions for System Integrators*. Germany: Copyright.
- HIGUERA, A. G. (2007). *EL COMPUTADOR DE LA AUTOMATIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN*. CUENCA: UNIVERSIDAD DE CASTILLA - LA MANCHA.
- Yang, G., Spencer, B., Carslon, J., & Sain, M. (2002). *Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations*. Notre Dame: Fitzpatrick Hall.
- Cifuentes, M., & Izurieta, A. (2000). *Medición de la Efectividad del Manejo de Areas Protegidas*. Turrialba: WWF.
- SCHUNK GmbH. (2019). *SCHUNK GmbH & Co. KG*. Obtenido de SCHUNK GmbH & Co. KG: [https://schunk.com/es\\_es/sistemas-de-agarre/product/47964-0318571-pgn-plus-p-125-2-as/](https://schunk.com/es_es/sistemas-de-agarre/product/47964-0318571-pgn-plus-p-125-2-as/). Recuperado el 07 de Febrero de 2019.

- Robotiq. (2019). *Robotiq*. Obtenido de Robotiq: <https://robotiq.com/products/hand-e-adaptive-robot-gripper>. Recuperado 18 de Enero de 2019
- Riveros, J. (2013). *Gripper diseño y planteamiento*.
- Formizable. (2019). *Formizable*. Obtenido de [https://formizable.com/super-guia-de-materiales-de-impresion-3d-2019/?fbclid=IwAR04dzzk4oFNOPz7lowU2GUm4VNfXpYTXmch\\_he05hrUDXvs7TWkdoC9puo](https://formizable.com/super-guia-de-materiales-de-impresion-3d-2019/?fbclid=IwAR04dzzk4oFNOPz7lowU2GUm4VNfXpYTXmch_he05hrUDXvs7TWkdoC9puo). Recuperado el 1 de Febrero de 2019
- Navalcomposites. (2016). *Materiales compuestos*. Obtenido de <https://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos/>. Recuperado el 1 de Febrero de 2019
- Solé, A. C. (2007). *Neumática e Hidráulica*. España: Marcombo S.A.
- Parker Hannfin Corporation. (2019). *Parker*. Obtenido de [www.parker.com/pneumatics](http://www.parker.com/pneumatics)
- Parker Hannfin Corporation. (2019). *Parker*. Obtenido de <https://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.f158acfa3e600a59e967be29237ad1ca/?selectCategory=all&vgnnextfmt=EN&vgnnextoid=4b245bca1007e210VgnVCM10000032a71dacRCD&divisionChannel=Pneumatic%20Division&divisionChannelDesc=687577&divisionChannelId=03b69>. Recuperado el 2 de Marzo de 2019
- BeagleBoard. (2019). *Tarjeta BeagleBoard*. Obtenido de <https://beagleboard.org/pocket>. Recuperado el 21 de Febrero de 2019
- Raspberrypi. (2019). *Raspberry Pi*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero/>. Recuperado el 6 de Febrero de 2019
- Sparkfun Electronics. (2019). *Sparkfun start something*. Obtenido de <https://www.sparkfun.com/products/14451>. Recuperado el 20 de Febrero de 2019
- Iberobotics. (2019). *Iberobotics*. Obtenido de <https://www.iberobotics.com/producto/modulo-driver-motores-l298n-doble-puente-h/>. Recuperado 24 de Febrero de 2019
- Brico Geek. (2019). *Brico Geek*. Obtenido de [https://tienda.bricogeek.com/sensores/403-sensor-de-fuerza-resistivo-circular.html?vt\\_product=403&from=UpSell&utm\\_campaign=Upsell%252520recommendation%252520for%252520prod&vt\\_campaign=1003027&utm\\_content=tpl&utm\\_source=merchandising&utm\\_medium=email&vt\\_co](https://tienda.bricogeek.com/sensores/403-sensor-de-fuerza-resistivo-circular.html?vt_product=403&from=UpSell&utm_campaign=Upsell%252520recommendation%252520for%252520prod&vt_campaign=1003027&utm_content=tpl&utm_source=merchandising&utm_medium=email&vt_co). Recuperado de 27 de Febrero de 2019
- Electronilab. (2019). *Electronilab*. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/modulo-bluetooth-hc-06-serial-rs232ttl/>. Recuperado 27 de Febrero de 2019
- Escoraza, J., & Medina, I. (2017). *DESARROLLO DE INGENIERÍA DE DETALLE SOBRE LA INCLUSIÓN DE MATERIALES MAGNETOREOLÓGICOS CON CARACTERÍSTICAS DOMINANTES EN EL CAMPO DE LA AMORTIGUACIÓN Y SU VIABILIDAD TÉCNICA EN UN PROTOTIPO MECATRÓNICO DE PRÓTESIS DE TOBILLO Y PIE CON CONTROL DE TORQUE*. Latacunga-Ecuador.

- KUKA. (2019). *KUKA*. Obtenido de [https://www.kuka.com/es-es/servicios/descargas?terms=Language:en:1;Language:es:1;Category:DataSheets;product\\_name:KR%2016%20CR;&q=](https://www.kuka.com/es-es/servicios/descargas?terms=Language:en:1;Language:es:1;Category:DataSheets;product_name:KR%2016%20CR;&q=). Recuperado 18 de Abril de 2019
- Hobby Park. (20 de Abril de 2019). *Amazon*. Obtenido de <https://www.amazon.com/Hobbypark-Aluminum-Absorber-Springs-Assembled/dp/B071ZC8JGP>
- EBAY. (20 de Abril de 2019). Obtenido de <https://www.ebay.es/itm/Mini-Songle-Relay-12V-10A-250V-SPDT-5-Pins-PCB-SRD-12VDC-SL-C-/112061793022>. Recuperado 20 de Abril de 2019
- Chang, A. H. (2014). *Diseño y simulación de un robot articular con 6 grados de libertad utilizando el toolbox robotic de matlab para fortalecer las clases teóricas realizando prácticas de laboratorio con el software presentado en este proyecto*. Quito-Ecuador: Escuela pilitécnica nacional .
- RONCAL, J. J. (2015). *DISEÑO MECÁNICO DE UN GRIPPER PARA BRAZO ROBOT PARA EL PALETIZADO DE CAJAS DE 20KG Y PALLETS DE 25KG*. LIMA-PERÚ: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- Lasluisa, H. (2017). *Investigación de prototipado rápido de piezas con orientación de fibras según su perfil mediante el roboto kuka kr-16 de la ESPE-EL*. Sangolquí-Ecuador: ESPE.
- VUKASOVIĆ , T. (2018). *CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE TERMOPLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D*. SANTIAGO-CHILE: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México D.F- México: Pearson education Volumen 4.
- Landín, P. (2013). *PELANDINTECNO-TECNOLOGÍA ESO*. Obtenido de <http://pelandintecno.blogspot.com/2013/06/maquina-simple-la-cuna.html>. Recuperado 02 de Junio de 2019
- Electronilab. (2019). *Electronilab*. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/modulo-sensor-de-corriente-acs712-30/>. Recuperado 1 de Marzo de 2019
- Zimmer Group. (2019). *Zimmer Group*. Recuperado el 23 de Junio de 2019, de Zimmer Group: <http://www.zimmer-group.de/us/structure/%24mg5-15505354/series+gpp5000>. Recuperado 06 de Febrero de 2019
- Carbosystem. (2019). *CarboSystem*. Recuperado el 12 de 05 de 2019, de <http://carbosystem.com/fibra-de-carbono-2/>. Recuperado 20 de Enero de 2019
- Chanto Air Hydraulics Co., Ltd. (2019). *Chanto*. Recuperado el 12 de Febrero de 2019, de [https://www.chanto.com.tw/pro\\_view.php?lang=0&msn=3&ssn=34&page=0&psn=231](https://www.chanto.com.tw/pro_view.php?lang=0&msn=3&ssn=34&page=0&psn=231). Recuperado el 20 de febrero de 2019
- Arduino. (19 de Febrero de 2019). *Arduino Org*. Obtenido de <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. Recuperado el 20 de febrero de 2019

# ANEXOS



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **JUMBO AUQUILLA, DIEGO ALEJANDRO** y **VALENCIA SALINAS, JUAN CARLOS**

En la ciudad de Latacunga, a los 18 días del mes de julio del 2019.

**Aprobado por:**

Ing. Marco Singaña A.

**DIRECTOR DEL PROYECTO**



Ing. Darío Mendoza Chirantasi

**DIRECTOR DE CARRERA**



Dr. Rodrigo Vaca Corrales

**SECRETARIO ACADÉMICO**