



**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 EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
MECATRÓNICO PARA PERFORACIÓN E INSERCIÓN DE  
FILAMENTOS FLEXIBLES DENTRO DE DISTINTAS MATRICES  
EMPLEANDO VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL RECONOCIMIENTO  
Y DETECCIÓN DE ÁREAS DE INTERÉS, INNOVANDO EN LA  
PRODUCCIÓN DE LA MICROEMPRESA CEPIBRILLO-  
ECUADOR”.**

**AUTORES:**

**EDWIN FERNANDO BANDA IZA**

**RICHARD PAÚL TOASA ABATA**

**DIRECTOR: ING. DARÍO MENDOZA**

**LATACUNGA**

**2018**



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA PERFORACIÓN E INSERCIÓN DE FILAMENTOS FLEXIBLES DENTRO DE DISTINTAS MATRICES EMPLEANDO VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE ÁREAS DE INTERÉS, INNOVANDO EN LA PRODUCCIÓN DE LA MICROEMPRESA CEPIBRILLO-ECUADOR**”, realizado por los señores Edwin Fernando Banda Iza y Richard Paúl Toasa Abata, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales, establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **EDWIN FERNANDO BANDA IZA Y RICHARD PAÚL TOASA ABATA** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 31 de enero del 2018

Atentamente,

---

**ING. DARÍO MENDOZA**  
**DIRECTOR**



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **EDWIN FERNANDO BANDA IZA**, con cédula de identidad N°0502984198 y **RICHARD PAÚL TOASA ABATA**, con cédula de identidad N°0503785412, declaramos que este trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA PERFORACIÓN E INSERCIÓN DE FILAMENTOS FLEXIBLES DENTRO DE DISTINTAS MATRICES EMPLEANDO VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE ÁREAS DE INTERÉS, INNOVANDO EN LA PRODUCCIÓN DE LA MICROEMPRESA CEPIBRILLO-ECUADOR**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 31 de enero del 2018

---

**EDWIN FERNANDO BANDA IZA**

C.C.: 0502984198.

---

**RICHARD PAÚL TOASA ABATA**

C.C.: 0503785412.



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### AUTORIZACIÓN

Nosotros, **EDWIN FERNANDO BANDA IZA** y **RICHARD PAÚL TOASA ABATA**, autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS ESPE, publicar en el repositorio institucional el presente trabajo de titulación “**Diseño e implementación de un sistema mecatrónico para perforación e inserción de filamentos flexibles dentro de distintas matrices empleando visión artificial para el reconocimiento y detección de áreas de interés, innovando en la producción de la microempresa CEPIBRILLO-ECUADOR**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva autoría y responsabilidad.

Latacunga, 31 de enero del 2018



---

**EDWIN FERNANDO BANDA IZA**  
C.C.: 0502984198.



---

**RICHARD PAÚL TOASA ABATA**  
C.C.: 0503785412

## DEDICATORIA

*Dedico este proyecto a Dios por darme la sabiduría e inteligencia, por no dejarme desmayar en los momentos difíciles y permitirme llegar a esta instancia en mi formación profesional, llena de satisfacción por culminar una etapa más de mi vida.*

*Este proyecto se lo dedico en memoria de mi Abuelita, a pesar de que no esté ya con nosotros, Ella siempre vivirá en mi corazón y mente. Su sabiduría y enseñanza, me enseñaron que los sueños que algún día fueron de un niño, se lo pueden lograr con esfuerzo y dedicación constante a pesar de las adversidades de la vida. Gracias mamita por haber existido.*

*Dedico este proyecto en memoria de mi Padre quien en una pequeña parte de mi vida me supo demostrar que las cosas que uno se plantea se las debe realizar a cabalidad, siempre y cuando estas sean alcanzables. El siempre estará en mis pensamientos y mi corazón, Gracias Papaíto.*

*Un agradecimiento infinito a mi Madre y Abuelita que fueron padre y madre a la vez, e hicieron posible mi educación. Sin ustedes nada de esto sería posible, son un ejemplo de vida. A mi Madre por ser mi heroína, por demostrarme que la constancia, perseverancia y dedicación, son factores fundamentales para llegar a una meta, y*

*me ha demostrado que los pequeños esfuerzos que le pongas a la vida te recompensan.*

*Un agradecimiento a mi Hermana y Hermano por estar conmigo en la buenas y malas, por esos consejos y compañía, me inspiraron a seguir adelante, a pesar los duros inconvenientes que se presentaban en el camino y el esfuerzo continuo que se le debía poner para culminar con éxito esta etapa de mi vida profesional. Gracias Hermanitos.*

*Al dar un gran paso en la vida, se debe ser grato con todos y cada una de las personas que te dieron esa mano amiga sin pedir nada a cambio, igualmente agradezco aquellas personas que me brindaban razones y motivos para seguir adelante, y llegar a un objetivo trazado y ser una mejor persona.*

**Edwin Banda**

## DEDICATORIA

*Antes de todo, quiero agradecer a Dios y a la Virgencita de las Mercedes, por la oportunidad que me dan de vivir día a día, la fortaleza que me han brindado en cada uno de los momentos más difíciles de toda mi formación personal y profesional, y en este punto de mi vida, por la bendición y la oportunidad de vivir.*

*Este proyecto se lo dedico de manera muy especial a mis padres Carlos y Blanca, porque sé y comprendo el gran esfuerzo y sacrificio que han hecho por darme una buena educación, por enseñarme a enfrentar la vida, con todos sus altos y bajos y por motivarme a siempre culminar lo que se inicia, muchos de mis logros se los debo a ustedes. Vivo orgulloso por su ejemplo, de fortaleza, comprensión y amor familiar. Sin ustedes, esto no hubiera sido posible, Dios me los bendiga siempre.*

*De la misma manera, agradezco infinitamente a mis abuelitos, por su cariño, su comprensión y su ayuda desmedida, por todos sus buenos consejos y por ser mis guías y mis segundos Padres de toda la vida.*

*A mi hermano Carlitos, mis tíos y tías, familiares, amigos, a todos y cada uno de Uds., por permitirme aprender más de la vida a su lado, gracias por todo.*

**Richard Toasa**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecemos de forma incondicional a Dios, por prestarnos la vida, la fortaleza y la paciencia para desarrollar nuestro proyecto de titulación.*

*Una especial gratitud a nuestros Padres, por ser ese ejemplo de constancia, perseverancia y apoyo incondicional, por creer en nosotros y respaldarnos en cada decisión que hemos tomado en nuestra vida personal y por todas esas palabras de aliento que nos impulsaron a culminar de forma exitosa nuestro trabajo de titulación.*

*A los familiares y amigos que estuvieron y están con nosotros, gracias por ser parte de este momento especial, que nos llena de alegría y satisfacción personal.*

*A la universidad y sus docentes, quienes nos impartieron sus conocimientos, su paciencia y la guía para formarnos como profesionales.*

*Le agradecemos de manera especial a la Empresa “LA HOGAREÑITA” por abrirnos las puertas de su empresa, al recibirnos y brindarnos la oportunidad de conocer los procesos de este tipo de maquinaria y ser guías en el desarrollo culminante del proyecto.*

**Gracias de todo corazón**

**Edwin y Richard**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xviii
RESUMEN .....	xxiv
ABSTRACT .....	xxvi
PRESENTACIÓN .....	xxvii

## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

1.1	Generalidades .....	1
1.2	Definición del problema .....	1
1.3	Objetivo General .....	2
1.4	Alcance .....	3
1.5	Estado del Arte .....	3
1.5.1	Fabricación de brochas, escobas y cepillos .....	3
1.6	Subsistemas de la Máquina perforadora insertadora .....	5
1.6.1	Sistemas de alimentación .....	5
a.	Alimentador de cerdas flexibles .....	7
b.	Alimentador de alambre .....	7

1.6.2	Sistema de visión artificial.....	8
a.	Sistema de iluminación .....	9
1.6.3	Sistema de Perforación.....	11
a.	Máquinas herramientas de perforación.....	11
b.	Tipos de Taladros.....	11
1.6.4	Sistema de inserción.....	12
a.	Tipos de máquinas Insertadoras .....	13
1.6.5	Sistema de control .....	14
a.	Sistema de control a lazo abierto .....	14
1.7	Neumática.....	15
1.7.1	Componentes de un circuito Neumático .....	15
a.	Compresor Neumáticos.....	16
b.	Válvulas neumáticas .....	16
c.	Cilindros neumáticos .....	16
1.7.2	Ventajas y Desventajas de la Neumática.....	16
a.	Ventajas de la Neumática .....	17
b.	Desventajas de la Neumática.....	17

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

2.1	Requisitos funcionales .....	18
2.2	Requisitos de diseño.....	18
2.3	Subsistemas .....	19
2.3.1	Subsistema A: Software para el sistema de visión .....	20
a.	Alternativas de diseño del Subsistema A .....	20

b.	Criterios y Selección del Subsistema A.....	24
2.3.2	Subsistema B: Procesador para el sistema de visión artificial .....	24
a.	Alternativas de diseño del Subsistema B .....	25
b.	Comparación de alternativas del Subsistema B.....	27
c.	Selección de Alternativas del Subsistema B .....	28
2.3.3	Subsistema C: Estructura .....	29
a.	Alternativas de diseño del Subsistema C .....	29
b.	Criterios y Selección del Subsistema C.....	33
2.3.4	Subsistema D: Mecanismos de transmisión de movimientos .....	33
a.	Alternativas de diseño del Subsistema D .....	34
b.	Criterios y Selección del Subsistema D.....	40
2.3.5	Subsistema E: Sistema de guiado .....	41
a.	Alternativas de diseño del Subsistema E .....	42
b.	Criterio y Selección del subsistema E .....	44
2.3.6	Subsistema F: Matriz de inserción para corte y embutido.....	45
a.	Aceros para trabajo en frío.....	45
2.3.7	Subsistema G: Sistema de alimentación de cerdas flexibles .....	48
a.	Alternativas de diseño del Subsistema G .....	48
b.	Criterios y Selección del Subsistema G .....	49
2.3.8	Subsistema H: Tarjeta de control.....	50
a.	Alternativas de diseño del Subsistema H.....	51
b.	Criterios y Selección del Subsistema H.....	53
2.4	Actuadores.....	54
2.4.1	Alternativas de selección de Actuadores eléctricos .....	54
a.	Alternativa 1: Servomotores DC .....	54

b.	Alternativa 2: Motores paso a paso (PAP) .....	55
c.	Selección de alternativa para motores .....	56
2.5	Sensores de proximidad .....	57
2.5.1	Alternativas de selección de sensores de proximidad .....	57
a.	Alternativa 1: Sensores inductivos .....	57
b.	Alternativa 2: Sensores capacitivos.....	58
c.	Alternativa 3: Sensores electromecánicos .....	58
d.	Selección de alternativas de sensores de proximidad.....	59

### **CAPÍTULO III**

#### **DISEÑO MECATRÓNICO DE LA MÁQUINA**

3.1	Diseño mecánico de la estructura .....	60
3.1.1	Selección de materiales .....	61
3.1.2	Diseño y análisis de la estructura .....	65
3.1.3	Diseño del eje transversal Y .....	67
a.	Prueba de diseño de los ejes de la mesa superior.....	72
3.1.4	Diseño del eje Longitudinal X.....	79
a.	Prueba de diseño de los ejes de la mesa inferior.....	82
3.1.5	Diseño del brazo de soporte para el proceso de perforación.....	88
a.	Primer miembro del soporte .....	90
b.	Segundo miembro del soporte .....	92
c.	Pruebas de diseño del brazo de soporte.....	96
3.1.6	Diseño del brazo de soporte para el proceso de inserción .....	98
a.	Brazo de soporte superior (B1) .....	99
b.	Brazo de soporte inferior (B2) .....	102

c.	Pruebas de diseño del brazo de soporte .....	104
3.1.7	Diseño del alimentador de cerdas flexibles .....	107
3.1.8	Diseño de la mesa base.....	108
a.	Prueba de diseño de la mesa base .....	112
3.2	Selección de motores.....	114
3.2.1	Sistema de movimiento eje Y.....	115
3.2.2	Sistema de movimiento eje X.....	118
3.2.3	Sistema de movimiento del eje Z proceso de perforación.....	119
3.3	Diseño eléctrico/electrónico .....	122
3.3.1	Diagrama de Conexión eléctrica de motores paso a paso.....	122
3.3.2	Diagrama de conexión de finales de carrera.....	125
3.4	Diagrama del circuito electroneumático .....	126
3.4.1	Diagramas de conexión .....	129
3.5	Sistema de control .....	132
3.5.1	Diseño CAD de la máquina.....	134

## **CAPÍTULO IV**

### **CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

4.1	Construcción e implementación de estructuras .....	135
4.1.1	Construcción de la mesa base.....	136
4.1.2	Implementación y montaje de los sistemas de movimiento X e Y...	137
4.1.3	Construcción e implementación del sistema visión .....	140
4.1.4	Construcción e implementación de los brazos de soporte .....	142
a.	Proceso de perforación .....	142
b.	Proceso de inserción.....	144

4.1.5	Construcción e implementación de alimentadores.....	148
a.	Alimentador de cerdas flexibles .....	148
b.	Alimentador de alambre .....	150
4.2	Implementación del sistema de control.....	151
4.2.1	Implementación del tablero de control .....	156
4.3	Montaje final de la máquina .....	157
4.4	Pruebas de funcionamiento .....	158
4.4.1	Pruebas del sistema de visión artificial .....	158
4.4.2	Pruebas del sistema de perforación.....	160
4.4.3	Pruebas del sistema de inserción .....	161
a.	Prueba del alimentador de cerdas .....	162
b.	Prueba del alimentador de alambre .....	163
c.	Proceso de inserción completo .....	164
4.5	Manual de operación.....	166
4.6	Análisis económico del proyecto .....	166
4.7	Validación de hipótesis .....	170
4.7.1	Hipótesis .....	170
4.7.2	Variables de la investigación.....	170
4.7.3	Comprobación de Hipótesis .....	170
4.7.4	Comprobación de Hipótesis empleando Chi-Cuadrado .....	172
4.7.5	Prueba de calidad .....	177

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones .....	183
-----	--------------------	-----

5.2	Recomendaciones .....	186
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>188</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>194</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipo de alimentadores.....	6
Tabla 2 Técnicas de iluminación.....	10
Tabla 3 Tipos de Taladros .....	12
Tabla 4 Tipos de máquinas insertadoras .....	13
Tabla 5 Escala de calificación, ponderación y su interpretación .....	20
Tabla 6 Selección de alternativas del Subsistema B .....	24
Tabla 7 Comparación de alternativas del Subsistema C .....	27
Tabla 8 Selección de Alternativas del Subsistema C.....	28
Tabla 9 Criterios de selección del subsistema D .....	33
Tabla 10 Selección y alternativas del Subsistema D .....	40
Tabla 11 Características del sistema de guiado por eje .....	42
Tabla 12 Características del sistema de guiado lineal .....	43
Tabla 13 Selección de alternativas del Sistema de Guiado .....	44
Tabla 14 Aplicaciones para el acero DF-2=ARNE .....	46
Tabla 15 Aplicaciones para el acero XW-41 = SVERVER 21 = AISI D2.....	47
Tabla 16 Selección de alternativas del sistema de alimentación .....	50
Tabla 17 Selección de alternativas de la tarjeta de control.....	53
Tabla 18 Criterios de selección de los motores .....	56
Tabla 19 Materiales tentativos .....	63
Tabla 20 Material seleccionado para la construcción de los componentes .....	65
Tabla 21 Factor de diseño para materiales dúctiles.....	66
Tabla 22 Fórmulas para el esfuerzo de diseño .....	77
Tabla 23 Factor de fijación para tipos de sujeción de columnas.....	93
Tabla 24 Justificación de esfuerzos y cargas permisibles .....	105
Tabla 25 Coeficientes de roce estático .....	115
Tabla 26 Datos técnicos de los motores NEMA.....	117
Tabla 27 Actuadores neumáticos en el proceso de inserción .....	127
Tabla 28 Componentes del circuito electroneumático .....	128
Tabla 29 División estructural de la máquina .....	135

Tabla 30	Proceso de implementación de la mesa superior e inferior.....	138
Tabla 31	Desarrollo de la estructura para el proceso de visión artificial .....	140
Tabla 32	Elaboración del brazo para el proceso de perforación .....	142
Tabla 33	Elaboración del brazo para el proceso de inserción .....	144
Tabla 34	Elaboración del alimentador de cerdas flexibles .....	149
Tabla 35	Costos totales del proyecto.....	166
Tabla 36	Análisis económico de máquinas perforadoras insertadoras .....	169
Tabla 37	Producción de cepillos de la microempresa.....	171
Tabla 38	Tiempos de máquina.....	171
Tabla 39	Producción de cepillos de la máquina.....	172
Tabla 40	Valores de frecuencias observadas (fo).....	173
Tabla 41	Tabla de contingencia. Productividad .....	175
Tabla 42	Calidad del producto final.....	178
Tabla 43	Valores de frecuencias observadas (fo).....	178
Tabla 44	Tabla de contingencia. Calidad.....	179

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Izq. Máquina Semiautomática Der. Máquina Automática. ....	5
Figura 2 Alimentador de alambre.....	8
Figura 3 Componentes/elementos de un sistema de visión artificial.....	9
Figura 4 Tipos de máquinas herramientas de perforación.....	11
Figura 5 Mecanismo insertador de una máquina de coser .....	13
Figura 6 Sistema de Control de Lazo Abierto .....	14
Figura 7 Circuito neumático .....	15
Figura 8 Componentes generales de un circuito neumático .....	16
Figura 9 Medidas de las bases de madera .....	19
Figura 10 Icono LabVIEW .....	21
Figura 11 Icono de Matlab .....	22
Figura 12 Lenovo Stick 300 .....	25
Figura 13 Placa Lattepanda .....	26
Figura 14 Raspberry pi 3 .....	27
Figura 15 Router o fresadora tipo puente .....	30
Figura 16 Fresadora CNC de 3 ejes .....	32
Figura 17 Tornillo de Potencia .....	34
Figura 18 Husillo de recirculación de Bolas .....	35
Figura 19 Motor conectado al tornillo.....	35
Figura 20 Cadenas de transmisión .....	36
Figura 21 Piñón – Cremallera .....	38
Figura 22 Sistema de Poleas.....	39
Figura 23 Sistema de movimiento por correa .....	39
Figura 24 Sistemas de guiado por eje .....	43
Figura 25 Sistemas de guiado lineal .....	43
Figura 26 Dosificador lineal por gravedad .....	48
Figura 27 Alimentador circular por gravedad .....	49
Figura 28 Tarjeta Arduino .....	51
Figura 29 PLC.....	52
Figura 30 Izq. Servomotor Industrial. Der. Servomotores convencionales .....	55

Figura 31 Motores PAP.....	56
Figura 32 Sensor inductivo .....	58
Figura 33 Sensores capacitivos.....	58
Figura 34 Sensor electromecánico .....	59
Figura 35 Módulo de elasticidad de diferentes metales .....	62
Figura 36 Estructura para el sistema de movimiento (Ejes X e Y).....	63
Figura 37 Masa total de la mesa superior .....	67
Figura 38 Diagrama de cuerpo libre del eje Y.....	68
Figura 39 Diagramas del eje Y para cargas estáticas.....	70
Figura 40. Análisis de esfuerzos en el eje Y .....	73
Figura 41. Análisis de Desplazamiento máximo en el eje Y .....	74
Figura 42. Análisis del factor de seguridad en el eje Y .....	74
Figura 43 Diagramas del eje Y para cargas repetidas.....	76
Figura 44. Análisis de esfuerzos eje Y. Caso de carga repetida.....	78
Figura 45. Análisis del desplazamiento máximo eje y con carga repetida .....	78
Figura 46. Análisis Factor de seguridad eje Y carga repetida.....	79
Figura 47 Ensamble de mesa superior con ejes guías .....	79
Figura 48 Masa de la mesa inferior correspondiente al eje X .....	80
Figura 49 Diagrama de cuerpo libre del eje X.....	81
Figura 50 Diagramas del eje X para cargas estáticas.....	81
Figura 51. Análisis de esfuerzo máximo del eje X .....	83
Figura 52. Análisis de la deformación máxima en el eje X.....	84
Figura 53. Análisis Factor de seguridad en el eje X.....	84
Figura 54 Diagramas del eje X para cargas repetidas.....	85
Figura 55. Análisis de Esfuerzos eje X .....	86
Figura 56. Análisis de la deformación máxima en el eje X.....	87
Figura 57. Análisis Factor de seguridad para el eje X.....	87
Figura 58 Ensamble de mesa inferior con ejes guías .....	88
Figura 59 Brazo de soporte para el proceso de perforación .....	88
Figura 60. Componentes ensamblados del proceso de perforación .....	89
Figura 61 Miembros independientes del brazo de soporte perforación .....	90

Figura 62 Diagrama de cuerpo libre del primer componente .....	90
Figura 63 Diagramas del primer componente .....	91
Figura 64 Selección de las dimensiones del tubo cuadrado .....	92
Figura 65 Diagrama de cuerpo libre del segundo componente .....	93
Figura 66 Ensamble del brazo de soporte para proceso de perforación.....	97
Figura 67. Análisis esfuerzos Brazo de perforación.....	97
Figura 68 Análisis del factor de seguridad del brazo de soporte .....	98
Figura 69 Disposición de los brazos de soporte .....	99
Figura 70 Actuador Lineal proceso de inserción.....	99
Figura 71 Miembros independientes del brazo superior de inserción.....	100
Figura 72 Diagrama de cuerpo libre de miembros del brazo superior .....	100
Figura 73. Miembros independientes del brazo inferior de inserción .....	102
Figura 74 Diagrama de cuerpo libre de miembros del brazo inferior .....	103
Figura 75 Brazos de soporte para el proceso de inserción.....	106
Figura 76. Análisis de Esfuerzos para el brazo de inserción .....	106
Figura 77 Análisis del factor de diseño del brazo de soporte de inserción .....	107
Figura 78 Partes de la estructura del alimentador de cerdas flexibles.....	107
Figura 79 Modelo CAD de la mesa base .....	108
Figura 80 Diseño de mesa base con brazos de soporte.....	109
Figura 81 Diagrama de cuerpo libre del miembro crítico de la mesa base .....	110
Figura 82 Reacciones y momentos flectores del miembro crítico .....	110
Figura 83 Selección de las dimensiones del tubo rectangular .....	111
Figura 84. Análisis de esfuerzos de la mesa base.....	113
Figura 85. Análisis de deformación máxima en la mesa base .....	113
Figura 86 Análisis de factor de seguridad de la mesa base.....	114
Figura 87 Diseño CAD de la mesa base.....	114
Figura 88 Sistema de movimientos de eje Y.....	115
Figura 89 Ensamble de la mesa superior (Eje Y).....	118
Figura 90 Ensamble final de la mesa superior e inferior .....	119
Figura 91 Diseño CAD para el sistema de perforación .....	120
Figura 92 Driver TB6600.....	123

Figura 93 Conexión de pines Arduino Mega – NEMA 23 (EJE Y) .....	123
Figura 94 Conexión de pines Arduino Mega – NEMA 23 (EJE X) .....	124
Figura 95 Modo de conexión del driver Pololu A4988.....	124
Figura 96 Conexión de pines Arduino Mega – NEMA 17 (EJE Z).....	125
Figura 97 Conexión de pines Arduino Mega – NEMA 17 (ALAMBRE) .....	125
Figura 98 Diagrama de conexión de los finales de carrera.....	126
Figura 99 Pines Arduino Mega – Finales de carrera.....	126
Figura 100 Matriz del insertador con sus componentes.....	127
Figura 101 Circuito neumático .....	129
Figura 102 Circuito eléctrico. Parte de control .....	130
Figura 103 Circuito eléctrico. Parte de potencia .....	130
Figura 104 Circuito electro neumático .....	131
Figura 105 Proceso general de funcionamiento y control .....	132
Figura 106 Diagrama de flujo del funcionamiento general de la máquina .....	133
Figura 107 Diseño CAD de la máquina última .....	134
Figura 108 Corte y soldadura de la mesa base .....	137
Figura 109 Mesa base pulida.....	137
Figura 110 Ensamble completo de la mesa superior e inferior .....	139
Figura 111 Ensamble de la caja de control en la mesa base.....	140
Figura 112 Ensamble de la estructura de visión en la mesa base .....	141
Figura 113 Diseño final del brazo de soporte (Proceso de inserción).....	144
Figura 114 Prueba de funcionamiento de cada actuador neumático .....	146
Figura 115 Actuador del marco de la matriz de inserción .....	146
Figura 116 Actuador de la lengüeta de la matriz de inserción .....	147
Figura 117 Actuador del cortador de la matriz de inserción .....	147
Figura 118 Actuador de la boca de la matriz de inserción .....	148
Figura 119 Implementación completa del brazo de soporte .....	148
Figura 120 Izq. Construcción del carrete. Der. Implementación a la mesa.....	150
Figura 121 Ensamble del alimentador de alambre.....	151
Figura 122 Ubicación de los finales de carrera en las mesas de trabajo .....	152
Figura 123 Ubicación del final de carrera para el proceso de perforación .....	152

Figura 124 Conexión de motores, drivers, fuente de poder (X e Y) .....	153
Figura 125 Conexión de motores, drivers, fuente de poder (Z y Alambre) .....	153
Figura 126 HMI de la máquina.....	154
Figura 127 Conexiones de la pantalla con la tarjeta Raspberry Pi 3.....	154
Figura 128 Posición matricial de cada base de madera .....	155
Figura 129 Diseño de la matriz base pequeña (Cepillo pequeño) .....	155
Figura 130 Diseño de la matriz base mediana (Cepillo mediano).....	156
Figura 131 Diseño de la matriz base grande (Cepillo grande) .....	156
Figura 132 Tablero de control vista externa.....	157
Figura 133 Etiquetado de las conexiones .....	157
Figura 134 Ensamble de la máquina final.....	158
Figura 135 Procesos de la máquina .....	158
Figura 136 Funcionamiento del sistema de visión artificial .....	159
Figura 137 HMI de la máquina al no encontrar la matriz base.....	159
Figura 138 Izq. Disposición de la matriz base. Der. Visualización del HMI.....	160
Figura 139 Luces indicadoras del tablero de control.....	160
Figura 140 Proceso de perforación de la matriz base.....	161
Figura 141 Alimentadores del proceso de inserción .....	161
Figura 142 Transporte de las cerdas flexibles hacia el insertador .....	162
Figura 143 Ubicación de las cerdas flexibles .....	163
Figura 144 Armazón que impulsa al alambre hacia la matriz de inserción .....	163
Figura 145 Mechas de cerdas aprisionadas por la grapa .....	164
Figura 146 Proceso inicial de inserción .....	164
Figura 147 Proceso de inserción .....	165
Figura 148 Cepillos completados.....	166
Figura 149 Chi-cuadrado .....	174
Figura 150 Perforación manual.....	180
Figura 151 Perforación en la máquina .....	180
Figura 152 Producto final a mano. Vista lateral .....	181
Figura 153 Producto final realizado en la máquina. Vista lateral .....	181
Figura 154 Producto final a mano. Vista Superior.....	182

Figura 155 Producto final realizado en la máquina. Vista Superior..... 182

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. [ 1 ] Esfuerzo de diseño para cargas estáticas .....	66
Ec. [ 2 ] Peso total.....	67
Ec. [ 3 ] Momento flector máximo.....	69
Ec. [ 4 ] Esfuerzo máximo de un elemento .....	70
Ec. [ 5 ] Módulo de sección.....	70
Ec. [ 6 ] Diámetro de un perfil circular .....	71
Ec. [ 7 ] Deformación máxima.....	71
Ec. [ 8 ] Momento de inercia de una sección circular.....	72
Ec. [ 9 ] Esfuerzo máximo en función del diámetro .....	72
Ec. [ 10 ] Fuerza total que actúa en el eje.....	75
Ec. [ 11 ] Esfuerzo de diseño para cargas repetidas.....	77
Ec. [ 12 ] Longitud efectiva.....	94
Ec. [ 13 ] Relación de esbeltez.....	94
Ec. [ 14 ] Constante de columna.....	95
Ec. [ 15 ] Carga crítica .....	95
Ec. [ 16 ] Carga permisible.....	96
Ec. [ 17 ] Fuerza requerida para mover la carga del eje .....	116
Ec. [ 18 ] Torque requerido del motor .....	116
Ec. [ 19 ] Grados de libertad .....	173
Ec. [ 20 ] Cálculo del chi cuadrado.....	174

## RESUMEN

El presente proyecto abarca el diseño, la construcción e implementación de una máquina que tiene como función, la fabricación de tres modelos diferentes de cepillos de limpieza, cuenta con tres procesos: visión artificial, perforación e inserción. La máquina inicia su funcionamiento posicionándose constantemente en las coordenadas HOME, hasta que se disponga de una matriz base en su mesa de trabajo, una vez colocada la matriz base inicia el proceso de visión artificial reconociendo y clasificando las áreas de interés en tiempo real y autoconfigurando de manera inmediata toda la máquina para los procesos siguientes, también se vinculó un HMI para que el operario pueda estimar el área de trabajo y validar la clasificación de la máquina. Inmediatamente se traslada al proceso de perforación y se taladra en cada punto matricial de la base, al completar el proceso, la mesa de trabajo se traslada al proceso de inserción, donde éste dispone de dos alimentadores y una matriz de inserción, dicha matriz es la parte principal del proceso y se encarga de cortar y embutir el alambre para formar una grapa cada vez que las cerdas flexibles se posicionan y mediante la acción de una lengüeta, ésta transporta la grapa con las cerdas a través de la boca del insertador, que sirve como guía para cerrar las puntas de la grapa y aprisionar en su interior las cerdas flexibles, de esta manera, en cada posición de los agujeros de la matriz base se insertan las cerdas flexibles, terminando de formar el cepillo de limpieza, sea este grande, mediano o pequeño. Con la realización del presente proyecto se pretende que pequeñas empresas puedan acceder a maquinaria industrial de este tipo, debido a que en el país no se fabrican máquinas similares y el adquirirlas fuera del mismo demanda un costo muy elevado.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **VISIÓN ARTIFICIAL**
- **EMPRESA CEPIBRILLO ECUADOR**
- **MATRIZ DE CORTE Y EMBUTIDO**
- **ALIMENTADOR LINEAL**

## ABSTRACT

This project covers the design, construction and implementation of a machine whose function is the manufacture of three different models of cleaning brushes. It has three processes: artificial vision, perforation and insertion. The machine starts its operation by constantly positioning itself in the HOME coordinates, until a base matrix is available in its work table. Once the base matrix is installed, it starts the artificial vision process recognizing and classifying the areas of interest in real time and autoconfiguring Immediately the entire machine for the following processes, an HMI was also linked so that the operator can estimate the work area and validate the classification of the machine. Immediately it is transferred to the drilling process and drilled in each dot matrix of the base, when completing the process, the work table is transferred to the insertion process, where it has two feeders and an insertion matrix, this matrix is the main part of the process and is responsible for cutting and stuffing the wire to form a staple each time the flexible bristles are positioned and through the action of a tongue, this transports the staple with the bristles through the mouth of the inserter, which serves as a guide to close the tips of the staple and to imprison the flexible bristles inside, in this way, in each position of the holes of the base matrix the flexible bristles are inserted, finishing forming the cleaning brush, be this large, medium or small. With the realization of the present project is intended that small companies can access industrial machinery of this type, because the country does not manufacture similar machines and acquire them out of the same demand a very high cost.

### KEYWORDS:

- ARTIFICIAL VISION
- COMPANY CEPIBRILLO ECUADOR
- CUTTING AND SAUSAGE MATRIX
- LINEAR FEEDER

## PRESENTACIÓN

En el presente proyecto, se construye e implementa una máquina que tiene como función el reconocimiento de tres matrices distintas (bases de madera) y autoconfigura los procesos de perforación e inserción de todo el sistema mecatrónico de manera automática e inmediata, para terminar de producir el cepillo pequeño, mediano o grande.

En el Capítulo I Fundamentos teóricos e investigación, se recopila toda la información necesaria que abarca la construcción de máquinas similares, procesos de visión artificial y diferentes tipos de actuadores.

En el Capítulo II Análisis y selección de alternativas, se detalla la selección de alternativas tentativas para el diseño completo de la máquina, es decir la selección del tipo de estructura, la matriz de inserción, sistemas de alimentación necesarios, tarjetas de control y actuadores.

En el Capítulo III Diseño mecatrónico de la máquina, se describe los parámetros a considerarse para el diseño de la máquina, como la selección de materiales a emplearse, diseño de ejes transversales y longitudinales con sus respectivas mesas de trabajo, el diseño de los brazos de soporte y el diseño de alimentadores, además de la selección de motores para los ejes de trabajo, se diseñan los diagramas eléctricos, electrónicos y electro neumáticos, para finalmente determinar el sistema de control a emplearse.

En el Capítulo IV Construcción y pruebas de funcionamiento, se detalla la construcción e implementación de cada proceso de la máquina, así como también las pruebas de funcionamiento de cada proceso y de la máquina general.

En el Capítulo V Conclusiones y recomendaciones, se despliegan las conclusiones y las recomendaciones compiladas durante el desarrollo de este proyecto.

En último lugar, se enlistan todas las referencias bibliográficas y los anexos respectivos, que se emplearon para el desarrollo del proyecto.

# **CAPÍTULO I**

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN**

### **1.1 Generalidades**

En la actualidad para una empresa es necesaria la automatización industrial dentro de sus procesos de manufactura para generar una mayor producción, siempre y cuando exista una creciente demanda en el mercado a abastecer.

El proyecto a realizar nació de la necesidad tecnológica que sufren las empresas por la carencia en la elaboración y venta de estas máquinas en el país, es así que empresas que se dedican a esta labor manual se ven en la necesidad de importar máquinas desde otros países como: Colombia, Italia, Brasil, China. etc.

El proceso de fabricación de cepillos para limpieza en sus inicios ha sido un proceso netamente manual realizado en un armazón de madera o plástico, proceso el cual requiere de un gran aporte de mano de obra y tiempo de fabricación, dicho proceso de elaboración manual genera una producción muy limitada y además no asegura una producción constante, es decir un sistema de producción repetitivo y modular que asegure la calidad total de cada cepillo de limpieza fabricado, además el tiempo de manufactura de un solo ejemplar es alto.

### **1.2 Definición del problema**

En nuestro país la cultura vanguardista es muy limitada, ya que el desarrollo de nueva tecnología en maquinaria automática de tipo industrial es muy pobre, es así que empresas ecuatorianas se ven en la necesidad de importar esta tecnología de otros países que si explotan estos sectores de manufactura industrial.

Adquirir esta tecnología en maquinaria es muy costosa a nivel internacional, trayendo consigo muchos inconvenientes al momento de su adquisición como: su gran tamaño y peso, el mantenimiento respectivo de las mismas y las instalaciones eléctricas especiales que se requieren para su funcionamiento.

Dentro del Ecuador existen empresas pequeñas que se dedican a la elaboración de cepillos de limpieza, pero que no poseen procesos automatizados, como es el caso de CEPIBRILLO-ECUADOR, actividad que en la actualidad conlleva a ser una tarea ardua debido a que demanda considerable mano de obra y tiempo de producción, generando de esta manera una demanda insatisfecha con el producto, motivo por el cual se requiere de una máquina que permita aumentar la producción de cepillos de forma sencilla y rápida.

Además el personal de la Microempresa permanece sentado por lapsos de 8 horas diarias o más, expuestos a la inhalación de partículas de polvo por el proceso de taladrado en las piezas de madera, además que al estar mucho tiempo sentado aumenta el riesgo de mortalidad en casi todos los problemas de salud, desde la diabetes tipo 2 y enfermedades cardiovasculares. (Mercola, 2015)

Al mecanizar una pieza de madera esta siempre produce polvo, dispersándose en el aire y pudiendo inducir a enfermedades respiratorias y cutáneas si el operario se expone por un tiempo extendido a dicho proceso. (simbolocalidad, 2017)

Es necesario para la Microempresa CEPIBRILLO-ECUADOR automatizar su proceso de elaboración de cepillos de limpieza, ya que como se ha mencionado, todavía posee un proceso muy rudimentario y manual.

### **1.3 Objetivo General**

- Diseñar e Implementar un Sistema Mecatrónico para perforación e inserción de filamentos flexibles dentro de distintas matrices empleando visión artificial para el reconocimiento y detección de áreas de interés,

innovando en la producción de la microempresa CEPIBRILLO-ECUADOR.

## **1.4 Alcance**

El proyecto a realizarse pretende que la microempresa CEPIBRILLO-ECUADOR mejore su proceso de producción y elaboración de los cepillos de limpieza, ya que esta no cuenta con una producción automática sino que aún muestra un proceso manual.

A su vez se pretende que dicha empresa sea más competitiva no solo a nivel regional sino que pueda competir con empresas consolidadas a nivel nacional.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende que pequeñas microempresas puedan acceder a maquinaria con este tipo de tecnología y a más de poder aumentar su producción, puedan darse a conocer en conjunto, como un sector artesanal y de comercio económico en el país.

## **1.5 Estado del Arte**

### **1.5.1 Fabricación de brochas, escobas y cepillos**

La presencia y utilidad de los utensilios de limpieza como los cepillos y escobas se remontan a tiempos prehispánicos al formarse las primeras comunidades humanas, dado que la limpieza de casas, comunas y pueblos en un inicio se realizaban con la confección de las primeras escobas que eran elaboradas con un conjunto de ramas amarradas a un vástago principal. (Arroyo, 2009)

La manufactura de los cepillos y escobas en nuestro país tiene su producción principalmente en zonas rurales como la parroquia San Juan de Pastocalle, donde su elaboración es transmitida a manera de tradición familiar de generación en generación, creando así empleo para sus habitantes y generando pequeñas microempresas familiares que fabrican y distribuyen sus cepillos y escobas a nivel nacional.

En nuestro país esta actividad económica, denominada en el país de Chile según (sii.cl, 2017) como “FABRICACIÓN DE BROCHAS, ESCOBAS Y CEPILLOS con código 369920”, no se encuentra registrada como una actividad de comercio dentro de Ecuador, debido a que es una actividad aún artesanal y lamentablemente no cuenta con un campo de producción extenso, por la misma razón no es considerada como una actividad económica registrada en nuestro país, motivo por el que la mayor parte de sus productos o maquinaria encargada de manufacturarlos se los adquiere en su gran mayoría en el exterior.

La introducción a la automatización de máquinas perforadoras e insertadoras, ha dado cabida a la creación de pocas empresas consolidadas en el país como: Inducero, Dimabru y Cedeppa, empresas que han ido innovado en su producción y que actualmente cuentan con un sistema puramente automático, dichas empresas optimizan el costo y el tiempo final en la elaboración de los cepillos y escobas; garantizando de esta manera una alta productividad y calidad en el producto final.

El manufacturar este tipo de producto de limpieza aún no es una necesidad actual para la industria ecuatoriana, debido a varios factores sociales limitantes como:

- El desarrollo tecnológico pobre en el país.
- La producción nacional no competitiva a nivel internacional.
- Escasas fuentes nacionales de inversión.

Se anhela que en un futuro las pequeñas empresas familiares dedicadas a esta actividad económica puedan acceder a maquinaria completamente automática y de bajo costo, además que en un futuro se pueda desarrollar este tipo de maquinaria en el país de manera industrial.

## 1.6 Subsistemas de la Máquina perforadora insertadora

Este tipo de maquinaria como se puede observar en la Figura 1, se encuentra enfocada a la tarea de perforar e insertar cerdas o filamentos flexibles, ya sea para la producción de escobas o cepillos, únicamente se las elaboran en países extranjeros y actualmente en nuestro país no existe un prototipo de esta maquinaria que se desarrolle para fines comerciales o de innovación propia en empresas de producción nacional.



**Figura 1 Izq. Máquina Semiautomática Der. Máquina Automática.**

Fuente: (borghi, 2017)

El proyecto a desarrollar constará de los siguientes subsistemas: sistemas de alimentación, sistema de visión artificial, sistemas de perforación e inserción y el sistema de control.

### 1.6.1 Sistemas de alimentación

Es importante recalcar que la máquina a desarrollarse debe disponer de 2 alimentadores principales para el sistema de inserción, siendo el primero el que se encargue de provisionar de cerdas flexibles al sistema y con un segundo alimentador que también abastecerá al mismo con el alambre que sujetará a las cerdas en cada matriz.

Existe una amplia gama de alimentadores que son utilizados en la actualidad según (catarina.udlap.mx, 2015). Dichos alimentadores que se

enlistan a continuación son propuestas tentativas para el alimentador opcional de la máquina principal.

- Alimentación por gravedad (tolva).
- Alimentación por banda transportadora.
- Alimentador Centrifugo de Tolva.

En la Tabla 1, se describe el funcionamiento de estos tres tipos de alimentadores así como también sus ventajas y desventajas.

**Tabla 1**

**Tipo de alimentadores**

<b>ALIMENTADORES</b>	<b>TOLVA</b>	<b>BANDA TRANSPORTADORA</b>	<b>CENTRÍFUGO</b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Aprovecha la fuerza de gravedad para abastecer a la máquina principal desde un depósito inicial.	Su principal funcionamiento consiste en un motor que da movimiento continuo y uniforme a la banda, así el producto que quiere ser procesado es transportado	Alimentador de forma cilíndrica donde la materia prima es colocado en un disco inclinado que rota a una velocidad contante.
<b>VENTAJAS</b>	- Bajo costo - Vida útil prolongada - Poco Mantenimiento	- Velocidad controlada - Estético - Control de posición del objeto	- Bajo costo - Poco mantenimiento y desgaste - Larga vida útil - Orientación del objeto levemente controlada
<b>DESVENTAJAS</b>	- No controla velocidad del objeto - No Controla posición del objeto	- Mayores mecanismos - Mayor mantenimiento - Alto costo	- Ruido moderado - Requiere de un motor con alto torque

Fuente: (catarina.udlap.mx, 2015)

### **a. Alimentador de cerdas flexibles**

Un alimentador es un mecanismo que proporciona una cantidad exacta de algún material o insumo de manera automática a un proceso, de esta forma se puede acelerar y optimizar los recursos invertidos en cada operación. Esto garantiza tanto al cliente como al fabricante, la cantidad exacta de producto que se está entregando, además de un tiempo de producción mejorado. (Valarezo & Vizuite, 2016)

Este alimentador tiene la función de transportar una cierta cantidad de cerdas flexibles a cualquier sistema principal y dependiendo de su destino, se puede alterar su estructura base.

#### **Tipos de alimentadores**

Existen varios tipos de alimentadores que dependen del estado del producto a trabajar (líquido, sólido, polvo, gas), sus características físicas, de la precisión deseada, dinámica del proceso (flujo de dosificación) y del modelo de servicio, es decir, que tan automatizado se desea el proceso. (Valarezo & Vizuite, 2016)

Existen dos tipos de alimentadores:

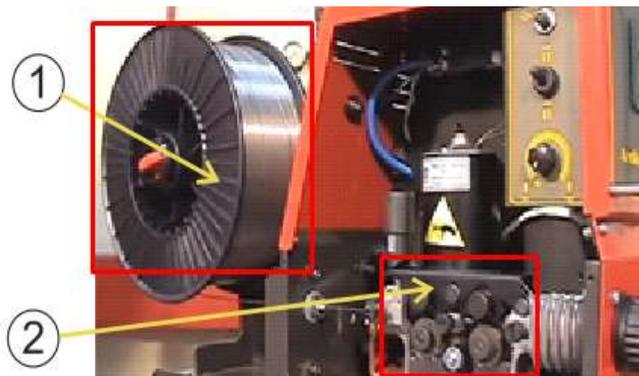
- Alimentador lineal por gravedad
- Alimentador circular por gravedad

Este tipo de alimentador de cerdas flexibles conlleva una inventiva propia ya en el desarrollo de la máquina y en puntos siguientes se determinará su estructura y validez funcional.

### **b. Alimentador de alambre**

Los alimentadores de alambre son incorporados generalmente como carretes exteriores a un sistema, donde requieren de actuadores y varios mecanismos

para poder deslizar el alambre desde el carrete al sistema requerido, como se puede observar en la Figura 2.



**Figura 2 Alimentador de alambre**

Fuente: (casamcgregorx, 2017)

*Elementos: (1) Carrete del alambre, (2) Mecanismos de desplazamiento del alambre.*

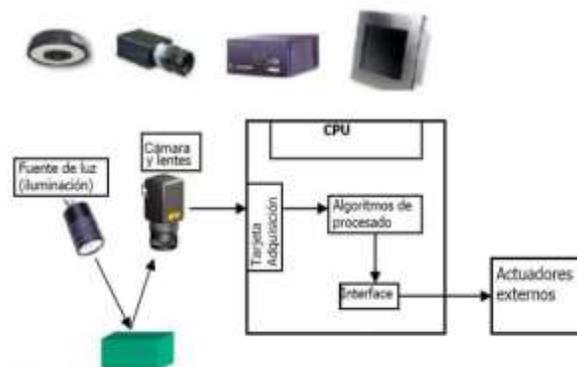
### 1.6.2 Sistema de visión artificial

La visión artificial es parte del campo de estudio de la “Inteligencia Artificial”, y mediante la utilización de procesos adecuados se pueda obtener, procesar y analizar cualquier tipo de información específica, obtenida a través de una cámara digital. (visionartificial.fpcat.cat, 2012)

A continuación se puntuarán las ventajas que presenta el uso de visión artificial según (etitudela, 2010)

- Permite automatizar tareas repetitivas de inspección continua
- Control de calidad de productos e inspección de objetos sin contacto físico
- Inspección en la producción de procesos donde existe diversidad de piezas

Según (visionartificial.fpcat.cat, 2012), los componentes o elementos de un sistema de Visión Artificial se muestran en la Figura 3.



**Figura 3 Componentes/elementos de un sistema de visión artificial**

Fuente: (visionartificial.fpcat.cat, 2012)

Entre las características más importantes de un sistema de visión artificial según (visionartificial.fpcat.cat, 2012) se tienen las siguientes:

- Evalúan los niveles de luz y analizan el color
- revelan bordes y formas
- Examinan objetos en movimiento
- Dependiendo del procesador presentan una alta velocidad de procesamiento

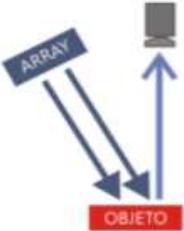
#### **a. Sistema de iluminación**

Para un sistema de visión artificial eficiente la iluminación del sistema es muy importante, ya que ésta debe facilitar condiciones en la iluminación que sean invariables e independientes del entorno. (bcnvision, 2017)

Existen diferentes técnicas de iluminación para las aplicaciones de visión artificial, en la Tabla 2 se puede apreciar diversas técnicas.

Tabla 2

## Técnicas de iluminación

TIPOS DE ILUMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	ILUSTRACIÓN
<b>Luz Frontal</b>	La posición de la cámara es frontal y en dirección paralela a la luz, la luz expuesta reduce las sombras y suaviza las texturas del objeto.	
<b>Luz lateral</b>	La posición de la cámara es frontal al objeto y la luz va lateral al mismo. El grado de inclinación de la luz establecerá el resalte de los relieves en el objeto.	
<b>Iluminación difusa tipo domo</b>	Existe un domo donde refleja toda la luz emitida hacia el objeto reduciendo sombras y reflejos mientras que el enfoque de la cámara sigue siendo frontal al objeto.	
<b>Iluminación por campo oscuro (Darkfield)</b>	Entre el objeto y la cámara existe un campo oscuro donde la luz es emitida en dirección al objeto con un pequeño ángulo de depresión.	
<b>Iluminación por contraste (Backlight)</b>	El objeto en cuestión se encuentra posicionado entre la cámara y la fuente de iluminación, de esta manera analiza la silueta del objeto de una manera eficiente.	

### 1.6.3 Sistema de Perforación

Para un sistema de perforación lo principal es contar con una eficiente máquina herramienta en particular un taladro que cuente con una broca apropiada para cada material a taladrar. En algunos casos, dado la aplicación es indispensable el uso de algún accesorio, como por ejemplo un soporte vertical. El taladrado tiene como tarea el perforar un agujero en cualquier tipo de material al emplear la broca adecuada, siendo este un proceso necesario en la totalidad de componentes que se elabora. (Yépez & Lema, 2015)

#### a. Máquinas herramientas de perforación

En el campo de las máquinas herramientas de perforación existe una variedad de tipos debido a las múltiples condiciones en las que se usan los taladros, en la Figura 4 podemos observar que se pueden clasificar de acuerdo a su alimentación, su función y su soporte. (Yépez & Lema, 2015)



**Figura 4 Tipos de máquinas herramientas de perforación**

#### b. Tipos de Taladros

Existen numerosos ejemplares de taladros, en la Tabla 3 se puede observar la recopilación de algunos tipos que favorecen al desarrollo del proyecto. (bricotodo, 2014)

Tabla 3

## Tipos de Taladros

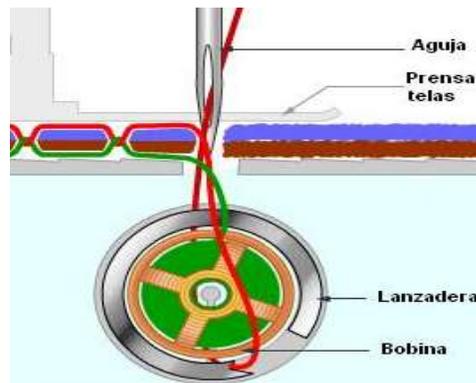
TALADROS	CONCEPTO	IMAGEN
<b>Taladro Manual</b>	Este tipo de taladro dispone de un engranaje en el lateral de su cuerpo, el mismo que sirve para generar una alta velocidad al mecanismo sujetador de la broca.	
<b>Taladro eléctrico</b>	Es la evolución del taladro manual al acoplarle un motor eléctrico haciéndolo multifuncional al poder cambiar su tipo de broca.	
<b>Taladro sin cable</b>	Este tipo de taladro no requiere una toma de corriente, ya que lleva incorporado una batería haciéndolo mucho más autónomo.	
<b>Martillo percutor</b>	Su característica principal es que en su funcionalidad cuenta con percusión que le permite obtener al taladro más potencia para perforar materiales duros.	
<b>Taladro de columna</b>	Es un taladro vertical fijo que cuenta con una estructura que le permite sostener al material a perforar, otorgándole gran precisión en su taladrado.	
<b>Minitaladro</b>	Este tipo de taladro está enfocado a aplicaciones más pequeñas, debido a su tamaño es ideal para tareas minuciosas en el hogar o en el ámbito estudiantil.	

## 1.6.4 Sistema de inserción

El sistema de inserción es el encargado de colocar diversos elementos o componentes en diferentes bases predispuestas, de forma continua y con una rapidez notoria en comparación con procesos manuales, mejorando de esta

manera la calidad y manufactura del producto final, al asegurar una correcta inserción del material, en cuanto a cantidad y profundidad del mismo.

En la Figura 5 se puede observar un mecanismo insertador de una máquina muy conocida como lo es la llamada máquina de coser.



**Figura 5 Mecanismo insertador de una máquina de coser**

Fuente: (almadeherrero, 2016)

#### a. Tipos de máquinas Insertadoras

A continuación en la Tabla 4, se detallan algunos de los tipos de máquinas insertadoras que existen, estos tipos de insertadoras encajan en los requerimientos para el avance del proyecto.

**Tabla 4**

#### Tipos de máquinas insertadoras

##### TIPOS DE INSERTADORAS

<p><b>Insertadora de cepillos</b></p>	<p>Esta máquina inserta automáticamente mechones de fibras en monturas adecuadas de plástico o madera en un solo ciclo de trabajo.</p>	
<p><b>Insertadora para escobillas</b></p>	<p>La máquina inserta mechones de fibras en bases circulares.</p>	

Continúa 

### Insertadoras de algodón

Este tipo de insertadora dobla e inserta una pieza de algodón en un tubo, formando una "U" por acción de un pistón neumático.

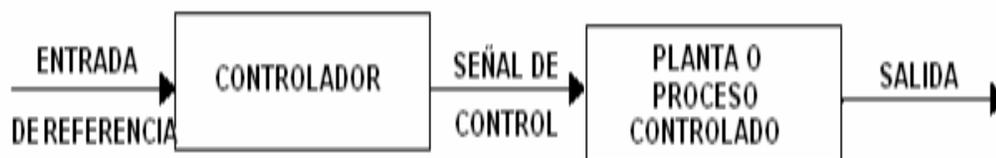


### 1.6.5 Sistema de control

Los sistemas de control que usualmente se conocen dentro de máquinas CNC están implementados con un control en lazo abierto. Como bien se sabe el sistema de control en lazo abierto es más simple y muchas veces es su implementación resulta más económico, por lo que para mecanismos donde no se requieren valores de fuerzas elevadas, un control en lazo abierto que rija al mecanismo, resultaría muy suficiente para dar la exactitud requerida al proceso. (Herrera, Liang, & Sotomayor, 2016)

#### a. Sistema de control a lazo abierto

En un sistema de control de lazo abierto, la señal de salida no se realimenta al inicio del proceso y tampoco se mide, es decir las entradas no se ven afectadas por los valores de la salida, la implementación de este tipo de sistema de control se puede observar en la Figura 6. (Perez, Hidalgo, & Berenguer, 2013)



**Figura 6 Sistema de Control de Lazo Abierto**

Fuente: (Perez, Hidalgo, & Berenguer, 2013)

## 1.7 Neumática

Según (areatecnologia, 2017), la neumática es el campo de la tecnología que emplea algún tipo de gas que normalmente es el aire comprimido, encargándose de transmitir la energía requerida para mover y activar el movimiento de varios mecanismos o actuadores finales, como por ejemplo los cilindros neumáticos. En la Figura 7 se puede observar el esquema base de un circuito neumático.

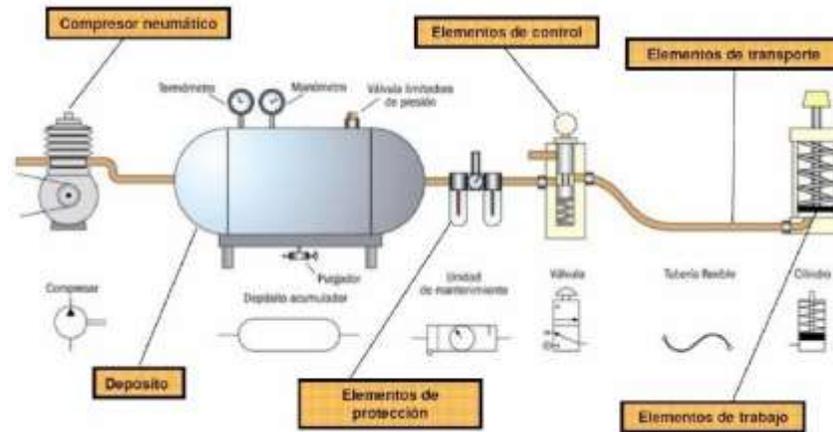


**Figura 7 Circuito neumático**

Fuente: (areatecnologia, 2017)

### 1.7.1 Componentes de un circuito Neumático

En la Figura 8 se presenta un circuito neumático con los componentes generales del mismo, así como también su respectiva simbología. Estos circuitos se encargan de la creación del aire comprimido, la distribución y el control por medio de válvulas a los respectivos actuadores, los mismos que son denominados cilindros.



**Figura 8 Componentes generales de un circuito neumático**

Fuente: (areatecnologia, 2017)

### a. Compresor Neumáticos

Se encargan de producir el aire comprimido para el circuito neumático, su función es elevar la presión del aire, denominada presión de servicio, la misma que transitará en las tuberías del circuito.

### b. Válvulas neumáticas

Las válvulas se encargan de controlar, regular y direccionar la distribución del aire hacia los actuadores. Se pueden activar desde un pulsador o eléctricamente.

### c. Cilindros neumáticos

Los cilindros neumáticos son el actuador final del circuito neumático y hay de varios tipos dependiendo de la aplicación como por ejemplo de simple o doble efecto, etc.

### 1.7.2 Ventajas y Desventajas de la Neumática

Las ventajas y desventajas que podemos destacar de la neumática según (areatecnologia, 2017) son:

**a. Ventajas de la Neumática**

- El aire es abundante y es energía limpia (Disponible de manera ilimitada)
- No es peligroso ni explosivo
- Es fácilmente transportable
- Se puede almacenar
- Los actuadores pueden trabajar a altas velocidades que son regulables
- Los cambios de temperatura afectan de manera insignificante al desempeño del trabajo del actuador
- Ideal para trabajar con sobrecargas

**b. Desventajas de la Neumática**

- Si el circuito neumático es muy largo produce pérdidas de cargas considerables
- Se requiere de un caudal constante de aire por lo que requiere instalaciones especiales
- Produce mucho ruido al descargar el aire y al empezar a trabajar el compresor neumático

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

#### **2.1 Requisitos funcionales**

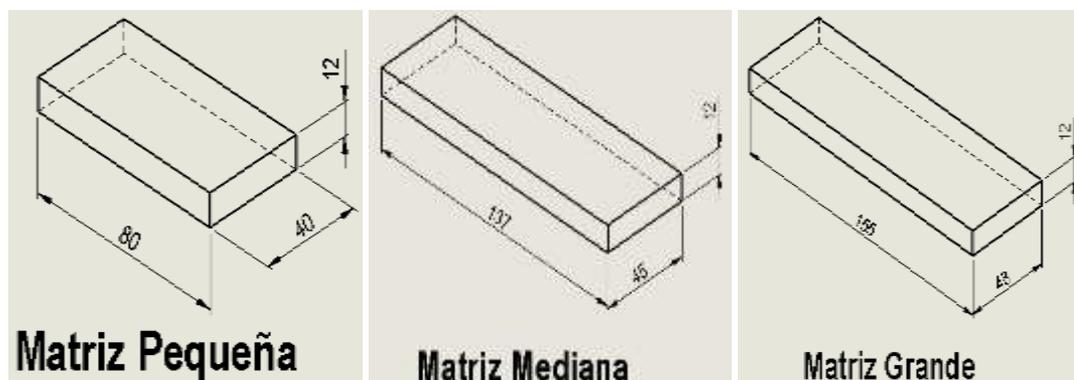
El proyecto a realizarse tiene como objetivo el diseño, análisis y construcción de una máquina perforadora e insertadora de cerdas flexibles para manufactura de cepillos de limpieza, empleando visión artificial para el reconocimiento y la clasificación de tres diferentes matrices o bases de cepillo.

Las funciones que se enlistan a continuación señalan el trabajo que debe tener la máquina a desarrollarse:

- Reconocer áreas de interés de cada tamaño de cepillo y autoconfigurar a toda la máquina para los procesos subsecuentes.
- Disponer de sistemas de alimentación encargados de abastecer al sistema de inserción de cerdas flexibles y alambre continuo.
- Transmitir movimiento lineal a la bancada o base en los ejes X e Y.
- Perforar las bases de los cepillos.
- Insertar los filamentos flexibles en las bases perforadas.

#### **2.2 Requisitos de diseño**

Para el diseño de la máquina es necesario partir con las dimensiones de cada base de trabajo, para disponer de un espacio de trabajo general para las mismas. Se dispondrá de bases pequeñas, medianas y grandes con medidas ya establecidas por parte de la fábrica. En la Figura 9 se puede observar las medidas en milímetros de dichos patrones:



**Figura 9 Medidas de las bases de madera**

## 2.3 Subsistemas

En el diseño total de la máquina, es necesario fraccionarlo en varios subsistemas para un correcto análisis y selección de alternativas, es así, que en base a criterios de diseño y construcción, la máquina presenta los siguientes subsistemas:

- **SUBSISTEMA A:** SOFTWARE PARA EL SISTEMA DE VISIÓN
- **SUBSISTEMA B:** PROCESADOR PARA EL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL
- **SUBSISTEMA C:** ESTRUCTURA
- **SUBSISTEMA D:** MECANISMO DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTOS
- **SUBSISTEMA E:** SISTEMA DE GUIADO
- **SUBSISTEMA F:** MATRIZ DE INSERCIÓN DE CORTE Y EMBUTIDO
- **SUBSISTEMA G:** SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN
- **SUBSISTEMA H:** TARJETA DE CONTROL

Para la selección de alternativas, se emplea la escala de 5 niveles, la misma que advierte una relación porcentual modificada de la norma ISO 10004, ésta establece rangos en niveles del 0 al 4, con un significado para cada nivel establecido, según (Cifuentes, Izurieta, & Faria, 2012). La escala de calificación y ponderación se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5**

**Escala de calificación, ponderación y su interpretación**

PUNTUACIÓN	% ÓPTIMO	INTERPRETACIÓN
0	< 35	Insatisfactorio
1	36 – 50	Poco satisfactorio
2	51 – 75	Medianamente satisfactorio
3	76 – 90	Satisfactorio
4	91 - 100	Muy satisfactorio

Fuente: (Cifuentes, Izurieta, & Faria, 2012)

### 2.3.1 Subsistema A: Software para el sistema de visión

La finalidad del sistema de visión es la de reconocer las distintas áreas de interés de cada base de madera y analizar sus dimensiones comparándolas con un patrón dado, para su posterior clasificación y carga del programa establecido.

#### a. Alternativas de diseño del Subsistema A

Para el software a emplearse en el sistema de visión se ha previsto de dos alternativas tentativas que son:

- Software con licencia pagada
- Software libre

## Alternativa 1: Software con licencia pagada

En esta primera alternativa, se dispone de los siguientes softwares tentativos a emplearse para el desarrollo del programa.

### LabVIEW

El software LabVIEW es un entorno de desarrollo integrado que emplea el lenguaje de programación gráfica (G), presenta facilidad de uso como sus principales características haciéndolo idóneo para estudiantes y personas con poco conocimiento en programación gracias a su manera didáctica de programación visual gráfica. (ni, 2016)



**Figura 10 Icono LabVIEW**

Fuente: (ni, 2016)

Además se puede emplear para el desarrollo de:

- Software para Windows, UNIX/Linux o Mac
- Librerías (DLL, Activo X, .NET)
- Control de instrumentos
- Control en tiempo real
- Tarjetas FPGA

**Características:**

Según (documents.mx, 2016) las características del Software LabVIEW son:

- Programación fácil y rápida
- Integración de hardware
- Incorporación avanzada en el análisis y procesamiento de señales

**Matlab**

Matlab es un software matemático muy poderoso que posee un lenguaje de programación propio, además se encuentra disponible para varias plataformas como Windows, Mac, Linux, etc., es utilizado ampliamente en centros de investigación, en la academia para enseñanza estudiantil y en la industria debido a sus capacidades avanzadas de procesamiento y diversas herramientas que van acorde a la ingeniería. (Abad, Acaro, & Valdiviesos, 2010)



**Figura 11 Icono de Matlab**

Fuente: (Abad, Acaro, & Valdiviesos, 2010)

**Características:**

Según (nereída.deioc, 2002) las características principales del software Matlab son:

- Compatibilidad en el lenguaje de otros programas
- Manipulación de matrices y representación de datos y funciones
- Implementación de aritmética compleja

- Dispone herramientas para crear interfaces de usuario y simulaciones multidominio

### **Aplicaciones:**

Se puede usar el software MATLAB en muchas aplicaciones, a continuación se enlistarán algunos ejemplos de su uso:

- Sistemas de control
- Pruebas y medición
- Procesamiento de señales e imágenes
- Modelado y análisis financiero

### **Alternativa 2: Software Libre**

#### **Python**

Python es un lenguaje de programación multiplataforma orientado a objetos, se puede desarrollar cualquier tipo de programa ya que la estructura de programación no es muy compleja, si se tiene un conocimiento básico en programación y además posee una licencia de código abierto lo que lo hace muy atractiva al desarrollo de proyectos varios.

Los sistemas operativos en los que puede ser utilizado son Windows, Mac OS y Linux.

Según (desarrolloweb, 2017), el lenguaje se ha hecho muy popular, gracias a varias características como:

- La cantidad de librerías que contiene, como OpenCV, Numpy, Scipy, matplotlib, etc., y varias funciones anexas en el propio lenguaje.

- La sencillez con la que se crean programas y la velocidad de ejecución de los mismos, ya que sus líneas en código de programación son menos que su equivalente en Java o C++.
- Lo más llamativo para desarrolladores es que el software Python tiene licencia gratuita, incluso para propósitos empresariales.

## b. Criterios y Selección del Subsistema A

Es importante recalcar que para la selección del software hay que tener en cuenta que su implementación será destinada a una microempresa, por lo que requiere que las licencias sean legales o a su vez licencias libres.

**Tabla 6**

### Selección de alternativas del Subsistema B

<b>Criterios de selección</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>
Costo de adquisición	1	4
Garantía de continuidad	3	4
Fácil programación	4	4
Instalación	3	4
<b>TOTAL</b>	<b>11</b>	<b>16</b>

De la Tabla 6 se puede observar que la alternativa 2 tiene la mayor puntuación, perteneciendo a la categoría de software libre y tomando mucha ventaja debido a que el proyecto a realizarse se implementará en una microempresa, por esta razón para el desarrollo del programa que se encargará del reconocimiento de áreas por visión artificial, se empleará el software Python.

### 2.3.2 Subsistema B: Procesador para el sistema de visión artificial

Este apartado se refiere a la tarjeta o procesador encargado de procesar las imágenes y videos adquiridos por el sistema de visión artificial, es así que se ha previsto de ciertas alternativas que permite a nuestro sistema ser más autónomo y funcional, dependiendo de las características de cada alternativa a seleccionarse tenemos las siguientes opciones:

- a. Lenovo IdeaCentre Stick 300
- b. Lattepanda
- c. Raspberry pi 3
- d. Pc en un case compacto

A continuación se procede a realizar una breve introducción de cada dispositivo, para posteriormente realizar una tabla comparativa general y finalmente realizar la selección final del procesador a emplearse en el proyecto.

#### **a. Alternativas de diseño del Subsistema B**

##### **Alternativa 1: Lenovo Idea Centre Stick 300**

Este procesador tiene una longitud de tan solo 100 mm, cabe sin problemas en la palma de la mano y se encuentra equipado con el sistema operativo Windows con Bing, entre sus características técnicas se encuentran sus 2 GB de memoria, 32 GB de almacenamiento integrado y una pequeña rendija de ventilación parecido al modelo de Intel. (lenovo, 2016)



**Figura 12 Lenovo Stick 300**

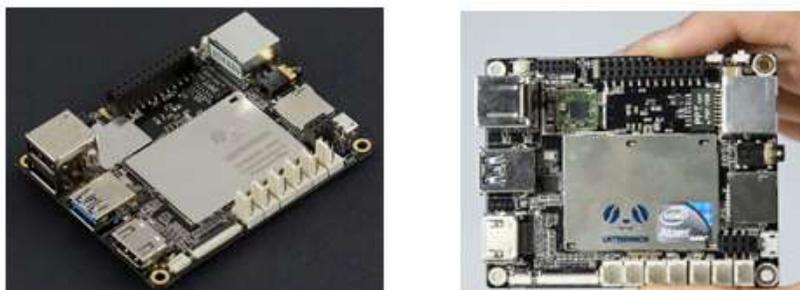
Fuente: (lenovo, 2016)

Según (lenovo, 2016), el procesador Stick 300 ofrece variedad de opciones en conectividad, dicho dispositivo se encuentra equipado con conexión Wi-Fi y Bluetooth, además de incluir puertos mini HDMI y USB para conectar

periféricos, y una ranura para tarjeta microSD que permite aumentar la capacidad de almacenamiento. Compensa la inversión de manera significativa al compararlo con el tamaño de un pc normal.

### **Alternativa 2: Lattepanda**

Es una placa PC integrada con el sistema operativo Windows 10, como se puede observar en la Figura 13 cuenta con dimensiones muy convenientes para transportarla sin dificultad y puede trabajar conjuntamente con la plataforma Arduino, ya que esta puede estar implementada en el mismo hardware a través de un coprocesador.



**Figura 13 Placa Lattepanda**

Fuente: (muycomputer, 2017)

### **Alternativa 3: Raspberry pi 3**

Según (omicron, 2016), la Raspberry Pi 3 es la tercera generación desde la fabricación de la primera Raspberry Pi con un rendimiento 10 veces superior, es muy recomendado para uso escolar o para cualquier uso enfocado a enseñanza educativa, como características de esta tarjeta destaca su tamaño proporcional al de una tarjeta Arduino. En la Tabla 7 se puede observar más a detalle las características técnicas de la tarjeta Raspberry Pi 3.



**Figura 14 Raspberry pi 3**

Fuente: (omicron, 2016)

#### **Alternativa 4: Pc en un case compacto**

En este apartado, se puede optar por ensamblar el CPU o adquirir uno disponible en el mercado, con las características necesarias y requeridas para el desarrollo del proyecto.

La mejor ventaja que tiene el proceso de armar un ordenador, es que el usuario puede decidir qué características y componentes dispondrá éste, además de la calidad de cada uno de los elementos, como el disco duro, la memoria RAM, puertos Hub (USB), monitor, etc.

#### **b. Comparación de alternativas del Subsistema B**

Para seleccionar la mejor alternativa, los factores de criterio están enfocados en las características de cada dispositivo o tarjeta. La selección de la tarjeta debe ser compatible con el software elegido con anterioridad.

**Tabla 7**

#### **Comparación de alternativas del Subsistema C**

<b>Especificaciones</b>	<b>Lenovo Stick 300</b>	<b>Lattepanda</b>	<b>Raspberry pi 3</b>	<b>Pc en un case compacto</b>
<b>Sistema operativo</b>	Windows 10	Windows 10/Linux	Linux	Windows/Linux
<b>Procesador</b>	Intel Atom Z3735 F 1.33Ghz	Intel Cereza Z8300 Trail Quad Core 1.8	A 1.2GHz - quad-core ARMv8	INTEL CORE2 3.0ghz

Continúa 

	GHz			
<b>Co-procesador</b>	No	ATmega32u4	No	No
<b>Gráfica</b>	No	Intel Gen8	No	HD Intel
<b>Ram</b>	2Gb DDR3	4 GB DDR3L	1Gb	4Gb
<b>Rom</b>	Gb DDR3	64GB	No	80GB
<b>Wifi</b>	2.4 G	4.0	802.11n	No
<b>Bluetooth</b>	4.0	4.0	4.1	No
<b>USB</b>	USB 2.0	Un USB 2.0 y Un Usb 3.0	4 USB Port	4 USB Port
<b>HDMI</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Video suported</b>	No	1080p 60 HEVC decode, H264, VP8	VideoCore IV 3D núcleo de gráficos	No
<b>Audio Jack</b>	No	Si	Si	Si
<b>Ethernet Port</b>	No	RJ45	RJ45	RJ45
<b>Accesorio incorporado</b>	No	Arduino Uno integrado en la misma tarjeta	No	No
<b>Ranura micro sd</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Costos de Adquisición</b>	<b>\$129.99</b>	<b>\$149 + envió \$71</b>	<b>\$65</b>	<b>\$180</b>

### c. Selección de Alternativas del Subsistema B

Los criterios que se toman en consideración en la Tabla 8 para la selección del procesador para el sistema de visión artificial son los siguientes: memoria de trabajo (RAM), memoria de almacenamiento, costo de adquisición, tiempo de adquisición, lenguaje de programación, número de puertos, dimensiones, procesador, compatibilidad con otros programas, control de temperatura, vida útil, mantenimiento y aplicabilidad.

**Tabla 8**

### Selección de Alternativas del Subsistema C

<b>Criterio de Selección</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>	<b>Alternativa 4</b>
Memoria de Trabajo (RAM)	2	4	2	4
Memoria de Almacenamiento	4	4	4	4
Costo	4	3	5	1

Continúa 

Tiempo de adquisición	3	1	5	2
Puertos disponibles	3	4	3	4
Dimensiones	4	4	5	1
Procesador	3	3	2	4
Compatibilidad	4	4	5	4
Control de temperatura	2	1	1	4
Vida útil	3	3	3	3
Mantenimiento	1	1	1	3
Aplicabilidad	4	4	4	4
<b>TOTAL</b>	<b>37</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>38</b>

Se ha realizado un análisis exhaustivo de cada dispositivo a emplearse como el procesador para el sistema de visión, de acuerdo a la Tabla 8 se puede apreciar que la mayor valoración pertenece a la alternativa 3 que es la tarjeta Raspberry pi 3; debido a que es un dispositivo accesible en el país y de un costo conveniente, además se ajusta al software de programación Python preseleccionado con anticipación.

### 2.3.3 Subsistema C: Estructura

De acuerdo con (Chancusi & Navarrete Paúl, 2014), “el diseño de una máquina deber ser robusto y preciso, en su elaboración ser simple y poseer la menor cantidad de mecanismos y movimientos de manufactura posibles, sin que esto repercute en la calidad del producto final. La función principal de la estructura es proporcionar soporte a los componentes móviles y estáticos así como mantenerlos correctamente alineados” (p. 22).

#### a. Alternativas de diseño del Subsistema C

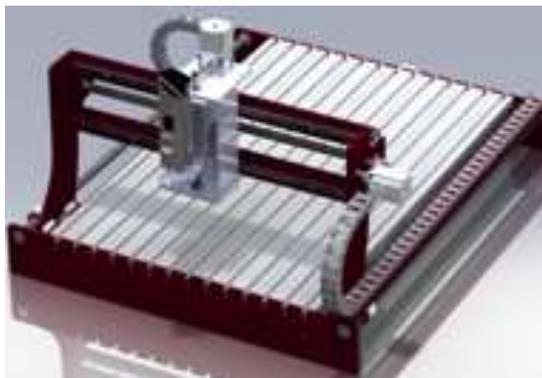
Para la manufactura del diseño de la máquina, se ha previsto de dos opciones de estructuras diferentes, utilizadas en el área industrial, estas son:

- Estructura tipo Router o fresadora de puente
- Estructura tipo fresadora de 3 ejes

### **Alternativa 1: Estructura tipo Router (fresadora de puente)**

Este tipo de estructura es el diseño más requerido en el ensamble de fresadoras, siendo adecuados para generar movimientos rápidos en el mecanizado de piezas. Al construir una estructura esta debe ser muy robusta y resistente a factores como esfuerzos y cargas externas. (tallerdedalo, 2017)

Un Router CNC es una máquina herramienta automatizada de control numérico generalmente de 3 ejes, tiene como finalidad la manufactura de piezas de diferentes materiales blandos, como lo son: madera, acrílico, cerámicos, entre otros. Este tipo de máquina es utilizado en la pequeña y mediana empresa para generar piezas artesanales con acabados precisos sin tener que recurrir a las grandes máquinas comerciales. (Morales Ríos, 2012)



**Figura 15 Router o fresadora tipo puente**

Fuente: (tallerdedalo, 2017)

### **Sistema mecánico y estructura del Router**

En la estructura de un Router CNC, se pueden visualizar los siguientes componentes o elementos:

- Mesa de trabajo

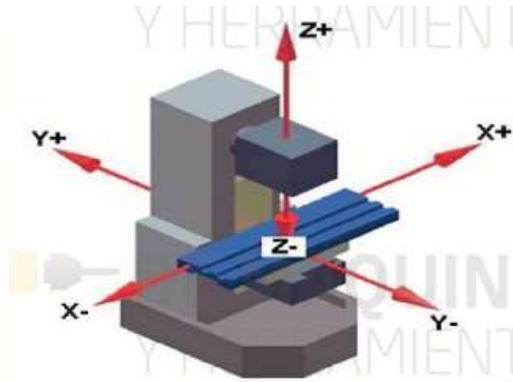
- Sistema de accionamiento
- Ejes de desplazamiento
- Mesa para fijación de material
- Soporte para fijación de las herramientas de corte

### **Aplicaciones**

- En el campo de la artesanía para procesos de tallado, ranurado, corte y perforaciones
- Cortes grandes para planchas de aluminio, acero, madera, etc.
- En metalúrgica en la elaboración de paneles, frentes para máquinas, piezas mecánicas, corte de planchas y perfiles de varios metales como el aluminio, acero, etc.
- Fabricación de moldes, cortes de plástico y madera y creación 3D en piezas

### **Alternativa 2: Estructura tipo fresadora de 3 ejes**

Este tipo de estructura es una de las más habituales entre las máquinas fresadoras que se comercian en el mercado, tienen una estructura muy robusta y al ser de grandes dimensiones son estructuras muy pesadas, sin embargo estas mismas características la hacen adecuada para mecanizar elementos duros que demandan grandes esfuerzos y gran precisión. (tallerdedalo, 2017)



**Figura 16 Fresadora CNC de 3 ejes**

Fuente: (demaquinasyherramientas, 2017)

En este tipo de máquinas dispone de tres ejes principales y según (demaquinasyherramientas, 2017) estos son:

- **Eje X:** se encuentra horizontal y paralelo a la superficie o mesa de sujeción de la pieza, se considera el eje longitudinal de la mesa de fresado.
- **Eje Y:** forma un ángulo recto con el eje X es considerado el eje transversal de la mesa de fresado.
- **Eje Z:** es el eje perpendicular a los ejes X e Y, en este eje va montado la máquina herramienta o el cabezal para el proceso de fresado.

### Aplicaciones

Las aplicaciones que tiene la fresadora en el ámbito industrial según (demaquinasyherramientas, 2017) son:

- Automovilística (diseño de bloques de motor, moldes y componentes diversos)
- Aeroespacial (turbinas de aviones, etc.)
- Electrónica (elaboración de moldes y prototipos varios)

- Elaboración de maquinaria, instrumental y módulos dieléctricos

## b. Criterios y Selección del Subsistema C

Para seleccionar la mejor alternativa, los factores de criterio serán: costo, estética, fabricación, montaje debido al peso, rigidez, mantenimiento, mecanismos de desplazamiento e impacto de esfuerzos. Por condiciones de diseño se requiere que los cabezales sean fijos y solo tengan movilidad en dirección del eje Z y su mesa de trabajo tenga movilidad en los ejes X e Y.

En la Tabla 9 se procede a seleccionar la mejor alternativa aplicando la ponderación de niveles de 0 a 4.

**Tabla 9**

### Criterios de selección del subsistema D

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2
Costo	4	3
Estética	3	3
Fabricación	3	3
Montaje por el peso	3	2
Rigidez	2	4
Mantenimiento	3	3
Mecanismo de desplazamiento	3	4
Impacto de esfuerzos	1	4
<b>TOTAL</b>	<b>22</b>	<b>26</b>

De acuerdo a la Tabla 9 se elige la alternativa número 2, debido a que tiene la mayor valoración y se ajusta a las necesidades del diseño requerido, a pesar de ser más pesados presentan un particularidad en su estructura robusta que es adecuada para mecanizar elementos duros y soportar grandes esfuerzos.

### 2.3.4 Subsistema D: Mecanismos de transmisión de movimientos

Los movimientos que realizará la máquina se basan en los 3 ejes principales X-Y-Z, dos ejes para la bancada o base y un movimiento en el eje Z para los cabezales de acuerdo a su funcionalidad.

### a. Alternativas de diseño del Subsistema D

Para la transmisión de este sistema se tendrán en cuenta movimientos puramente lineales, es así que se ha previsto de cuatro alternativas consideradas como mecanismos de transmisión.

- Tornillo – Tuerca
- Cadena - Catalina
- Piñón – Cremallera
- Sistema de Poleas

#### Alternativa 1: Tornillo – Tuerca

También conocido como Tornillo de Potencia, cumplen con la función de transmitir movimiento a sus ejes asociados, generalmente se emplean para convertir movimientos angulares en movimientos de traslación lineal o viceversa. (ingemecanica.com, 2017)

Los tornillos de potencia tienen muchas aplicaciones tales como: tornillos de avance para las máquinas herramientas, mordazas, gatos mecánicos, prensas, dispositivos de elevación de cargas, etc.



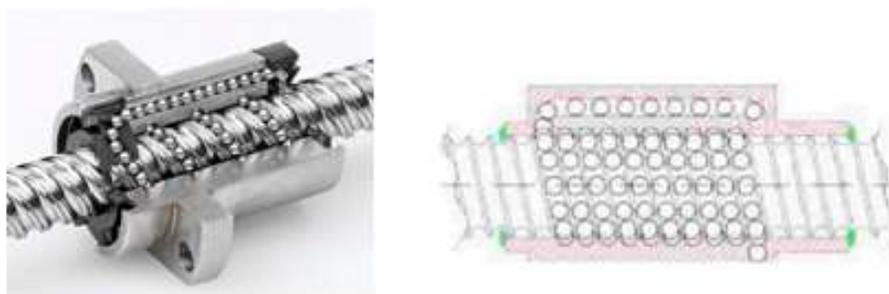
**Figura 17 Tornillo de Potencia**

Fuente: (ingemecanica.com, 2017)

En la Figura 17 se puede observar a detalle el principio de funcionamiento de este mecanismo de transmisión de potencia, a su vez presenta una desventaja

en el elevado rozamiento que existe, sin embargo este pequeño inconveniente se puede minimizar con el uso de rodamientos de bolas, los mismos que acceden a disminuir el coeficiente de rozamiento que existe y pueden incrementar la eficiencia de todo el mecanismo.

Es así que dentro del mecanismo Tornillo – Tuerca existe la posibilidad de emplear un elemento denominado husillo de recirculación de bolas, el mismo que se encuentran equipado con elementos rodantes (bolas o rodillos) que transmiten la potencia entre la tuerca y el eje del husillo, dicho movimiento rodante se encarga de minimizar aún más la fricción que existe, entre la tuerca de potencia y el eje de husillo de bolas.



**Figura 18 Husillo de recirculación de Bolas**

Fuente: (directindustry, 2017)

La mayor parte de los sistemas de tornillo-tuerca se fabrican en acero, pero también su fabricación se la puede encontrar en metales como bronce, latón, cobre, níquel, aceros inoxidable y aluminio, todo ello dependerá de las condiciones y el ambiente donde este mecanismo funcionará. Para su funcionamiento se conecta el motor al tornillo – husillo para de esta manera controlar la velocidad, posición y aceleración de la tuerca. (unac.edu, 2017)



**Figura 19 Motor conectado al tornillo**

Fuente: (unac.edu, 2017)

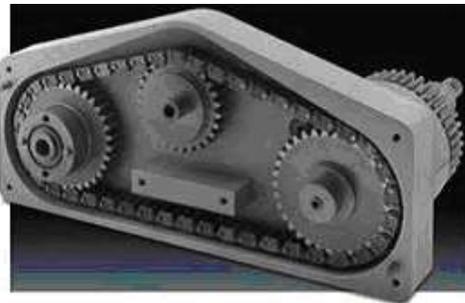
## Ventajas

Las ventajas que presenta este tipo de husillo según (skf, 2016) son:

- Al emplear este tipo de husillo de bolas el torque requerido del motor disminuye significativamente
- Se minimiza el índice de desgaste
- La vida útil del husillo de bolas es mucho mayor que la vida útil de los husillos deslizantes tradicionales

## Alternativa 2: Cadena - Catalina

Como se puede observar en la Figura 20 este tipo de sistemas son mecanismos compuestos por cadenas de transmisión, para transmitir grandes pares de fuerza y velocidades variables de funcionamiento. (ingemecanica, 2017)



**Figura 20 Cadenas de transmisión**

Fuente: (ingemecanica, 2017)

Según (ingemecanica, 2017) las cadenas de transmisión se dividen en los siguientes tipos:

- **Cadenas de transmisión de potencia:** desempeña la función de transmitir potencia entre los ejes.
- **Cadenas de manutención:** también denominadas como cadenas transportadoras, sirven para transporte o arrastre de material.

- **Cadenas de carga:** también nombradas como cadenas de bancos de fuerza, transmiten grandes cargas.

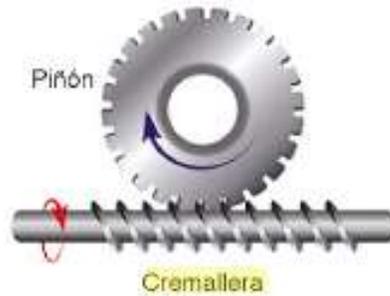
#### **Características:**

- Son transmisiones robustas
- Requiere de un engranaje preciso para una funcionalidad óptima
- Funcionan en una sola dirección
- Son mucho más costosas
- Todo el mecanismo debe estar funcionando ya que si un engrane o piñón falla todo el sistema se detiene
- Trabajan en condiciones ambientales adversas
- Trabajan a temperaturas elevadas
- Demandan de lubricación
- Proporcionan de una relación de transmisión fija entre las velocidades

#### **Alternativa 3: Piñón – Cremallera**

El piñón-cremallera es un mecanismo que consta de dos elementos: el piñón y la cremallera, tal como se puede observar en la Figura 21, dichos elementos deben engranar perfectamente entre sí.

- Un piñón, es una rueda dentada que alrededor de su eje, describe un movimiento rotacional.
- Una cremallera, es una barra dentada que puede trasladarse de izquierda a derecha o viceversa, según el movimiento que haga el piñón.



**Figura 21 Piñón – Cremallera**

Fuente: (ingemecanica, 2017)

### **Características:**

- Sistema de movimiento reversible.
- Gran relación de transmisión.
- Se puede fabricar de varios materiales.
- Costo más elevado en relación a los otros mecanismos.

### **Aplicaciones:**

Aunque el sistema es perfectamente reversible, según (aprendemostecnologia, 2017) su utilidad se centra en la conversión de movimientos circulares a movimientos lineales continuos y reversibles, consigue movimientos lineales de precisión, como en:

- Instrumentos ópticos como microscopios
- Desplazamiento de cabezales en taladros verticales
- Movimiento de puertas automáticas
- Movimiento de estanterías móviles empleadas en archivos, farmacias o bibliotecas

#### Alternativa 4: Sistema de Poleas

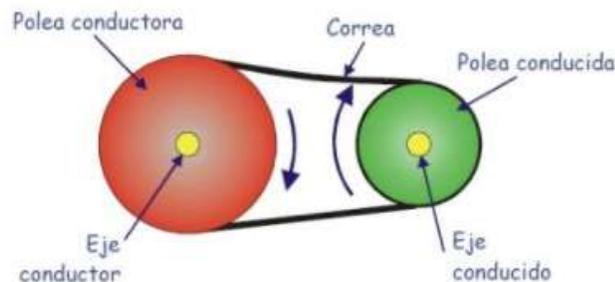
Este sistema de transmisión es un mecanismo que abarca dos poleas que se encuentran a una cierta distancia acopladas por medio de una correa, con el fin de transferir movimientos, fuerzas y velocidades. (catedu, 2012)



**Figura 22 Sistema de Poleas**

Fuente: (catedu, 2012)

Este mecanismo transmite el movimiento rotatorio de una polea (conductora) a otra polea (conducida), separadas a una distancia entre centros a través de una correa de sincronización con el mismo paso de la polea dentada. (Chancusi & Navarrete Paúl, 2014)



**Figura 23 Sistema de movimiento por correa**

Fuente: (gabrielmecanismos, 2017)

Según (gabrielmecanismos, 2017) este sistema de transmisión de movimientos, tiene muchas ventajas: como alta fiabilidad, es silencioso, bajo costo, no requiere de lubricación y tiene cierta elasticidad. Su principal desventaja es cuando la tensión de la correa es muy alta ocasionando que la

correa salte de la guía de la polea, lo que puede afectar a la funcionalidad de todo el sistema de movimientos.

## b. Criterios y Selección del Subsistema D

El subsistema D, abarca todo el sistema de movimiento principal de la máquina conjuntamente con el sistema de guiado, es así que en la selección de sus mecanismos, estos deben estar enfocados a generar movimientos rectilíneos de una forma eficiente y precisa, los criterios que se analizan para su selección son los siguientes:

- Costo
- Precisión
- Potencia
- Velocidad
- Implementación
- Mantenimiento
- Eficiencia mecánica
- Impacto a esfuerzos permisibles

**Tabla 10**

### Selección y alternativas del Subsistema D

<b>CRITERIO DE SELECCIÓN</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>	<b>Alternativa 4</b>
Costo	3	4	1	4
Precisión	4	2	4	4
Velocidad	3	3	2	3
Potencia	3	4	3	4
Implementación	4	3	4	3

Continúa 

Mantenimiento	3	3	3	3
Eficiencia mecánica	4	3	4	2
Impacto a esfuerzos permisibles	4	1	3	1
Movimiento reversible	4	0	4	0
<b>Total</b>	<b>32</b>	<b>23</b>	<b>28</b>	<b>24</b>

Como se puede observar en la tabla anterior, la alternativa 1 obtiene una mayor valoración siendo la opción más competente para el sistema de movimiento X e Y correspondientes a la bancada, ya que esta requiere de una mayor precisión y un alto impacto a esfuerzos generados por los procesos de perforación e inserción, por ende la opción más idónea viene a ser el mecanismo de tornillo–tuerca y empleando en vez de un husillo normal el husillo de recirculación de bolas, ya que este minimiza el índice de desgaste y aumentará la vida útil de todo el movimiento base del sistema mecatrónico.

### 2.3.5 Subsistema E: Sistema de guiado

El complemento para el movimiento de los mecanismos de transmisión son los sistemas de guiado, gracias a estos el sistema permite que exista movilidad en el sistema mecánico. Dichas guías lineales según (Chancusi & Navarrete Paúl, 2014) deben cumplir los siguientes roles fundamentales:

- Brindar soporte y estabilidad a los componentes de la máquina en el desplazamiento de los elementos móviles en sus ejes
- Guiar los elementos móviles con fricción mínima
- Soportar cargas secundarias (cargas laterales, torque, etc.)

### a. Alternativas de diseño del Subsistema E

Existen diversos sistemas de guiado que permiten mejorar el desempeño de los mecanismos de transmisión, para el desarrollo del proyecto se ha previsto dos tipos de sistema de guiado que son: Sistema de guiado por eje y sistema de guiado lineal.

#### Alternativa 1: Sistema de guiado por eje

En la Tabla 11, se puede denotar las características fundamentales del sistema de guiado por eje.

**Tabla 11**

#### Características del sistema de guiado por eje

Características	Sistema de guiado
<b>Material</b>	Fabricado en acero, resistentes a la corrosión.
<b>Duración de vida nominal</b>	La duración de la vida nominal alcanza o supera el 90% de eficiencia, antes de que aparezcan los primeros indicios de fatiga en el material.
<b>Rodamientos</b>	Posee rodamientos lineales a bolas que se utilizan con frecuencia cuando es importante conseguir una gran precisión de posicionado, un elevado rendimiento y alta eficiencia.
<b>Lubricación</b>	Es recomendable la lubricación con grasa, ya que esta permanece en el interior del rodamiento lineal y al mismo tiempo impide la entrada de suciedad.
<b>Recubrimientos</b>	Los recubrimientos proveen a los ejes una óptima protección contra el desgaste y la corrosión.
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	Resiste a temperaturas de alrededor de 900 °C.
<b>Riel de Soporte</b>	Este sistema de guiado se lo puede reforzar mediante un perfil o riel de aluminio, brindando mayor rigidez y estabilidad al sistema para cargas estáticas y dinámicas.



**Figura 24 Sistemas de guiado por eje**

Fuente: (Schaeffler, 2016)

### Alternativa 2: Sistema de guiado lineal

**Tabla 12**

#### Particularidades del sistema de guiado lineal

Características	Sistema de guiado lineal
<b>Material</b>	Acero resistente a la corrosión
<b>Dureza</b>	La rigidez en estos sistemas de guiado es alta, ya que absorben las fuerzas desde todas las direcciones excepto en la dirección del movimiento.
<b>Recubrimiento</b>	Las guías lineales poseen protección anticorrosiva, mediante un recubrimiento especial.
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	Resisten temperaturas de funcionamiento superiores a 100 °C.



**Figura 25 Sistemas de guiado lineal**

Fuente: (mecapedia, 2016)

## b. Criterio y Selección del subsistema E

Los criterios que se toman en consideración para la selección del sistema de guiado según (schaeffler, 2016) son:

- Capacidad de carga estática y dinámica
- Fácil montaje
- Vida útil nominal
- Precisión de recorrido
- Rigidez
- Velocidad
- Costo
- Material
- Temperatura de funcionamiento

De acuerdo al análisis de las características de cada sistema de guiado en la Tabla 11 y Tabla 12, se procede a cuantificar las características generales para su posterior selección.

**Tabla 13**

### Selección de alternativas del Sistema de Guiado

Características	Alternativa 1	Alternativa 2
Capacidad de carga estática	4	4
Capacidad de carga dinámica	4	4
Montaje	3	3
Vida útil nominal	4	4
Precisión de recorrido	3	3
Rigidez	3	3
Velocidad	4	3
Costo	4	2
Material	3	3

Continúa 

Temperatura de funcionamiento	3	4
<b>TOTAL</b>	<b>35</b>	<b>33</b>

De acuerdo al análisis realizado de los sistemas de guiado en función a la necesidad del diseño de la máquina, la alternativa 1 de la Tabla 13 es la más idónea, no solo por el costo sino por el material y la facilidad de acoplamiento al sistema de movilidad.

Para la selección de este sistema se le acoplará un riel de soporte, el mismo que brinda mayor rigidez y estabilidad en su funcionalidad, como se especificó en la Tabla 11.

### **2.3.6 Subsistema F: Matriz de inserción para corte y embutido**

La fabricación de este tipo de matriz, se la realiza en aceros para trabajar en frío como:

- Acero DF-2=ARNE
- Acero XW-41=SVERVER 21

#### **a. Aceros para trabajo en frío**

##### **Alternativa 1: Acero ARNE=DF2=AISI 01**

Acero al magnesio-cromo-tungsteno, templable en aceite para uso general. Siendo apto para aplicaciones de trabajo en frío. Buena maquinabilidad, estabilidad dimensional en el temple y buena combinación de dureza y tenacidad tras temple y revenido. Suministrado a 190 HB aproximadamente. (BOHMAN, 2015)

#### **Aplicaciones:**

**Tabla 14****Aplicaciones para el acero DF-2=ARNE**

<b>HERRAMIENTAS PARA</b>	<b>ESPESOR DEL MATERIAL</b>	<b>HRC</b>
Corte:	Hasta 3mm	60-62
Cizallado, punzonado, troquelado, desbastado, trozado.	3-6mm 6-10mm	54-60 54-56
Cizallado para trabajar en frío.		54-60
Herramientas de trozado y desbarbado para piezas de forja	caliente frío	58-60 56-58
Conformado		
Doblar, acuñar, embutición profunda, repujado y conformado por estirado.		56-62
Troqueles pequeños de acuñar en frío, expulsores, brocas Y machos de rosca de tamaña pequeño y mediano.		56-60

Fuente: (BOHMAN, 2015)

**Alternativa 2: Acero XW-41 = SVERVER 21 = AISI D2**

Según (BOHMAN, 2015), este tipo de acero es para herramientas con alto contenido de carbón y cromo, aleado con molibdeno y vanadio, principalmente caracterizado por:

- Alta resistencia al desgaste y a la compresión
- Propiedades buenas al temple, excelente estabilidad tanto en el núcleo como en la superficie del material
- Buena resistencia al revenido
- Dureza de suministro: 210 HB

**Aplicaciones**

Se sugiere el uso de este tipo de acero, para herramientas que se comprometan a una resistencia muy alta al desgaste, compuesta con una tenacidad moderada. Además de las aplicaciones relacionadas al XW5, también se emplean para cortar materiales más gruesos y duros y en herramientas, para

dar formas expuestas a esfuerzos de flexión y cargas de impacto. (BOHMAN, 2015)

**Tabla 15**

**Aplicaciones para el acero XW-41 = SVERVER 21 = AISI D2**

<b>CORTE</b>	<b>ESPESOR DEL MATERIAL</b>	<b>DUREZA DEL MATERIAL &lt; 180HB HRC</b>	<b>DUREZA DEL MATERIAL &gt; 180HB HRC</b>
Herramientas para corte, corte fino, punzonado, cizallado, desbarbado	<3mm 3-6mm	60-62 58-60	58-60 54-56
Cizallas cortas para trabajar en frío, cuchillas para Corte en plástico, cuchillas de molinos granuladores.			
Cizallas circulares			
Herramientas de tronzado y desbarbado para piezas de forja en caliente			56-60
en frío			58-60
fresas para madera, escariadoras			56-58
Herramientas para:			58-60
Doblar, acuñar, embutición profunda, repujado y conformado por estirado			56-62
Troqueles de acuñar en frío			56-60
Sufrideras para prensado en frío			56-60
Estampas para prensado en frío			56-60
Laminadores para tubos y laminado de secciones, laminadoras planas			58-62
Sufrideras para el conformado de materiales cerámicos, ladrillos, azulejos,			58-62
Muelas de afilado, tabletas, plásticos abrasivos.			56-60
Herramientas para el laminado de roscas			
Herramientas para estampado en frío			

Fuente: (BOHMAN, 2015)

La matriz adquirida para el desarrollo del proyecto está fabricada con el acero de la alternativa 2, debido a que sus propiedades mecánicas, se ajustan a los requerimientos del sistema mecatrónico, especialmente en el proceso de inserción de la máquina.

### 2.3.7 Subsistema G: Sistema de alimentación de cerdas flexibles

Para el sistema alimentador de cerdas flexibles se prevé de dos alternativas las cuales son:

- Alimentador lineal por gravedad
- Alimentador circular por gravedad

#### a. Alternativas de diseño del Subsistema G

##### Alternativa1: Alimentador lineal por gravedad

Los alimentadores por gravedad son los más precisos, puesto que controlan la masa final del producto a suministrar, por tanto, su retroalimentación constituye la herramienta clave para corregir defectos de dosificación que pueden surgir debido al tipo de producto en sí. Al ser un sistema de tipo lineal su construcción es de fácil acceso al utilizar únicamente un pistón para su movimiento principal.



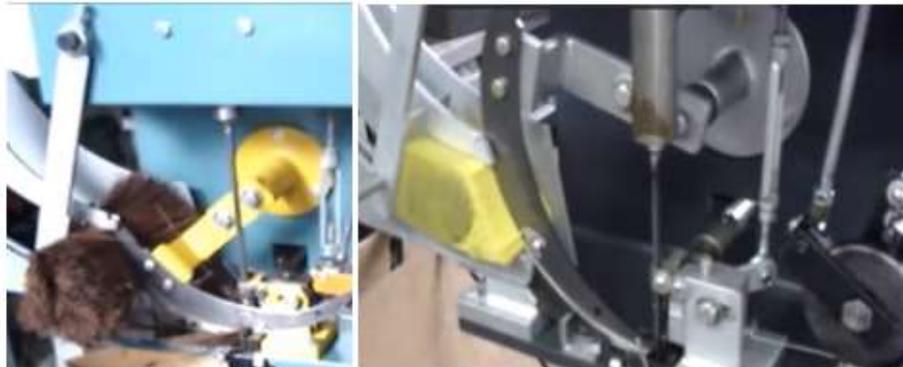
**Figura 26 Dosificador lineal por gravedad**

Fuente: (Bean Boozled Channel, 2015)

En la Figura 26, el mecanismo alimentador de tipo lineal consta de una estructura mecánica base, que dispone de un contenedor de material, un actuador neumático (pistón) para su movimiento y una guía en la parte superior e inferior, para evitar el descarrilamiento del material.

## Alternativa 2: Alimentador circular por gravedad

Este tipo de alimentador al igual que el alimentador de la alternativa 1 (Alimentador lineal por gravedad) permite controlar el flujo del material requerido y es una herramienta clave para el proceso, su construcción requiere de un árbol de levas, seguidores y engranes que se encuentren acopladas a un solo motor para permitir el movimiento de todo el mecanismo de la máquina.



**Figura 27 Alimentador circular por gravedad**

Fuente: (Pozzimaq, 2013)

En la Figura 27, se puede observar el mecanismo alimentador circular por gravedad, el mismo que consta de un arco de tipo radial, un contra arco de tipo radial, un brazo radial, un contenedor de material y un mecanismo interior leva-seguidor.

### b. Criterios y Selección del Subsistema G

Los criterios que se toman en consideración para la selección del sistema de alimentación de cerdas flexibles, acorde a nuestros requerimientos son:

- Costo
- Estética
- Accesibilidad de fabricación
- Precisión

- Implementación
- Rigidez
- Mantenimiento del sistema
- Mecanismo de desplazamiento

**Tabla 16**

**Selección de alternativas del sistema de alimentación de cerdas flexibles**

<b>Criterios</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>
Costo	4	3
Estética	4	4
Fabricación	4	3
Precisión	4	4
Implementación	4	2
Rigidez	4	4
Mantenimiento	4	4
Mecanismo de desplazamiento	4	2
<b>TOTAL</b>	<b>32</b>	<b>26</b>

Como se puede observar en la Tabla 16, la alternativa 1 obtiene la mayor puntuación, ya que su fabricación es de fácil acceso, además su costo de implementación es relativamente menor a la alternativa 2 y su montaje para el proceso de inserción, es mucho más compacto y funcional.

La alternativa 1 es mucho más ajustable a propósitos inventivos, ya que la fuerza externa puede ser propiamente manual o generada a través de un actuador lineal y al ser parte del proceso de inserción, los cilindros neumáticos se emplearán como actuadores lineales.

### **2.3.8 Subsistema H: Tarjeta de control**

Este apartado se refiere a la tarjeta electrónica, que se encargará de controlar el funcionamiento de todos los actuadores antes mencionados, los

sensores de proximidad que se detallarán a continuación y también la correcta comunicación serial con la tarjeta empleada para el sistema de visión artificial, que con anterioridad fue seleccionada.

#### **a. Alternativas de diseño del Subsistema H**

Para la tarjeta de control a emplearse se ha previsto de dos opciones tentativas, que son:

- Tarjeta Arduino
- PLC (Controladores Lógicos Programables)

#### **Alternativa 1: Tarjeta Arduino**

La tarjeta Arduino es una placa que tiene como principal elemento un micro controlador, diseñada y enfocada al ámbito educativo, también facilita el desarrollo de proyectos mediante el uso de la programación y la electrónica, además de disponer de una plataforma de software libre. (arduino.cl, 2017)



**Figura 28 Tarjeta Arduino**

Fuente: (arduino.cl, 2017)

#### **Ventajas**

El emplear tarjetas Arduino para proyectos de niveles medios y avanzados presenta grandes ventajas como son:

- Disponibilidad inmediata en el mercado nacional

- Costo accesible
- El entorno de programación se ajusta a principiantes y usuarios avanzados
- El software Arduino dispone de varias librerías que aportan de manera significativa al programador
- La tarjeta arduino está constituido por los microcontroladores ATMEGA 8 y ATMEGA 16 de Atmel
- El software de Arduino se puede ejecutar en varios S.O. como Windows, GNU/Linux, etc.

### **Alternativa 2: Controladores Lógicos Programables (PLC)**

El PLC como se puede observar en Figura 29, es un dispositivo electrónico programable por el usuario y se utiliza mucho en la industria ya que permite automatizar y resolver problemas de secuencias en varios procesos industriales, aumentando de esta manera la confiabilidad de los módulos industriales. (abcinnova, 2017)



**Figura 29 PLC**

Fuente: (abcinnova, 2017)

El PLC es un microprocesador más robusto, en otras palabras se puede asemejar a una computadora de tipo industrial, dentro de sus características más sobresalientes, cuenta con una unidad central de procesamiento (CPU),

interfaces de comunicación y diversos puertos de entrada y salida de tipo digital o análogo.

Las características principales de un PLC según (ingenieriaelectronica.org, 2017), son:

- Están diseñados para automatizar procesos
- Son programables
- Son robustos y están diseñados para resistir ambientes industriales (vibraciones, altas temperaturas, humedad y ruido)

## b. Criterios y Selección del Subsistema H

**Tabla 17**

### Selección de alternativas de la tarjeta de control

<b>Criterios</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>
Costo	4	2
Disponibilidad	4	3
Compatibilidad	4	3
Robustez	3	4
Programación	4	4
<b>TOTAL</b>	<b>19</b>	<b>16</b>

La alternativa 1 de la Tabla 17, obtiene la mayor puntuación dado que para la selección de la tarjeta de control uno de los criterios más importantes es el costo del mismo, ya que el presupuesto de la máquina es limitada se ha seleccionado el uso de una tarjeta Arduino, específicamente la tarjeta Arduino Mega 2560, la misma que es compatible en cuanto a comunicación por puertos USB con la tarjeta Raspberry pi 3.

La accesibilidad de esta tarjeta, es otro punto a considerar dado que en el mercado nacional su oferta es muy abastecida y en cualquier tienda electrónica se la puede obtener.

## **2.4 Actuadores**

El desarrollo del proyecto consta de dos tipos de actuadores, siendo los primeros los actuadores eléctricos, encargados de proporcionar el movimiento lineal a la estructura de la base, conocida como ménsula, es decir propiamente estos actuadores serán motores DC. Para el movimiento del sistema de inserción dado que se requiere de movimientos lineales precisos y de gran fuerza, se emplearán actuadores neumáticos, por la facilidad y disponibilidad de uso de un compresor.

### **2.4.1 Alternativas de selección de Actuadores eléctricos**

En las máquinas herramientas de control numérico, se disponen de 3 tipos de actuadores eléctricos como son: motores AC, servomotores DC y motores a pasos. (Chancusi & Navarrete Paúl, 2014)

Las siguientes alternativas serán examinadas a favor de poseer un control más estable y una potencia de funcionamiento óptima.

- Servomotores DC
- Motores a pasos

#### **a. Alternativa 1: Servomotores DC**

Un servomotor es un motor de corriente continua que incorpora un sensor para conocer su posición o velocidad. También puede incorporar un engranaje para disminuir su velocidad y aumentar su fuerza. Los servomotores con encoder absoluto pueden detenerse en cualquier posición deseada. También permiten hacer movimientos precisos de un elemento móvil de una máquina. (Nieto, 2013)



**Figura 30 Izq. Servomotor Industrial. Der. Servomotores convencionales**

Fuente: (Nieto, 2013)

Existen servomotores de pequeño tamaño, que incorporan un circuito electrónico que interpreta una señal entregada, forjan el giro del motor hasta una posición concreta. En la industria es más habitual que el servomotor solamente incorpore el motor y el encoder, siendo un regulador externo el que procese la información. Estos servomotores se los puede observar en la figura anterior. (Nieto, 2013)

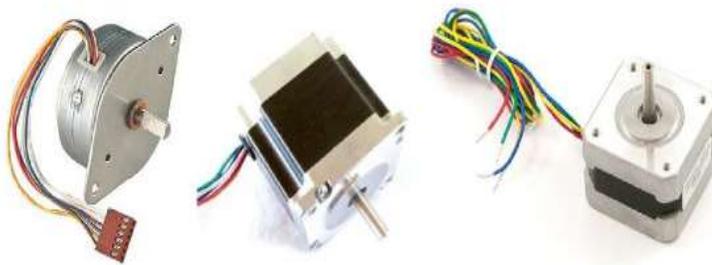
#### **b. Alternativa 2: Motores paso a paso (PAP)**

En (Nieto, 2013), los motores paso a paso, también llamados brushless porque no utilizan escobillas, constan de una combinación de imán permanente en el rotor, y varias bobinas en el estator. Cuando se aplica corriente continua a estas bobinas, el motor se desplaza hasta una posición fija. El movimiento rotativo se consigue aplicando tensión secuencialmente a cada bobina, mediante un controlador electrónico. El controlador puede detenerse al motor en cualquier posición deseada. Este sistema permite movimientos de precisión, al conocer en la posición angular del eje del motor.

Los motores PAP según (Nieto, 2013), son empleados en:

- Maquinaria de precisión
- Impresoras o escáneres

- Sustitutos de pequeños motores DC



**Figura 31 Motores PAP**

Fuente: (Nieto, 2013)

### c. Selección de alternativa para motores

Existen algunos factores a tomar en cuenta en la selección de los motores, sean estos servomotores o por motores PaP:

- Costo
- Velocidad
- Torque
- Mantenimiento
- Precisión
- Disponibilidad

**Tabla 18**

#### **Criterios de selección de los motores**

<b>Criterios</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>
Costo	3	4
Velocidad	4	3
Torque	3	4
Mantenimiento	3	4
Precisión	4	3
Disponibilidad	3	4
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>22</b>

En la Tabla 18, la alternativa 2 presenta una mayor valoración, por lo tanto los actuadores eléctricos a emplearse serán los motores PaP y en apartados posteriores se realizarán los cálculos respectivos para la selección del torque de cada uno de los motores a emplearse.

## **2.5 Sensores de proximidad**

Estos sensores conocidos generalmente como finales de carrera, son los encargados de dar la orientación inicial en los ejes X, Y, Z a toda la máquina.

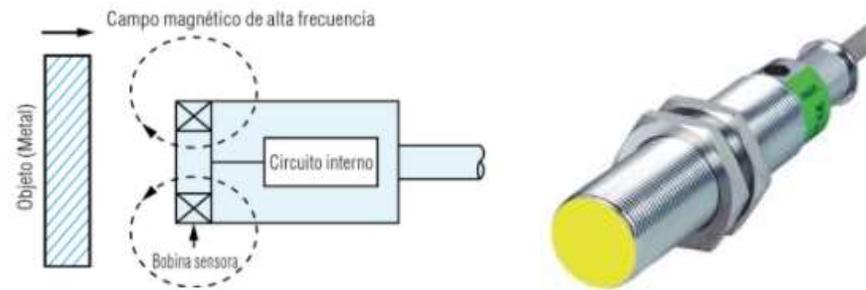
### **2.5.1 Alternativas de selección de sensores de proximidad**

En el mercador existen varios tipos de sensores de proximidad como:

- Sensores inductivos
- Sensores capacitivos
- Sensores electromecánicos

#### **a. Alternativa 1: Sensores inductivos**

Un sensor de proximidad inductiva es aquel instrumento que puede detectar objetos metálicos sin tener contacto algún físico. Los sensores de proximidad inductivos, se encasillan en los siguientes tres tipos, de acuerdo con su principio de funcionamiento: el tipo de oscilación de alta frecuencia que aprovecha la inducción electromagnética, el tipo magnético que recurre a un imán y el tipo de capacitancia, que aprovecha las alteraciones en la capacidad eléctrica. (Keyence, 2017)

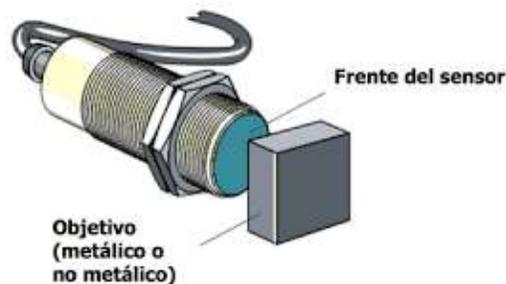


**Figura 32 Sensor inductivo**

Fuente: (Keyence, 2017)

### b. Alternativa 2: Sensores capacitivos

Según (Ingeniería mecafenix, 2017), el sensor capacitivo es un elemento que funciona como un interruptor electrónico, que trabaja sin contacto y se benefician del efecto que tienen varios materiales de amplificar la capacidad del sensor cuando se encuentran dentro del campo eléctrico generado, en materiales como: el papel, aceite, vidrio, plástico, agua, metales.



**Figura 33 Sensores capacitivos**

Fuente: (Ingeniería mecafenix, 2017)

### c. Alternativa 3: Sensores electromecánicos

Son sensores muy utilizados por su disponibilidad y costo accesible en el mercado nacional, este tipo de sensores necesitan de un contacto con el objeto ya que funcionan como interruptor y generan una señal eléctrica ante la presencia del movimiento mecánico. Se conocen como "interruptores de final de carrera" ya que en un inicio se los empleaba para definir el inicio o final del

recorrido de un objeto para posteriormente darle una ubicación específica al mismo. (Caniparoli, 2017)



**Figura 34 Sensor electromecánico**

Fuente: (Caniparoli, 2017)

#### **d. Selección de alternativas de sensores de proximidad**

Para la construcción del proyecto, el costo de cada elemento es un factor de selección muy importante, tanto como la accesibilidad inmediata del mismo en el mercado nacional, por lo que se han seleccionado los sensores electromecánicos como finales de carrera, debido a su disponibilidad y facilidad de implementación, además de que requieren un acondicionamiento simple.

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO MECATRÓNICO DE LA MÁQUINA**

El presente capítulo abarca todo el desarrollo mecatrónico de la máquina, es así que el mismo comprende el diseño y el análisis de la parte mecánica, electrónica y de software.

#### **3.1 Diseño mecánico de la estructura**

Todo tipo de estructura debe diseñarse para que sea segura y funcione satisfactoriamente durante su uso pretendido, sin que los componentes que soportan las diversas cargas no fallen en ruptura o fractura.

Según (Mott R. L., 2009), al momento de realizar un análisis estructural como diseñadores debemos hacernos una lista de preguntas siguientes:

- Peso y tamaño físico del sólido a soportar
- Centro de gravedad del sólido
- Tipo de unión entre componentes
- Material y resistencia de los componentes
- Forma y tamaño de la sección transversal de los componentes a soportar la carga
- Tipo de carga a soportar
- Ciclos de carga

En el diseño mecánico del presente proyecto, éste debe exhibir un diseño establecido con materiales disponibles en el país y otros accesibles fuera del mismo. Es así que en primera instancia es necesario seleccionar los materiales con los que se desarrollará la parte mecánica de la máquina.

### 3.1.1 Selección de materiales

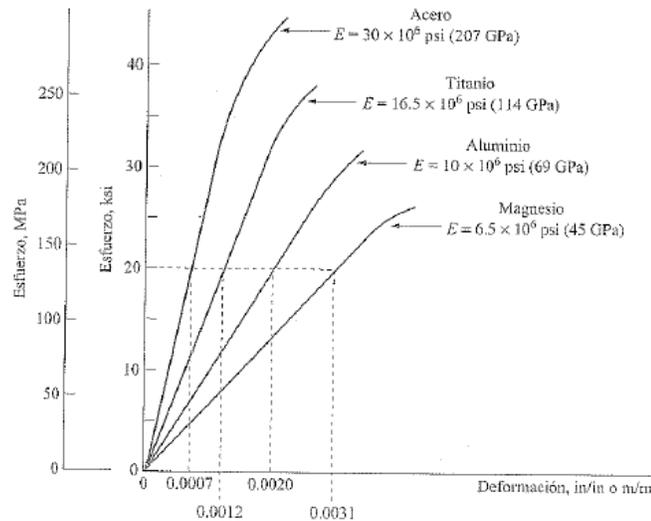
Según (RDSolutions3D, 2017), una de las fases críticas durante el proceso de diseño y desarrollo de una máquina, es la selección del material para cada elemento del producto a fabricarse. A esta elección, no sólo se le exige su funcionalidad, fiabilidad, acabado superficial y durabilidad, también se consideran los aspectos más importantes que resultan ser restricciones como: la disponibilidad del material, el coste de la materia prima, la posibilidad y el costo del procesado final.

Según (Mott R. L., 2009), para la selección de un material se requiere de la consideración de muchos factores, tales como:

- Resistencia
- Rigidez
- Ductilidad
- Maquinabilidad
- Soldabilidad
- Apariencia
- Costo
- Disponibilidad
- Peso

Dentro de dichos factores y dado la aplicación del proyecto, éste se enfocará en los siguientes parámetros: disponibilidad del material, resistencia, rigidez, ductilidad, peso y costo. Según (Mott R. L., 2009), los materiales dúctiles se prefieren para piezas que soportan cargas repetidas o que se someten a cargas de impacto, porque en general son más resistentes a la falla por fatiga y

también absorben de mejor manera la energía de impacto. La rigidez de un material es una función del módulo de elasticidad, conocido como módulo de Young, se puede observar el módulo de elasticidad de algunos metales en la Figura 35.

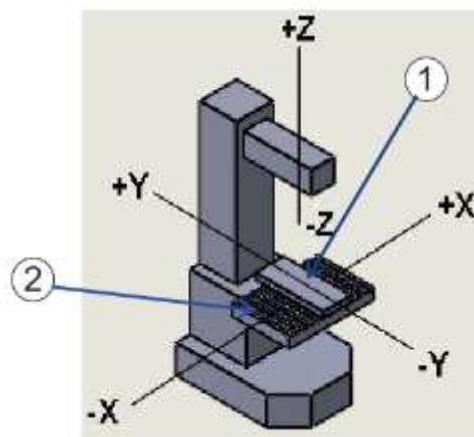


**Figura 35 Módulo de elasticidad de diferentes metales**

Autor: (Mott R. L., 2009)

La resistencia y la ductilidad de un material se ven comprometidas al momento de seleccionar los materiales, ya que los materiales de alta resistencia tienden a tener menor ductilidad, por lo mismo si el material es mucho más rígido tiende a ser menos dúctil. De la misma manera las partes sometidas a cargas, choques o impactos repentinamente aplicados, requieren de un alto nivel de tenacidad.

El diseño estructural para los ejes de movimiento de la Figura 36, es el diseño preseleccionado en el apartado (2.3.3 Subsistema C: Estructura), que se basa el proyecto a desarrollarse, es así que se puede denotar que existen dos mesas bases que las denominaremos mesa superior y mesa inferior. La mesa superior es la encargada de contener a cada matriz base para los procesos de visión, perforación e inserción.



**Figura 36 Estructura para el sistema de movimiento (Ejes X e Y)**

*Elementos: (1) Mesa superior, (2) Mesa inferior.*

Para la selección del material de la mesa superior es necesario comparar las propiedades mecánicas de los materiales candidatos dada la aplicación requerida, el caso más crítico es soportar los esfuerzos por parte del actuador lineal en el proceso de inserción.

**Tabla 19**

**Materiales tentativos**

<b>MATERIAL</b>	<b>Resistencia a la cedencia (MPa)</b>	<b>Peso especifico (<math>\frac{KN}{m^3}</math>)</b>	<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>	<b>Disponibilidad</b>
<b>ACERO ASTM A36</b>	250	76.93	200	Si
<b>ALUMINIO 6061</b>	145	26.46	69	Si
<b>Duralón (UHMW)</b>	20 - 40	9.1	0.7	Si

Continúa 

<b>MADERA</b>	5.5	3.9	12.4	Si
---------------	-----	-----	------	----

La selección de material para la mesa superior es el aluminio 6061 ya que presenta una resistencia a la cedencia mucho mayor al duralón (polietileno de ultra alto peso molecular) y aunque su costo es elevado en comparación con el acero, al solo requerir una muestra de dimensiones pequeñas su costo es muy accesible, además cabe recalcar que el peso en comparación con el acero es mucho más liviano y le da un mayor realce en su presentación.

La mesa inferior debe abarcar las dimensiones de la mesa superior, por lo que al requerir de una muestra de dimensiones más grandes, se opta por el duralón como material de selección en lugar del aluminio, debido a que en comparación con el aluminio es mucho más barato y liviano, también presenta buena ductilidad, resistencia y disponibilidad inmediata, además la mesa inferior recibe los esfuerzos del actuador en una menor proporción.

El acero estructural ASTM A36 es el material seleccionado para la construcción de los brazos de soporte de los procesos de perforación e inserción, ya que éstos soportaran grandes cargas y requieren del material más robusto y resistente, el costo de adquisición es accesible y su disponibilidad es inmediata, además de presentar muchas dimensiones en perfilería estructural.

La mesa base debe soportar todo el peso de la mesa inferior y superior, así como también las cargas adicionales de las rieles guías, motores, brazos de soporte y otros componentes adicionales para el montaje de los procesos requeridos, por lo que la selección del material para la construcción de esta estructura es el acero estructural ASTM A36, ya que es el material más rígido, robusto y resistente en el mercado, además de ser adecuado para soportar cargas pesadas y como se mencionó con anterioridad en el mercado nacional presenta disponibilidad inmediata en perfiles y tubería cuadrada o rectangular ya sea el requerimiento del diseñador.

En la Tabla 20 se muestra un resumen de cada componente a elaborarse con su respectivo material a emplearse.

**Tabla 20****Material seleccionado para la construcción de los componentes**

<b>Componente</b>	<b>Material</b>
<b>Mesa superior</b>	Aluminio
<b>Mesa Inferior</b>	Duralón (UHMW)
<b>Brazos de soporte</b>	Acero estructural ASTM A36
<b>Mesa Base</b>	Acero estructural ASTM A36

**3.1.2 Diseño y análisis de la estructura**

De acuerdo a la alternativa seleccionada en el Numeral 2.3.3 (Estructura tipo fresadora de 3 ejes), esta cuenta con una mesa o ménsula que posee movimientos longitudinales y transversales a lo largo de sus ejes X e Y respectivamente.

Como se pudo observar en la Figura 36 el diseño parte del eje transversal Y debido a que este soportará directamente los esfuerzos producidos por el proceso de perforación y aún más importante el proceso de inserción donde evidentemente se generan mayores esfuerzos debido a las cargas repetidas que se produce por el actuador lineal encargado de insertar la grapa en la matriz base.

En este apartado se procede a calcular las dimensiones de los ejes guías pertenecientes a la mesa superior e inferior y su respectivo análisis de esfuerzos, para de esta manera asegurar el diseño de cada uno y garantizar que no exista deformación excesiva y no inutilice el funcionamiento de la máquina. Según (Mott R. , 2006) al finalizar los cálculos de los esfuerzos de cada elemento se deben comparar con el esfuerzo de diseño del material previamente seleccionado.

Al emplear materiales dúctiles como previa selección en la construcción del proyecto, la Tabla 21 muestra los factores de diseño que existen para este tipo de materiales.

**Tabla 21**  
**Factor de diseño para materiales dúctiles**

<b>Materiales Dúctiles</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Factor de Diseño</b>
Diseño de estructuras bajo cargas estáticas	1.25 – 2.0
Diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas	2.0 – 2.5
Diseño de estructuras estáticas bajo cargas dinámicas	2.5 – 4.0

Fuente: (Mott R. L., 2009)

Se emplea la ecuación [ 1 ] para calcular el esfuerzo de diseño con un factor de diseño de 3, que según (Mott R. , 2006) es un factor de diseño típico del diseño general de maquinaria, además es un factor aceptable (ver Tabla 21), ya que el análisis parte de una estructura estática, que en procesos siguientes se encontrará expuesta a cargas repetidas.

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad [ 1 ]$$

Donde:

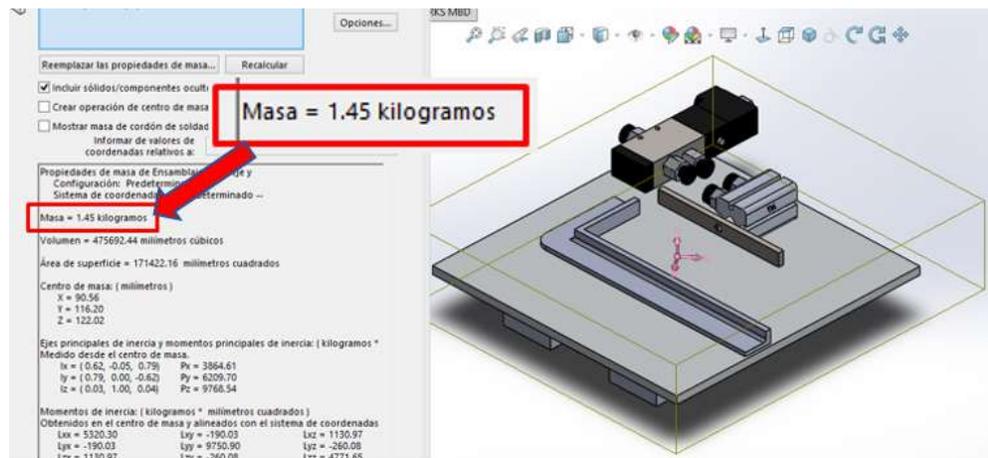
$S_y$ : Resistencia a la cedencia del acero inoxidable: 276 MPa. (ver Anexo A)

$$\sigma_d = \frac{276 \text{ MPa}}{3}$$

$$\sigma_d = 92 \text{ MPa}$$

### 3.1.3 Diseño del eje transversal Y

Para calcular y determinar la dimensión del eje Y, es necesario realizar que el mismo se encuentra sometido principalmente a una carga concentrada normal directa, debido a los pesos o masas que soporta. En la Figura 37 se puede observar el diseño CAD de la mesa superior ya con sus respectivos componentes y con ayuda del software CAD, se puede obtener la masa total de los mismos que es de 1.45 kg.



**Figura 37 Masa total de la mesa superior**

Para calcular el peso total de la mesa superior empleamos la ecuación [ 2 ].

$$F = m_{Ty} * g \quad [ 2 ]$$

Donde:

*F*: Fuerza que actua en el eje Y

*m<sub>Ty</sub>*: Masa total de la mesa superior

*g*: gravedad

$$F = (1.45 \text{ Kg}) * (9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

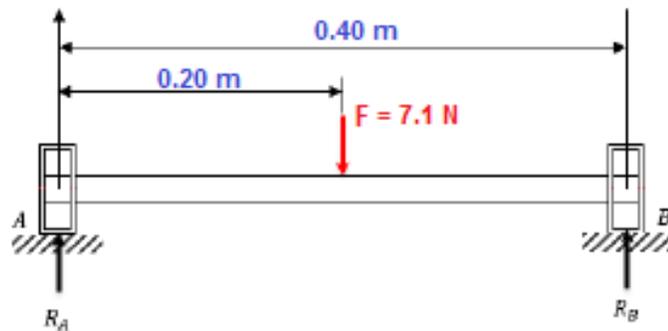
$$F = 14.21 \text{ N}$$

El peso total que soportará el eje Y es de 14.21 N, por lo que cada eje guía soportará un peso dividido de 7.1 N. De acuerdo al espacio físico requerido de la

estructura de la máquina, el eje guía debe tener una longitud específica de 0.40 m.

Como se especificó en puntos anteriores (ver Tabla 11), el sistema de guiado no solo dispone de un eje guía, en su selección se determinó que este eje se encuentra reforzado por un riel de aluminio, sin embargo para realizar los cálculos en el diseño del eje se toma únicamente el eje guía, tomándolo como una viga simplemente apoyada, que soporta una carga transversal perpendicular a lo largo de su eje.

En la Figura 38 se puede observar el diagrama de cuerpo libre del eje Y, por lo que se procede a calcular la magnitud de cada una de las reacciones que actúan en los apoyos, mediante la sumatoria de fuerzas y la sumatoria momentos flectores.



**Figura 38 Diagrama de cuerpo libre del eje Y**

- **Sumatoria de Fuerzas en coordenadas Y:**

$$\sum F_y = 0$$

$$+R_A - F + R_B = 0$$

$$R_A + R_B = 7.1 \text{ N}$$

- **Sumatoria de Momentos en el punto A:**

$$\sum M_A = 0$$

$$\begin{aligned}
 -F * (0.20 \text{ m}) + R_B * (0.40 \text{ m}) &= 0 \\
 =-(7.1 \text{ N}) * (0.20 \text{ m}) + R_B * (0.40 \text{ m}) &= 0
 \end{aligned}$$

$$\rightarrow R_B = 3.55 \text{ N}, R_A = 3.55 \text{ N}$$

El momento flector máximo actúa en la mitad de la viga AB, tal como se muestra en la figura anterior, por lo que se procede a calcular dicho valor mediante la ecuación [ 3 ].

$$M_{max} = \frac{F * L}{4} \quad [ 3 ]$$

Donde:

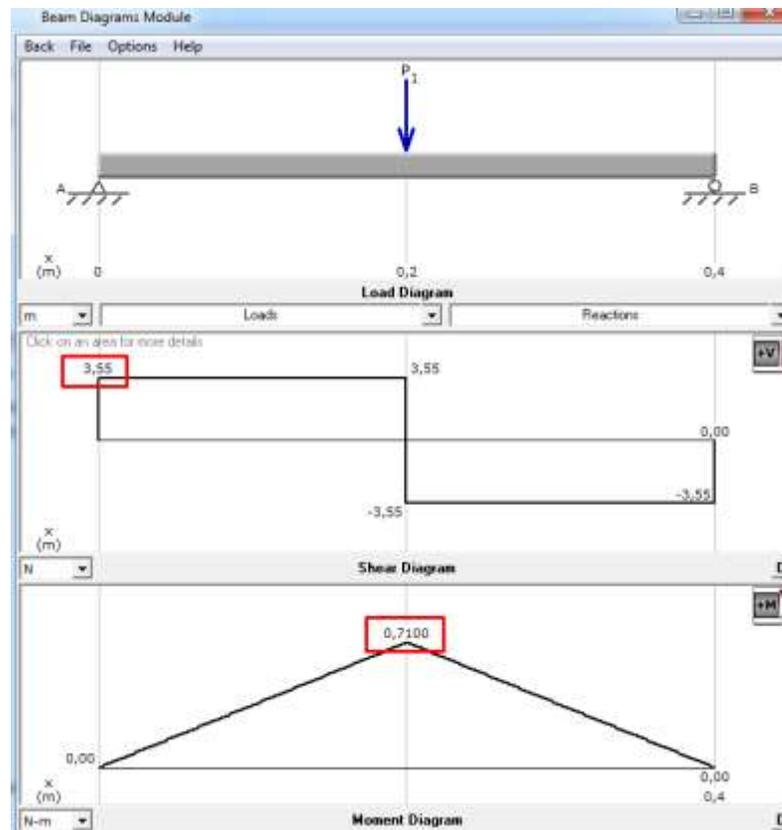
$M_{max}$ : Momento flector máximo

$L$ : longitud del eje

$$M_{max} = \frac{(7.1 \text{ N}) * (0.40 \text{ m})}{4}$$

$$M_{max} = 0.71 \text{ Nm}$$

En la Figura 39, se comprueban los valores calculados empleando el software MDSolids, el mismo que permite visualizar todos los diagramas correspondientes al análisis de fuerza cortante y momento flexionante. Es necesario corroborar los valores calculados ya que estos se requieren para cálculos posteriores.



**Figura 39 Diagramas del eje Y para cargas estáticas**

Para proceder a calcular el diámetro requerido del eje guía es necesario emplear dos ecuaciones, la primera (ver ecuación [ 4 ]) permite encontrar el esfuerzo máximo de un elemento y la segunda ecuación (ver ecuación [ 5 ]) se emplea para el cálculo del módulo de sección, en este caso es para una sección transversal circular.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad [ 4 ]$$

$$S = \frac{\pi * D^3}{32} \quad [ 5 ]$$

Al reemplazar y despejar de las ecuaciones anteriores el término del diámetro requerido se obtiene la ecuación [ 6 ].

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * M * N}{\pi * S_y}} \quad [6]$$

Donde:

*D: Diámetro Requerido*

*M: Momento flector máximo*

*S<sub>y</sub>: Resistencia a la fluencia del acero inoxidable. (ver Anexo A)*

*N; Factor de seguridad = 3*

$$D = \sqrt[3]{\frac{32. (0.71 N. m). (3)}{\pi. (276 MPa)}}$$

$$D = 0.0082837 m$$

$$D \geq 8.28 mm$$

El diámetro calculado debe ser mayor a 8.28 mm, al seleccionar un diámetro mayor el diseño es mucho más seguro ya que los esfuerzos máximos generados son inversamente proporcionales a este dato. En ocasiones el sobrediseñar intencionalmente un componente es necesario, siempre y cuando este no afecte las condiciones de servicio del componente, es así que se opta por un eje guía de diámetro de 12 mm ya que son las dimensiones más accesibles del eje.

Se considera al eje y, como una barra con apoyos fijos y carga central para determinar la deformación máxima existente por medio de la ecuación [ 7 ].

$$y_{max} = -\frac{F_y \cdot l_y^3}{192 \cdot E \cdot I_y} \quad [7]$$

Donde:

*y<sub>max</sub> = Deflexión máxima para el eje*

*F<sub>y</sub> = Fuerza máxima ejercida en cada eje = 7.1 N*

$l_y = \text{Longitud del eje} = 0.4 \text{ m}$

$E = \text{Módulo de elasticidad del acero inoxidable} = 192 \text{ GPa}$

$I_y = \text{Momento de inercia de la sección circular del eje}$

$$I_y = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \quad [ 8 ]$$

$$I_y = \frac{\pi \cdot (0.012)^4}{64}$$

$$I_y = 1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$\rightarrow y_{max} = - \frac{(7.1 \text{ N}) \cdot (0.4 \text{ m})^3}{192(192 \text{ GPa}) \cdot (1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^4)}$$

$$y_{max} = -1.20 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$y_{max} = -1.20 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

#### a. Prueba de diseño de los ejes de la mesa superior

Se realiza dos tipos de pruebas de diseño para dos tipos de cargas existentes, la primera es para una carga estática ya que es el peso completo que soporta el eje lineal y una segunda prueba debido a una carga externa que se añade de manera repetida, esto ocurre en el proceso de inserción ya que es la parte más crítica y necesaria para corroborar el diseño establecido.

#### a. Carga estática

Para comprobar si el diseño es seguro se emplea la ecuación [ 9 ] para calcular el esfuerzo máximo que se produce en el eje ya con el valor del diámetro establecido ( $D: 0.012 \text{ m}$ ).

$$\sigma_{max} = \frac{32 \cdot M_{max}}{\pi \cdot D^3} \quad [ 9 ]$$

Donde:

$M_{max}$ : Momento flector máximo calculado

$$\sigma_{max} = \frac{32 * (0.71 \text{ Nm})}{\pi * (0.012 \text{ m})^3}$$

$$\sigma_{max} = 4.19 \text{ MPa}$$

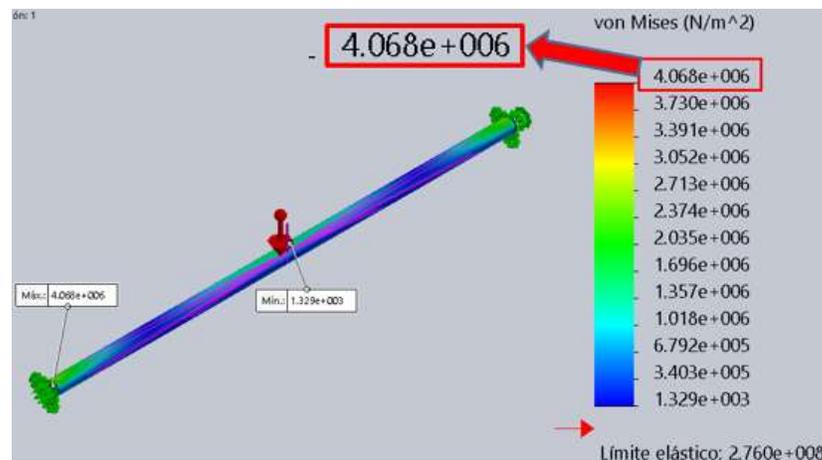
Como se mencionó anteriormente el esfuerzo de diseño debe ser mayor al esfuerzo máximo, es decir;

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$92 \text{ MPa} \geq 4.19 \text{ MPa}$$

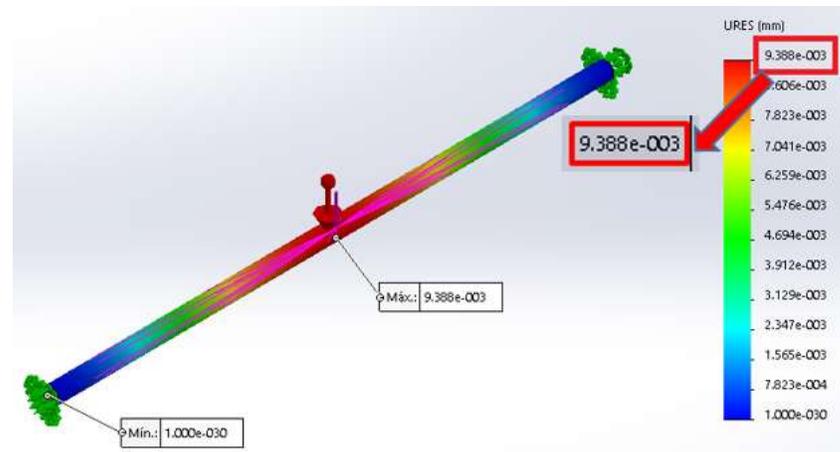
De esta manera se comprueba que el diseño del eje guía es más que seguro para la carga estática que soporta. Con ayuda del software CAD se procede a comprobar los valores de los esfuerzos máximos, que son resultado de cálculos teóricos, asegurando de esta manera un diseño completamente seguro.

El esfuerzo máximo (von Mises) de la Figura 40 calculado por el software es de  $4.068 \times 10^6 \text{ Pa}$ , valor similar al esfuerzo máximo calculado teóricamente, garantizando el diseño propuesto.



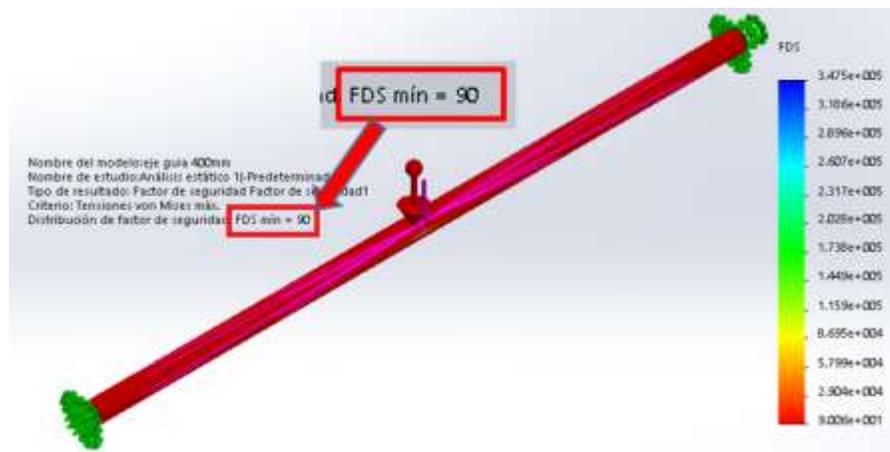
**Figura 40. Análisis de esfuerzos en el eje Y**

La Figura 41 correspondiente al gráfico URES (Desplazamientos resultantes) de CAD, establece la deformación máxima que se producirá en el eje, de acuerdo al cálculo del software éste dato es de  $9.388 \times 10^{-3} \text{ mm} = 0.009 \text{ mm}$ , similar a valor calculado de forma matemática. Por lo tanto la deflexión es tolerable para que el sistema trabaje de forma apropiada.



**Figura 41. Análisis de Desplazamiento máximo en el eje Y**

El factor de diseño (FDS) de la Figura 42 es superior al establecido, lo cual garantiza el diseño en su totalidad permitiendo el correcto funcionamiento del mismo sin estar sujeto a flexiones indeseables.



**Figura 42. Análisis del factor de seguridad en el eje Y**

### **b. Carga repetida**

El proceso de inserción genera una carga externa al peso total que soporta el eje guía, dicha carga se genera debido a que debe ingresar la grapa ya formada conjuntamente con las cerdas flexibles en la matriz base que soporta la base superior, esta carga tiene una presión de aproximadamente 7 bares considerando que pérdidas mínimas y se la considera como una carga aplicada repetidamente. La presión de acción para diseño se la toma de 7 bares, ya que

es la presión de alimentación máxima que genera el compresor para el sistema de inserción.

Entonces:

$$7 \text{ Bar} * \frac{1.01972 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}}{1 \text{ Bar}} = 7.138 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

Se tiene como dato que existe una presión de 7.138 kilogramos fuerza por  $\text{cm}^2$  que actúa en la mesa superior, se calcula dicha fuerza en N:

$$7.138 \text{ Kgf} * \frac{9.8 \text{ N}}{1 \text{ Kgf}} = 69.95 \text{ N}$$

Para obtener la fuerza total que actúa en el eje guía se emplea la ecuación [ 10 ].

$$F_{eje} = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad [ 10 ]$$

Donde:

$F_1$ : Fuerza estática que actúa en el eje Y

$F_2$ : Fuerza repetida que actúa en el eje Y

$$F_{eje} = \frac{14.21 \text{ N} + 69.95 \text{ N}}{2}$$

$$F_{eje} = 42.08 \text{ N}$$

La carga neta que actúa en el eje es de 42.08 N, como en los anteriores cálculos de igual manera se encuentran las reacciones y momentos flectores (Figura 38 Diagrama de cuerpo libre del eje Y), por lo tanto empleando el software MDSolids como se muestra en la Figura 43 se obtiene el momento flector máximo que es el dato necesario para usar la ecuación [ 9 ] y calcular el nuevo esfuerzo máximo que se está generando.

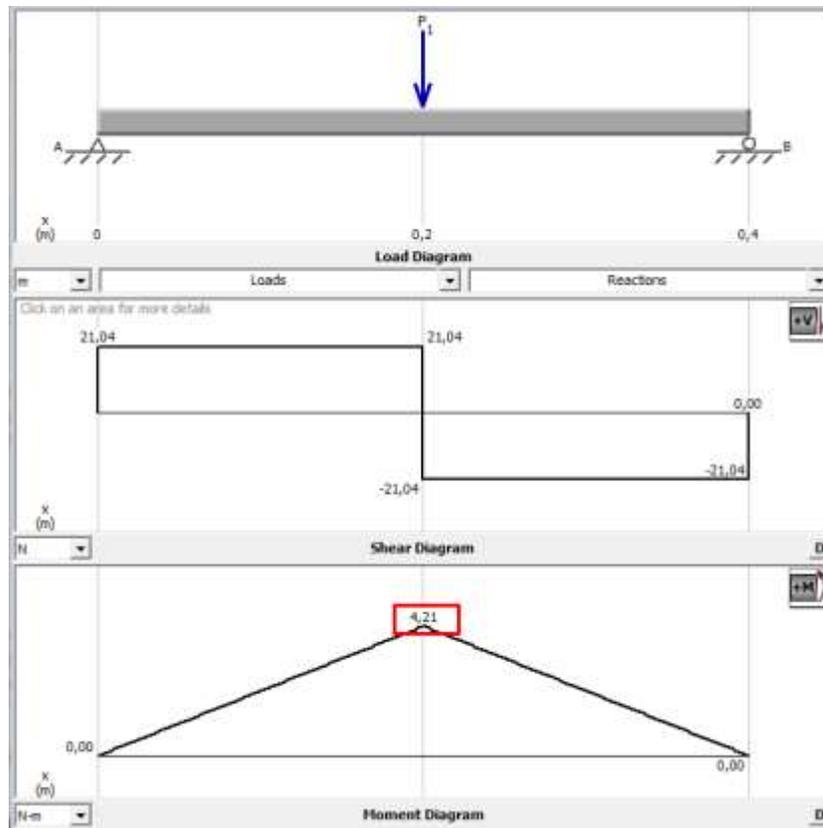


Figura 43 Diagramas del eje Y para cargas repetidas

**Datos:**

$$M = 4.21 \text{ Nm}$$

$$D = 0.012 \text{ m}$$

$$\rightarrow \sigma_{max} = \frac{32 * (4.21 \text{ Nm})}{\pi * (0.012 \text{ m})^3}$$

$$\sigma_{max} = 24.81 \text{ MPa}$$

Ya que la carga se aplica repetidamente miles de veces, el esfuerzo de diseño también cambia, se puede utilizar la Tabla 22 para determinar la fórmula apropiada del esfuerzo de diseño, teniendo en cuenta que el acero seleccionado es dúctil y justificando así su uso debido a que soporta cargas repetidas.

Tabla 22

## Fórmulas para el esfuerzo de diseño

Forma de Carga	Materiales Dúctiles	Materiales Frágiles
<b>Cargas estáticas</b>	$\sigma_d = S_y/8$	$\sigma_d = S_u/6$
<b>Cargas repetidas</b>	$\sigma_d = S_u/8$	$\sigma_d = S_u/10$
<b>Impacto o Choque</b>	$\sigma_d = S_u/12$	$\sigma_d = S_u/15$

Se emplea la ecuación [ 19 ] de la tabla anterior que corresponde a cargas repetidas en materiales dúctiles.

$$\sigma_d = \frac{S_u}{8} \quad [ 11 ]$$

Donde:

$S_u$ : Resistencia máxima del acero inoxidable: 758 MPa. (ver Anexo A)

$$\sigma_d = \frac{758 \text{ MPa}}{8}$$

$$\sigma_d = 94.75 \text{ MPa}$$

Como se mencionó en puntos anteriores, para que el diseño sea seguro y tenga validez el esfuerzo de diseño debe ser mayor al esfuerzo máximo, es decir;

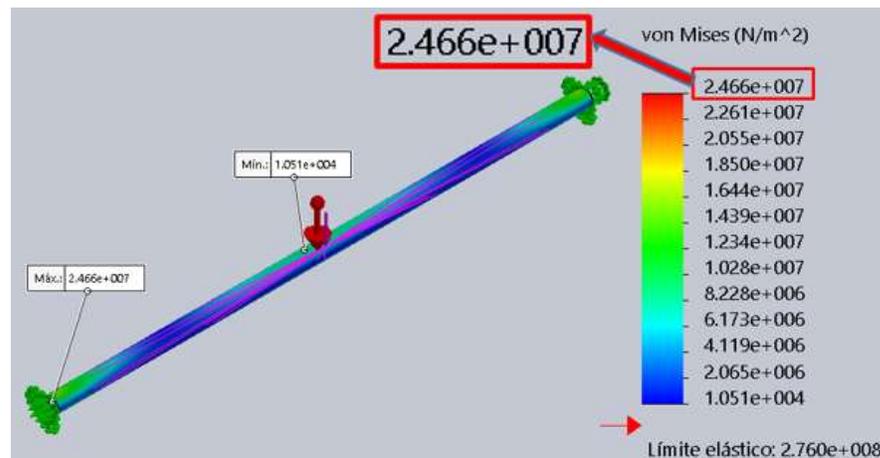
$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$94.75 \text{ MPa} \geq 24.88 \text{ MPa}$$

De esta manera se justifica que el diseño del eje guía es más que seguro, tanto para la carga estática y cargas repetidas que soportará en el proceso de

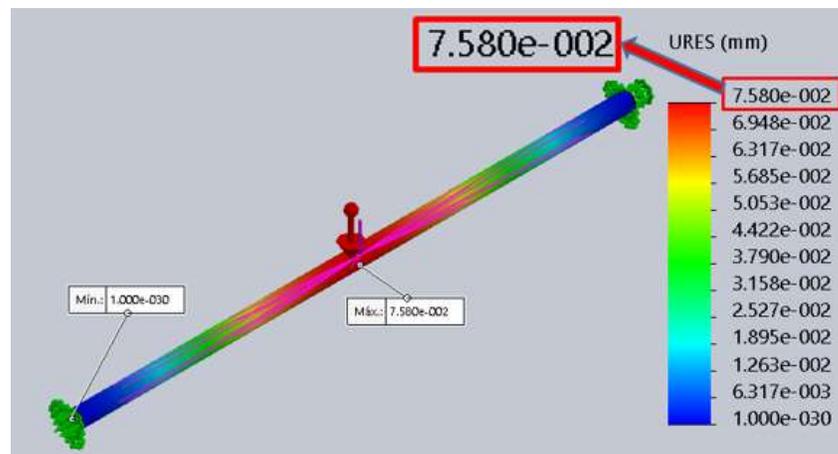
inserción. Con ayuda del software CAD se procede a comprobar los cálculos y corroborar su diseño final por medio del método de elementos finitos, en los datos de las figuras siguientes se demuestra que el diseño es completamente seguro.

El esfuerzo máximo que se genera en el software CAD (ver Figura 44) comprueba el valor del esfuerzo calculado y éste es menor que el esfuerzo de diseño, lo que garantiza la funcionalidad del proyecto.



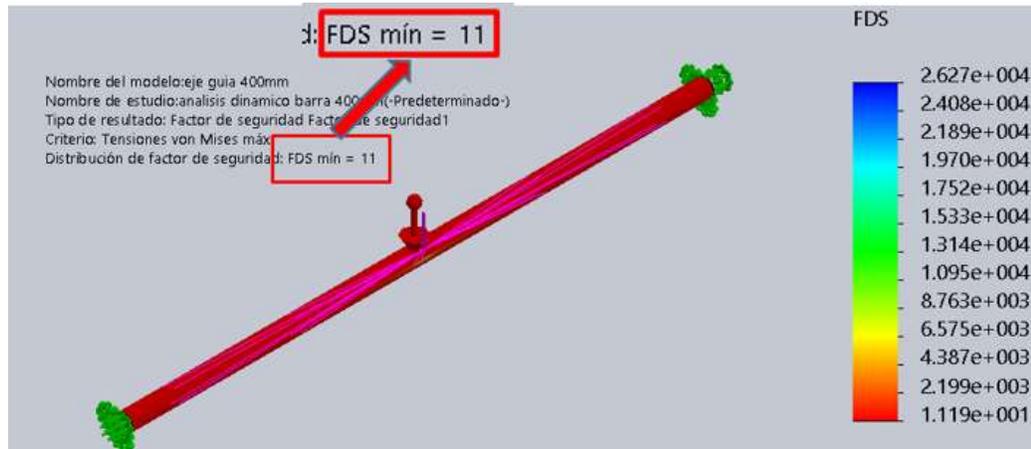
**Figura 44. Análisis de esfuerzos eje Y. Caso de carga repetida**

El desplazamiento máximo que se produce en el eje es de  $7.58 \times 10^{-002} \text{ mm} = 0.07 \text{ mm}$  (ver Figura 45), este valor es relativamente bajo y al igual que en el estudio estático este resultado demuestra que esta deformación es tolerable y no influye para la aplicación dentro del diseño.



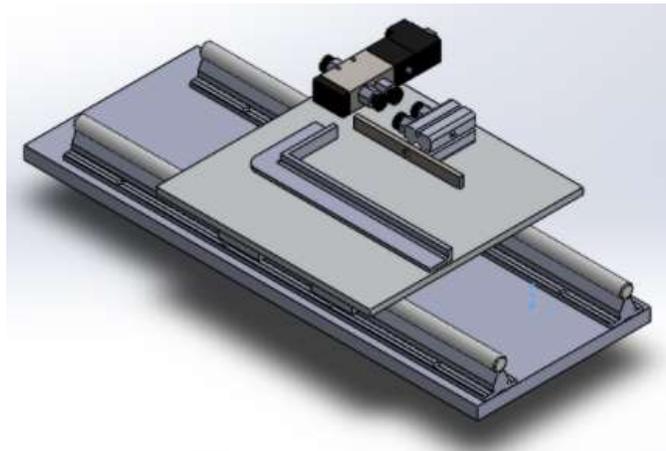
**Figura 45. Análisis del desplazamiento máximo eje y con carga repetida**

El factor de seguridad con carga repetida (ver Figura 46) disminuye considerablemente en relación con el factor de seguridad del análisis estático, sin embargo el diseño es seguro, ya que su valor de FDS es mucho mayor al establecido para su diseño inicial.



**Figura 46. Análisis Factor de seguridad eje Y carga repetida**

En la Figura 47 se muestra el diseño final para la mesa superior ya ensamblado con sus respectivos ejes y con todos los componentes que este soportará.

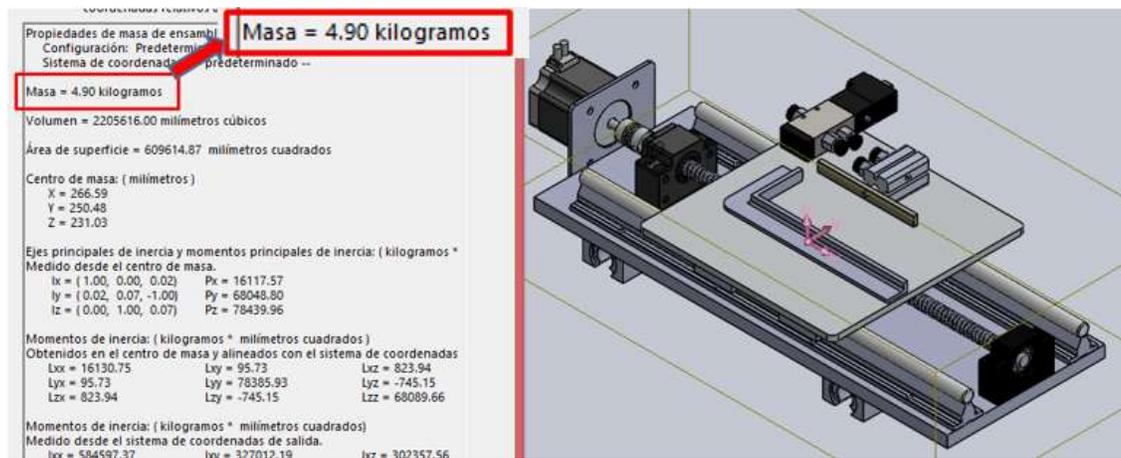


**Figura 47 Ensamble de mesa superior con ejes guías**

### 3.1.4 Diseño del eje Longitudinal X

Para el cálculo de las dimensiones del eje guía X, se toman en cuenta las mismas consideraciones establecidas para el eje Y, es decir se lo tomará como una viga simplemente apoyada con una carga concentrada normal directa y de

acuerdo a los requerimientos físicos para cada proceso en la estructura, se ha determinado una longitud de eje de 1.30 m.



**Figura 48 Masa de la mesa inferior correspondiente al eje X**

En la Figura 44 se observa el diseño CAD de toda la mesa inferior con sus respectivos componentes así como el motor, ejes guías, soportes, etc. Se emplea el Software CAD para obtener su masa total que es 4.90 kg, a esta masa hay que sumarle la masa del motor (ver Anexo D) por lo que se obtiene 5.15 kg y se procede a calcular su peso mediante la ecuación [ 2 ].

Entonces:

$$F = m * g$$

$$F = (5.15 \text{ Kg}) * (9.8 \frac{m}{s^2})$$

$$F = 50.47 \text{ N}$$

Cada eje guía soportará un peso dividido de 25.24 N, con el diagrama de cuerpo libre del eje X que se observa en la Figura 49 y con el uso del software MDSolids se obtiene la magnitud de cada una de las reacciones y el valor del momento flector máximo, el proceso de cálculo es el mismo que se empleó para el eje Y.

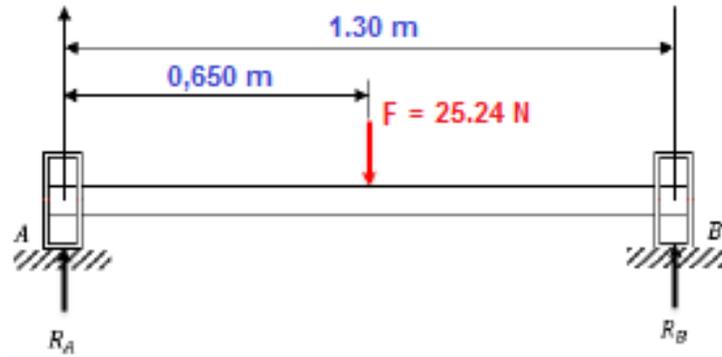


Figura 49 Diagrama de cuerpo libre del eje X

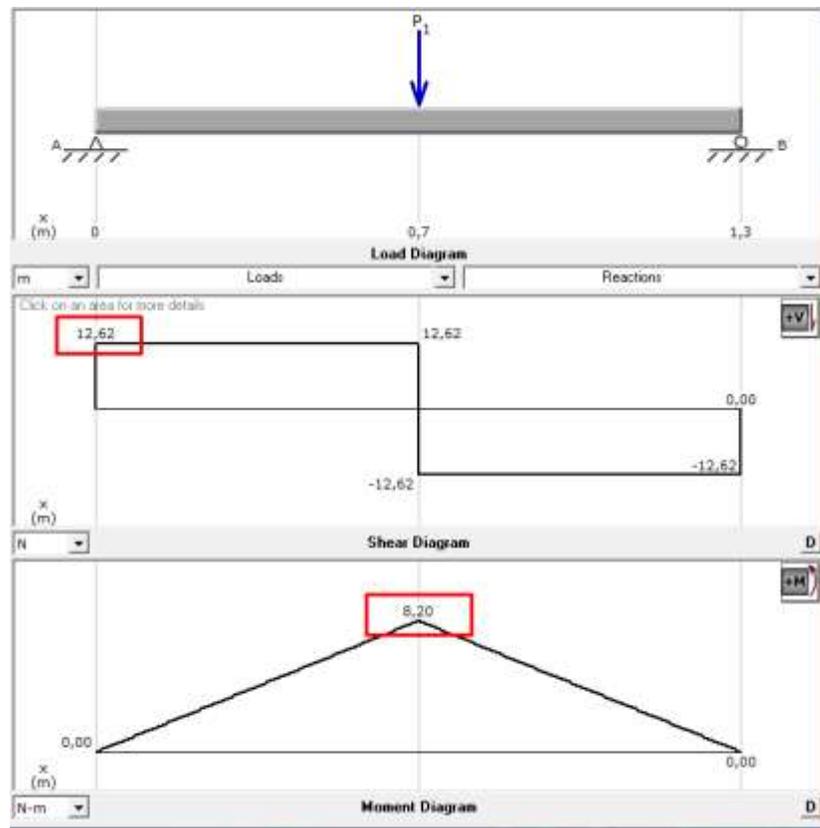


Figura 50 Diagramas del eje X para cargas estáticas

- Valores resueltos del Software MDSolids

$$R_A = 12.62 \text{ N}, R_B = 12.62 \text{ N}$$

$$M_{max} = 8.20 \text{ Nm}$$

Para el cálculo del diámetro requerido se recurre a la ecuación [ 6 ], entonces:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * M * N}{\pi * S_y}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{32. (8.20 \text{ N.m}). (3)}{\pi. (276 \text{ MPa})}}$$

$$D = 0.00968 \text{ m}$$

$$D \geq 9.68 \text{ mm}$$

Con el cálculo anterior se determina que el diámetro del eje guía debe ser mayor a 9.68 mm y con el requerimiento de longitud de 1.3 m, el eje más accesible es un eje con diámetro de 16 mm.

#### a. Prueba de diseño de los ejes de la mesa inferior

De la misma manera que el eje Y se realiza dos tipos de pruebas de diseño con el diámetro seleccionado para dos tipos de cargas estática y repetida, el procedimiento es el mismo así que se muestran los resultados ya calculados con su respectivo análisis de esfuerzos en el software CAD.

#### a. Carga estática

- Esfuerzo máximo

$$\sigma_{max} = \frac{32. M_{max}}{\pi. D^3}$$

$$\sigma_{max} = \frac{32 * (8.20 \text{ Nm})}{\pi. (0.016 \text{ m})^3}$$

$$\sigma_{max} = 20.39 \text{ MPa}$$

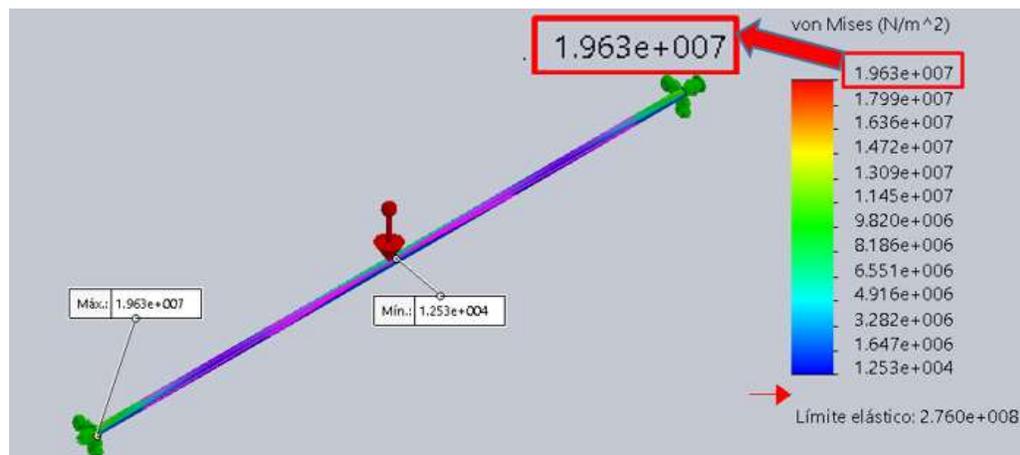
- **Justificación de esfuerzos**

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$92 \text{ MPa} \geq 20.39 \text{ MPa}$$

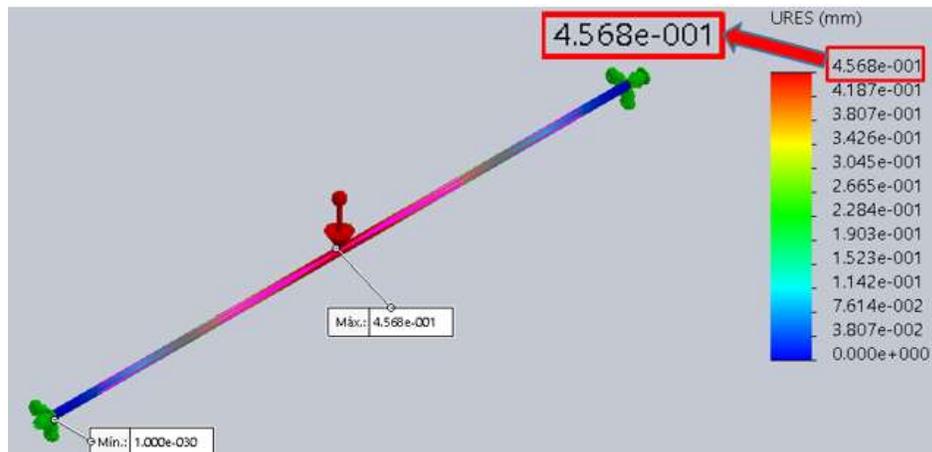
La justificación anterior comprueba que el diámetro del eje es seguro para las cargas establecidas.

En la Figura 51, se puede estimar el análisis de esfuerzos con el software CAD, donde el esfuerzo máximo es  $19.63 \text{ MPa}$ , siendo similar al esfuerzo máximo calculado y menor al esfuerzo de diseño lo que asegura la selección del eje para el proyecto.



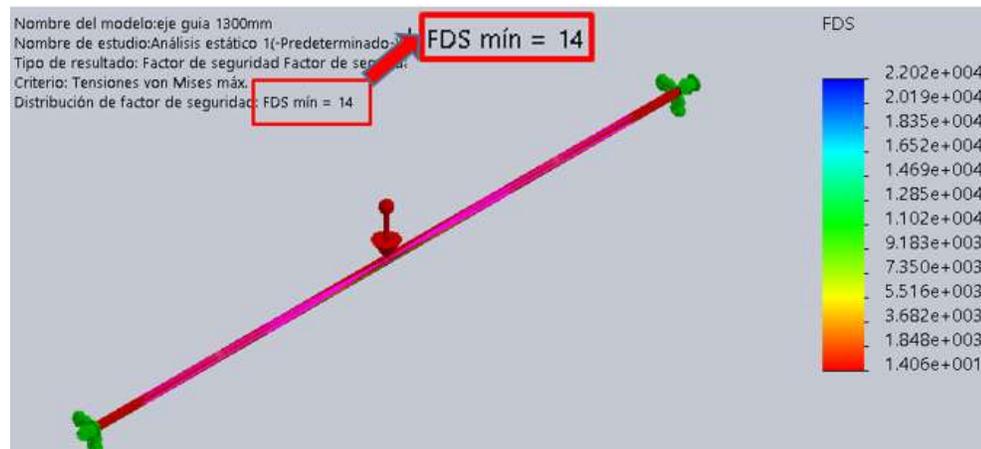
**Figura 51. Análisis de esfuerzo máximo del eje X**

El desplazamiento máximo del eje de la Figura 52 calculado por el software es de  $4.568 \times 10^{-001} = 0.45 \text{ mm}$ , este desplazamiento es tolerable en relación con la longitud de la barra por lo que no afecta el diseño ni el funcionamiento del eje guía X.



**Figura 52. Análisis de la deformación máxima en el eje X**

El factor de diseño en el eje X calculado por el software es de  $FDS = 14$  (ver Figura 53), este dato es mayor al establecido al inicio del cálculo, lo que asegura el diseño del eje.



**Figura 53. Análisis Factor de seguridad en el eje X**

### b. Carga repetida

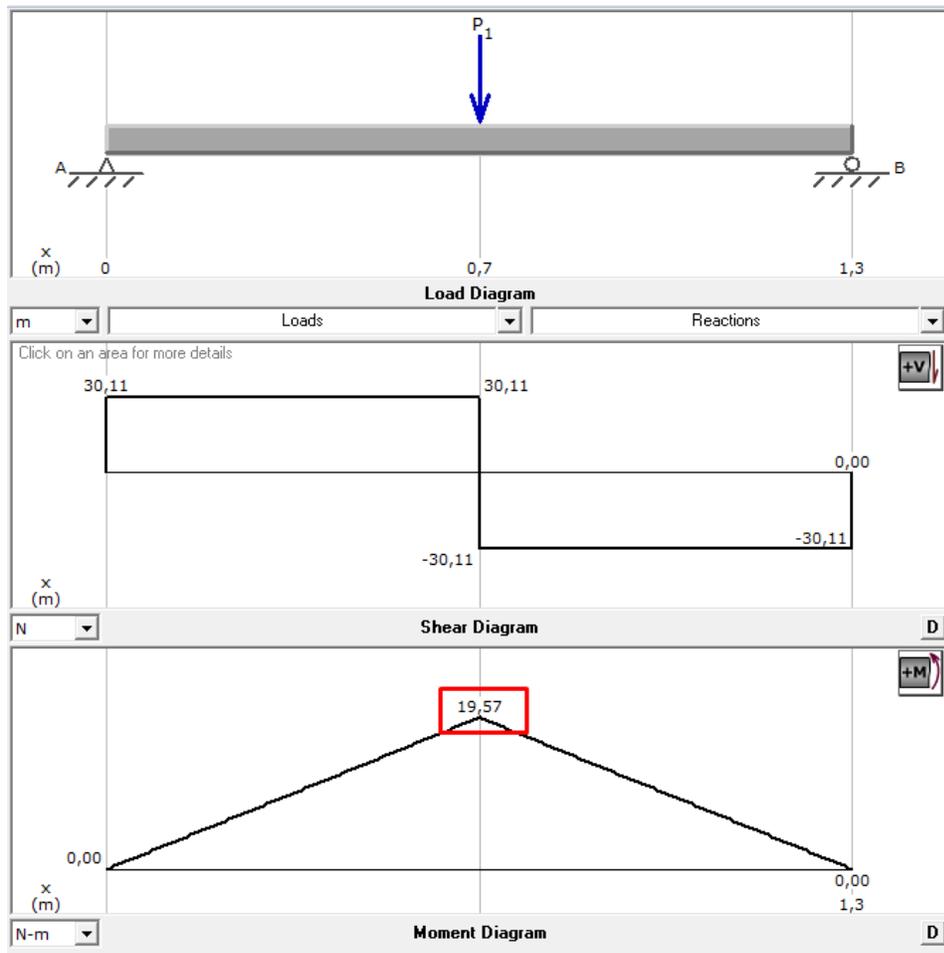
La fuerza total repetida que actuará en el eje se calcula mediante la ecuación [ 10 ] antes descrita, el único cambio es el valor de  $F_1$  ya que este varía por el valor de peso total antes calculado y que se mostró en la Figura 49. Entonces:

$$F_{eje} = \frac{F_1 + F_2}{2}$$

$$F_{eje} = \frac{50.47 \text{ N} + 69.95 \text{ N}}{2}$$

$$F_{eje} = 60.21 \text{ N}$$

Con el Software MDSolids se obtiene el valor actual del momento flector máximo, dicho valor se puede observar en la Figura 54.



**Figura 54 Diagramas del eje X para cargas repetidas**

- **Valores resueltos del Software MDSolids**

$$M_{max} = 19.57 \text{ Nm}$$

- **Esfuerzo máximo**

$$\sigma_{max} = \frac{32 * (19.57 \text{ Nm})}{\pi * (0.016 \text{ m})^3}$$

$$\sigma_{max} = 48.66 \text{ MPa}$$

- **Esfuerzo de diseño**

$$\sigma_d = 94.75 \text{ MPa}$$

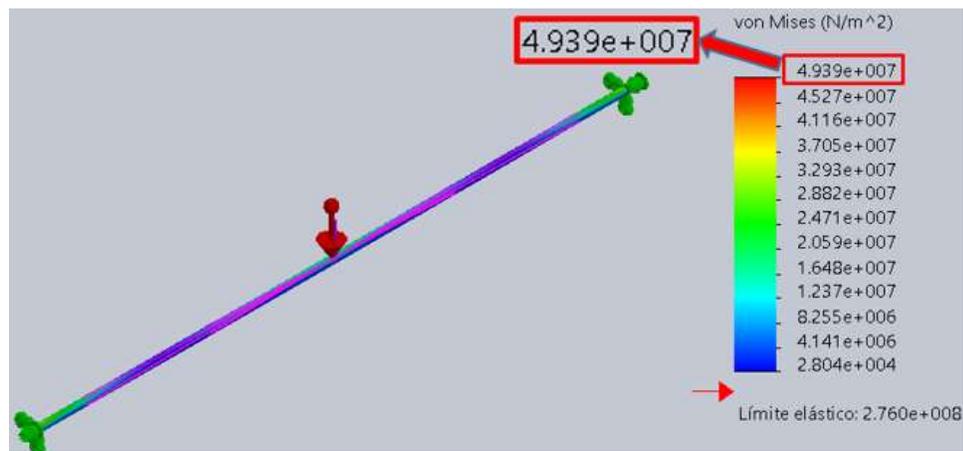
- **Justificación de esfuerzos**

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$94.75 \text{ MPa} \geq 48.66 \text{ MPa}$$

El diseño del eje guía de la mesa inferior que soportará las cargas estáticas de toda la mesa superior y las cargas repetidas del proceso de inserción es más que seguro, ya que cumple con la condición de que el esfuerzo de diseño del material es mucho mayor a los máximos esfuerzos generados por las cargas.

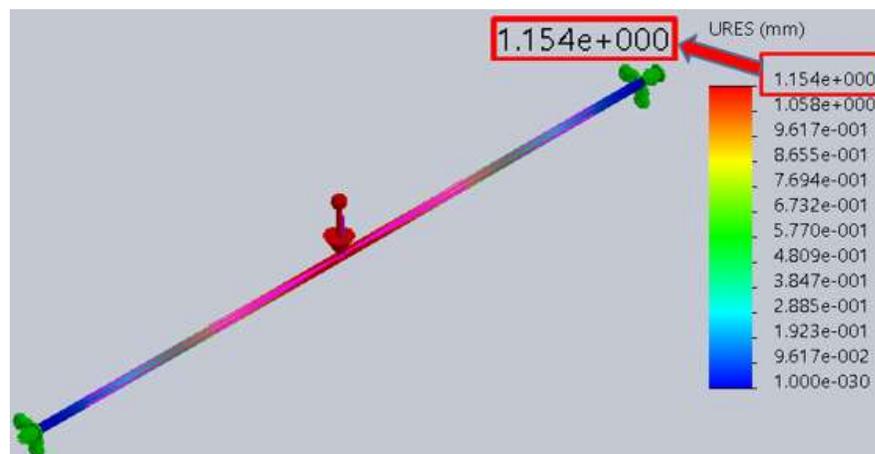
El resultado del esfuerzo máximo producido para este caso por el software CAD es similar al valor calculado (ver Figura 55) y estos dos valores a su vez son menores que el esfuerzo de diseño, lo que implica que el componente seleccionado funcionará de manera idónea.



**Figura 55. Análisis de Esfuerzos eje X**

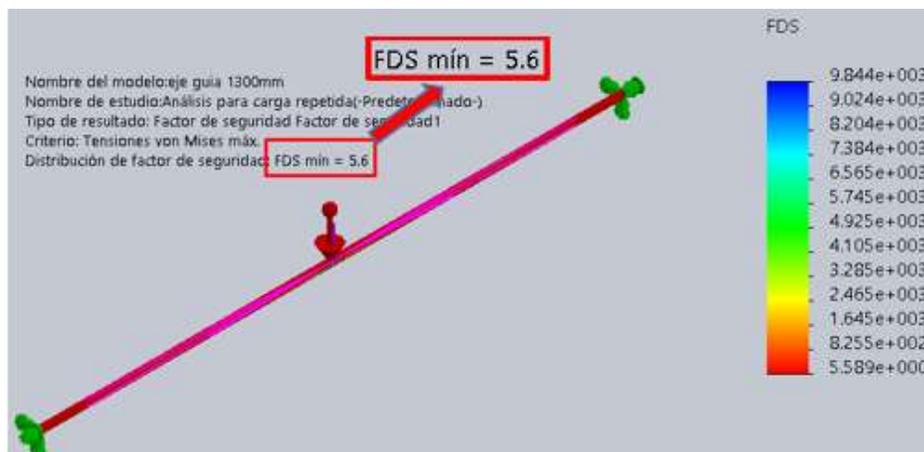
El desplazamiento máximo que se obtiene mediante el software CAD es  $1.1 \text{ mm}$ , este desplazamiento se producirá con la carga repetida y al igual que en el análisis estático es relativamente bajo, en función de la longitud total

del eje y sin tomar en cuenta el riel guía de soporte, esta deformación es tolerable y no interfiere en el estudio dentro del proyecto.



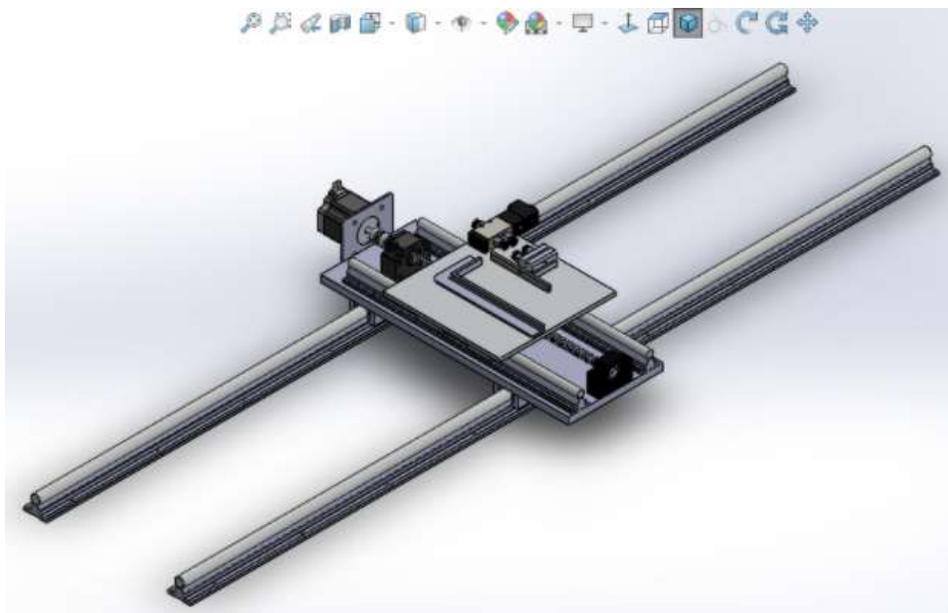
**Figura 56. Análisis de la deformación máxima en el eje X**

El factor de seguridad mínimo que se obtiene en el Software CAD es de  $FDS = 5.6$  como se puede observar en la Figura 57, lo que involucra un factor de diseño mayor al establecido. Por lo tanto el diseño de los ejes X e Y son robustos para la carga estática y carga repetida.



**Figura 57. Análisis Factor de seguridad para el eje X**

En la Figura 58 se muestra el ensamblaje de la mesa inferior y la mesa superior ya ensamblado con el diseño de sus respectivos ejes guías.



**Figura 58** Ensamble de mesa inferior con ejes guías

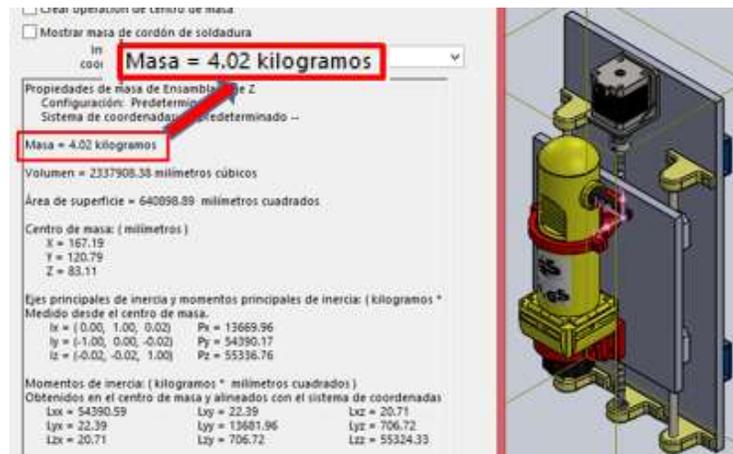
### 3.1.5 Diseño del brazo de soporte para el proceso de perforación

Como se puede observar en la Figura 59, se ha previsto el uso de un brazo en forma de L invertida, que sirva de soporte a todos los elementos del proceso de perforación. El material designado para la construcción de este brazo es acero estructural (ver Tabla 19 ) y se ha previsto el uso del perfil estructural de tubería hueca cuadrada, que según (Mott R. , 2006) es un perfil muy eficiente en columnas para soportar grandes cargas.



**Figura 59** Brazo de soporte para el proceso de perforación

Para encontrar las dimensiones adecuadas del brazo de soporte se toma en cuenta toda la masa que este soportará, para obtener este dato se realiza el diseño CAD de todos los componentes del proceso de perforación como se puede observar en la Figura 60.



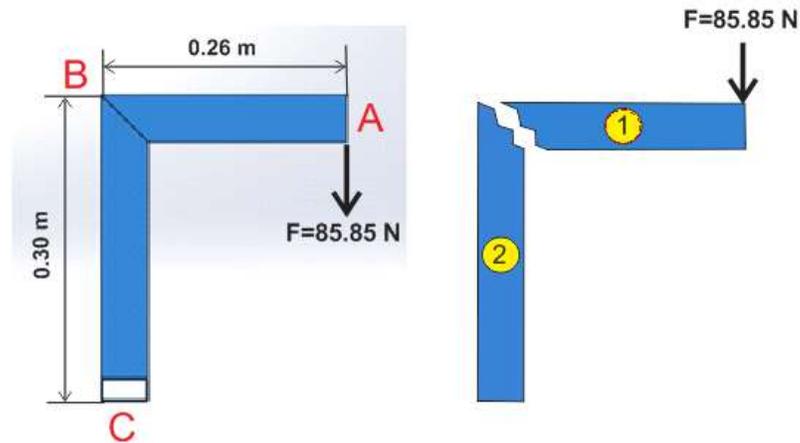
**Figura 60. Componentes ensamblados del proceso de perforación**

La masa total que nos da el software CAD es de 4.02 kg, a esta masa se le añade la masa del taladro y se obtiene un total de 5.84 Kg, en este caso en particular emplearemos la ecuación [ 2 ], para cálculos posteriores se añade un factor de seguridad de 1.5 para todos los pesos a soportar en los brazos y así obtener de manera más exacta la fuerza neta que actúa en el mismo.

$$F = (5.84 \text{ Kg}) * \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * 1.5$$

$$F = 85.85 \text{ N}$$

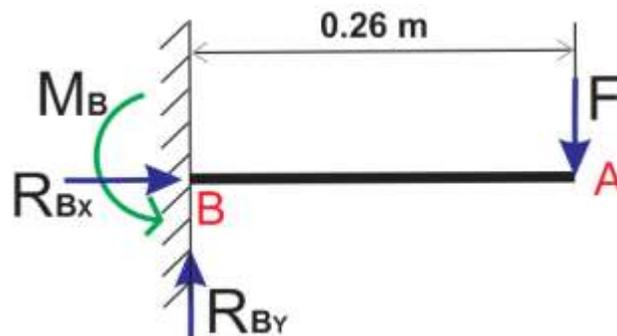
En la Figura 61 se observa la vista lateral del brazo y como actúa la fuerza total en el mismo, para poder analizar sus reacciones y esfuerzos se considera realizar el análisis como dos miembros independientes de la estructura. El primer miembro se lo analiza como una viga en voladizo ya que cuenta con un solo apoyo fijo, el segundo miembro se lo analizará como una viga empotrada para determinar las cargas permisibles que este pueda soportar y corroborar si el diseño es seguro.



**Figura 61 Miembros independientes del brazo de soporte perforación**

**a. Primer miembro del soporte**

A continuación se presentan el diagrama de cuerpo libre del primer miembro estructural, con sus respectivas fuerzas, reacciones y momentos flectores que genera la fuerza aplicada (ver Figura 62).



**Figura 62 Diagrama de cuerpo libre del primer componente**

El proceso de cálculo para las reacciones y momentos es el mismo que se empleó para los cálculos de los ejes guías X e Y, por lo que se emplea el software MDSolids para obtener los datos requeridos.

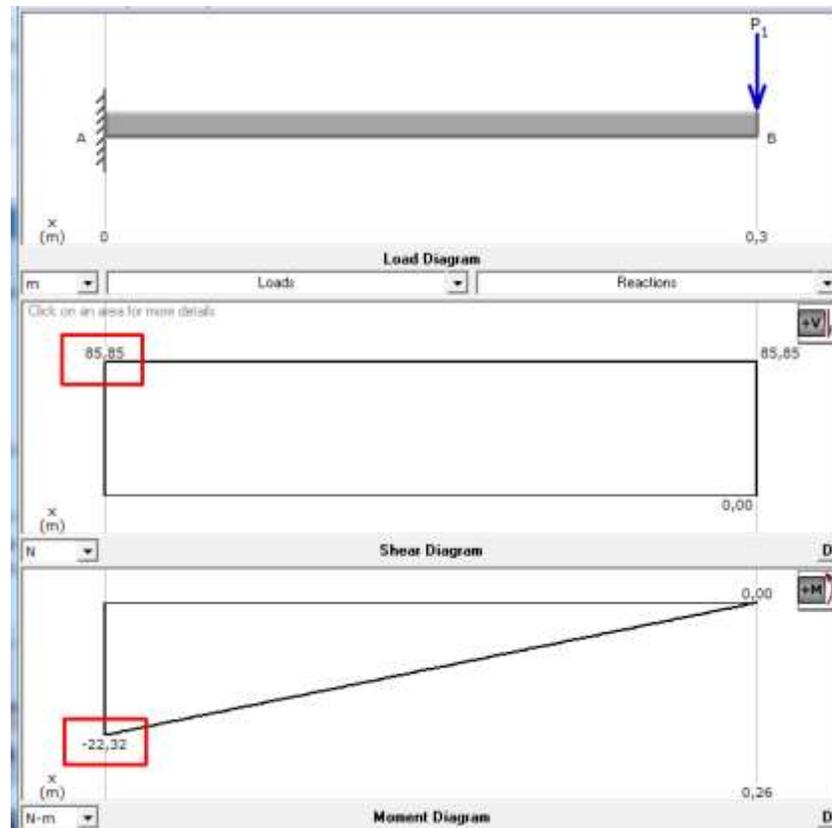


Figura 63 Diagramas del primer componente

- **Valores resueltos del Software MDSolids**

$$R_B = 85.85 \text{ N}$$

$$M_{max} = -22.32 \text{ Nm}$$

Es necesario calcular el esfuerzo de diseño del material por lo que se emplea la ecuación [ 1 ], y para encontrar el módulo de sección se usa la ecuación [ 4 ] para luego despejar el término requerido, señalando que el esfuerzo máximo es el esfuerzo de diseño calculado.

- **Esfuerzo de diseño para acero estructural**

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N}$$

$$\sigma_d = \frac{250 \text{ MPa}}{3}$$

$$\sigma_d = 83.33 \text{ MPa}$$

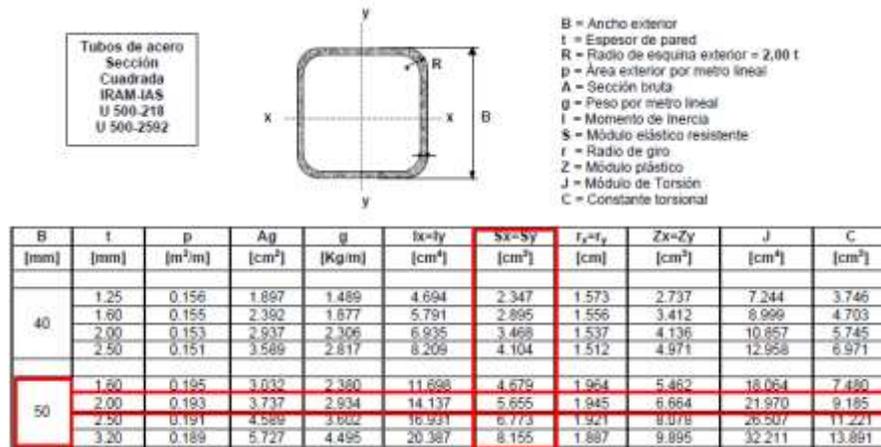
• **Módulo de sección**

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{max}}$$

$$S = \frac{22.32 \text{ N.m}}{83.83 \text{ MPa}}$$

$$S = 0.0000266 \text{ m}^3 (2.66 \text{ cm}^3)$$

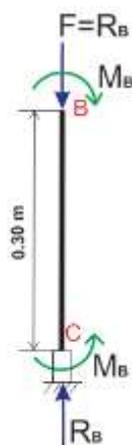
Con el dato del módulo de sección se busca en el Anexo B, correspondiente a tubería cuadrada y se busca las dimensiones apropiadas que presenten un valor mayor al módulo calculado, como se observa en la Figura 64 el tubo idóneo, es el tubo cuadrado de 50\*50 mm, por ser un perfil estructural muy comercializado en el país.



**Figura 64 Selección de las dimensiones del tubo cuadrado**

**b. Segundo miembro del soporte**

Para finalizar la justificación del diseño del brazo se debe analizar conjuntamente el segundo miembro estructural con las fuerzas y reacciones que se generaron en el primer miembro. La Figura 65 muestra el diagrama de cuerpo libre del componente así como también las reacciones y apoyos que actúan en el mismo.



**Figura 65 Diagrama de cuerpo libre del segundo componente**

El segundo miembro se lo analiza como una columna empotrada en un extremo, por lo que es necesario calcular la carga máxima que puede soportar el miembro antes de pandearse y la carga permisible del mismo ya con el material y las dimensiones establecidas. En primera instancia se determina el factor de fijación de los extremos, la Tabla 23 muestra los factores ya establecidos.

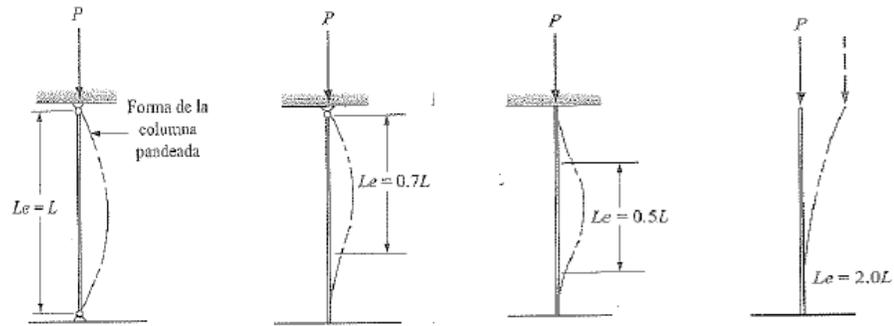
**Tabla 23**

**Factor de fijación para tipos de sujeción de columnas**

Tipo de sujeción	Ambos extremos de pasador	Un extremo fijo y el otro de pasador	Ambos extremos fijos	Un extremo fijo y el otro libre
Factor	Valor Teórico	Valor Teórico	Valor Teórico	Valor Teórico
	<b>K: 1.0</b>	<b>K: 0.7</b>	<b>K: 0.5</b>	<b>K: 2.0</b>
	Valor Práctico	Valor Práctico	Valor Práctico	Valor Práctico
	<b>K: 1.0</b>	<b>K: 0.8</b>	<b>K: 0.65</b>	<b>K: 2.10</b>

Continúa 

### Modelo de Ilustración



El factor seleccionado será el de 2.10 que es un factor práctico para columnas fijas de un solo extremo. Se emplea la ecuación [ 19 ] para determinar la longitud efectiva.

$$L_e = K * l \quad [ 12 ]$$

Donde:

$L_e$ : Longitud efectiva

$K$ : Factor de sujeción

$l$ : longitud de la columna

$$L_e = 2.10 * (0.30 \text{ m})$$

$$L_e = 0.63 \text{ m}$$

Es necesario calcular la relación de esbeltez mediante la ecuación [ 19 ].

$$SR = L_e / r \quad [ 13 ]$$

Donde:

$SR$ : Relación de esbeltez

$r$ : radio de giro = 0.01945 m (ver Figura 64)

$$SR = (0.63 \text{ m}) / (0.01945 \text{ m})$$

$$SR = 32.39$$

Al calcular la constante de columna con la ecuación [ 19 ] y comparar este valor con la SR se concluye si la columna es larga o corta.

$$C_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{S_y}} \quad [ 14 ]$$

Donde:

$C_c$ : Constante de columna

$E$ : Módulo de elasticidad del acero (200 GPa)

$S_y$ : Resistencia a la fluencia del acero (250 MPa)

$$C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * (200 \text{ GPa})}{250 \text{ MPa}}}$$

$$C_c = 125.66$$

Como el valor de  $SR$  es menor a  $C_c$ , se determina que la columna es corta y se emplea la fórmula de Johnson para poder calcular la carga crítica. Se usa la ecuación [ 19 ].

$$P_{cr} = AS_y \left( 1 - \frac{S_y (SR)^2}{4\pi^2 E} \right) \quad [ 15 ]$$

Donde:

$P_{cr}$ : Carga crítica

$A$ : Área = 0.0003737 m<sup>2</sup> (ver Figura 64)

$$P_{cr} = (0.0003737 \text{ m}^2) * (250 \text{ MPa}) \left( 1 - \frac{250 \text{ MPa} * (32.39)^2}{4\pi^2 * (200 \text{ GPa})} \right)$$

$$P_{cr} = 90.32 \text{ KN}$$

La carga crítica representa la carga máxima que puede soportar el miembro antes de pandearse, pero el dato que es necesario, es el valor de la carga permisible ( $P_p$ ), ya que es la carga máxima con la que se diseñan los miembros estructurales que actúan como columna. Se emplea el factor de seguridad de 3 en la ecuación

$$P_p = \frac{P_{cr}}{3} \quad [16]$$

Entonces:

$$P_p = \frac{90.32 \text{ KN}}{3}$$

$$P_p = 30.1 \text{ KN}$$

### c. Pruebas de diseño del brazo de soporte

Se calcula el esfuerzo actual que se genera ya con las dimensiones establecidas del tubo, entonces se calcula:

#### Datos:

Módulo de sección:  $5.655 \text{ cm}^3 = 5.655 * 10^{-6} \text{ m}^3$  .(ver Anexo B)

- **Esfuerzo máximo**

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S}$$

$$\sigma_{max} = \frac{22.32 \text{ N.m}}{5.655 * 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{max} = 3.95 \text{ MPa}$$

- **Justificación de esfuerzos**

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$83.33 \text{ MPa} \geq 3.95 \text{ MPa}$$

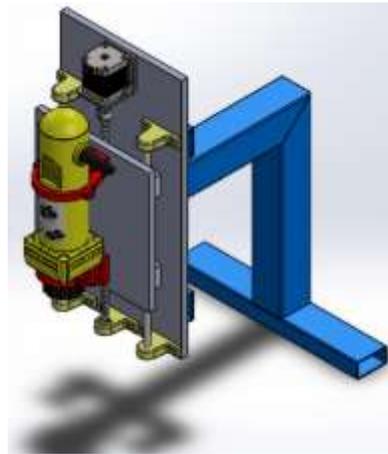
De esta manera se corrobora que el diseño del primer componente estructural es seguro, para confirmar la seguridad del segundo miembro se compara que la carga permisible sea mucho mayor que la carga a soportar, es así que se tiene:

- **Justificación de cargas**

$$P_p \geq F$$

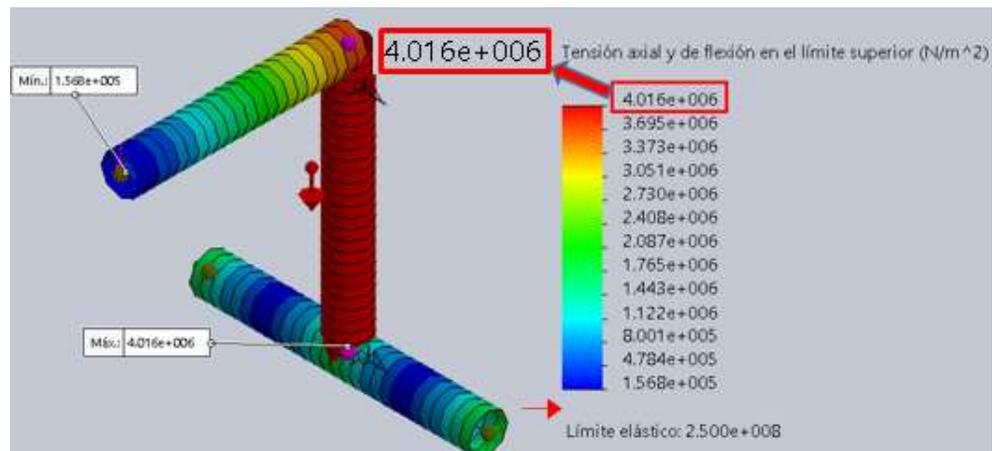
$$30.1 \text{ KN} \geq 85.85 \text{ N}$$

El diseño total del brazo es más que seguro con la selección de tubo cuadrado de 50 x 50 mm en acero estructural, por lo que se puede proceder a la construcción del brazo de soporte de acuerdo a la Figura 66 que muestra el diseño CAD del brazo con sus respectivos componentes que este soportará.



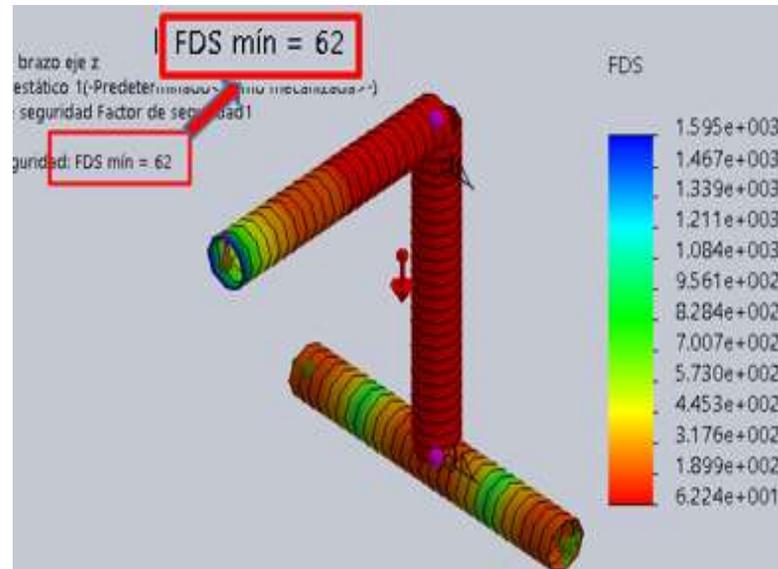
**Figura 66** Ensamble del brazo de soporte para proceso de perforación

El esfuerzo máximo obtenido mediante el Software CAD es de 4.016 MPa, como se puede apreciar en la Figura 67 este dato es similar al esfuerzo máximo calculado, demostrando que el diseño es completamente seguro.



**Figura 67.** Análisis esfuerzos Brazo de perforación

El factor de seguridad mínimo obtenido mediante el Software CAD es de  $FDS = 62$ , (ver Figura 68), lo que implica que este factor de diseño es mayor al establecido y el diseño es completamente seguro.



**Figura 68 Análisis del factor de seguridad del brazo de soporte**

### 3.1.6 Diseño del brazo de soporte para el proceso de inserción

El brazo de soporte para el proceso de inserción debe soportar dos cargas relevantes que son la matriz de inserción y el actuador lineal que se encarga de transportar la lengüeta a través de la matriz, como se puede observar en la Figura 69, se dispondrá de dos brazos de soporte, superior (B1) e inferior (B2).

El material designado para su construcción es el acero estructural en tubería cuadrada (ver Tabla 19), el procedimiento para el cálculo de las dimensiones del brazo, es el mismo establecido anteriormente para el brazo de perforación.

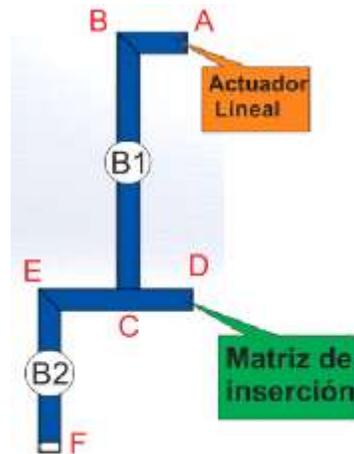


Figura 69 Disposición de los brazos de soporte

#### a. Brazo de soporte superior (B1)

Para encontrar las dimensiones adecuadas del brazo de soporte superior (B1) se requiere de toda la masa del actuador así como también de los demás componentes que este abarca, con el software CAD se obtiene la masa total gracias al modelado, como se puede observar en la Figura 70. A esta masa se le debe aumentar la masa del actuador neumático, por lo que se obtiene un total de 3.86 kg.

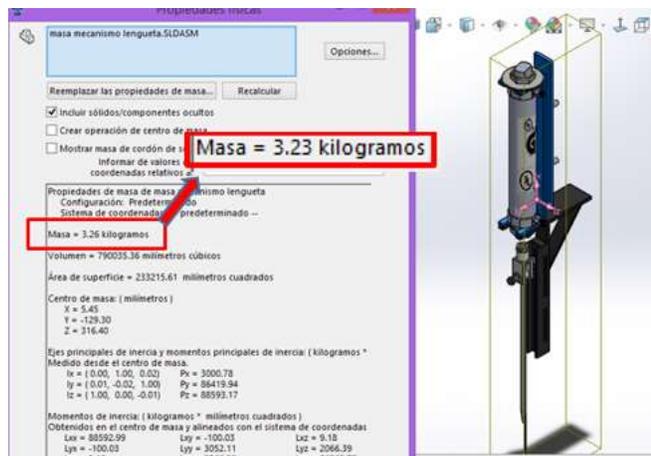


Figura 70 Actuador Lineal proceso de inserción

- **Peso Total**

$$F = ( 3.86 \text{ Kg} ) * \left( 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * 1.5$$

$$F = 56.74 \text{ N}$$

El brazo superior (B1) se lo analiza de la misma manera que el brazo de perforación, es así que se presentan los cálculos ya resueltos como dos miembros estructurales independientes, en la Figura 71 se muestra el brazo segmentado con sus respectivas cargas; las reacciones y momentos flectores generados en ambos miembros se observan en la Figura 72.

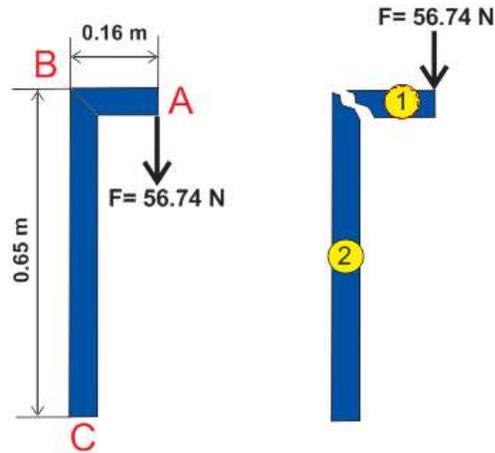


Figura 71 Miembros independientes del brazo superior de inserción

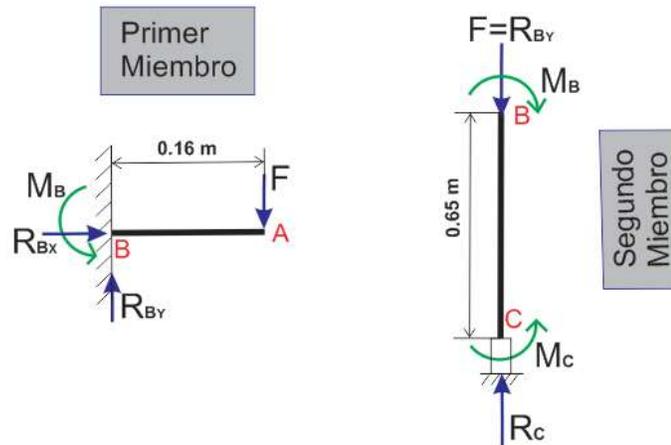


Figura 72 Diagrama de cuerpo libre de miembros del brazo superior

Cálculos para el primer miembro (B1)

- Valores resueltos del Software MDSolids

$$R_B = 56.74 \text{ N}$$

$$M_{max} = -9.08 \text{ Nm}$$

- **Esfuerzo de diseño**

$$\sigma_d = 83.33 \text{ MPa}$$

- **Módulo de sección**

$$S = \frac{M}{\sigma_{max}}$$

$$S = \frac{9.08 \text{ N.m}}{83.83 \text{ MPa}}$$

$$S = 0.10831 * 10^{-5} \text{ m}^3 (1.08 \text{ cm}^3)$$

Tal como se observó en la Figura 64, esta designación de tubo cumple con la condición de tener un módulo de sección mayor al calculado. Por lo que se procede a obtener la carga permisible en el segundo miembro estructural con los datos dados de un tubo cuadrado de 50x50 mm.

### **Cálculos para el primer miembro (B1)**

- **Longitud efectiva**

$$L_e = K * l$$

$$L_e = 2.10 * (0.65 \text{ m})$$

$$L_e = 1.365 \text{ m}$$

- **Relación de esbeltez**

$$SR = \frac{L_e}{r}$$

$$SR = (1.365 \text{ m}) / (0.01945 \text{ m})$$

$$SR = 70.18$$

- **Constante de columna**

$$C_c = 125.66$$

- **Fórmula de Euler para carga crítica**

$$P_{cr} = ASy \left( 1 - \frac{Sy(SR)^2}{4\pi^2 E} \right)$$

$$P_{cr} = (0.0003737 \text{ m}^2) * (250 \text{ MPa}) \left( 1 - \frac{250 \text{ MPa} * (70.18)^2}{4\pi^2 * (200 \text{ GPa})} \right)$$

$$P_{cr} = 78.85 \text{ KN}$$

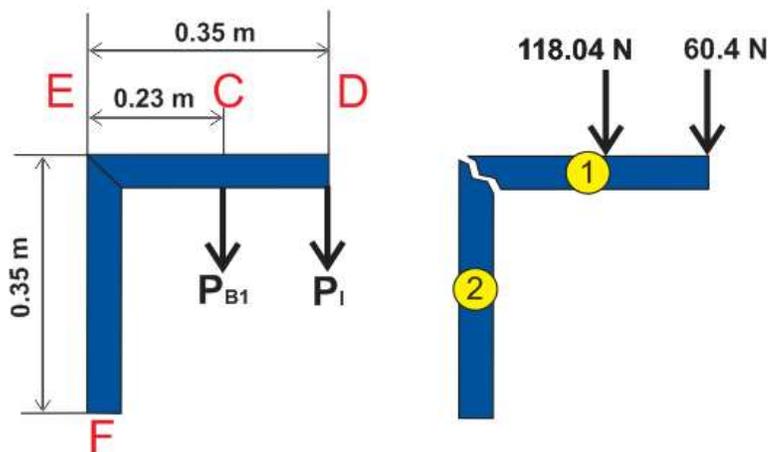
- **Carga permisible**

$$P_p = \frac{P_{cr}}{3}$$

$$P_p = \frac{78.85 \text{ KN}}{3}$$

$$P_p = 26.28 \text{ KN}$$

**b. Brazo de soporte inferior (B2)**



**Figura 73. Miembros independientes del brazo inferior de inserción**

El brazo inferior (B2) presenta una carga más debido al soporte que le ofrece al brazo superior (B1), es decir las fuerzas que actúan en el brazo son:

- **Peso del brazo superior ( $P_{B1}$ )**

$$m_{B1} = 8.03 \text{ Kg}$$

$$P_{B1} = (8.03 \text{ Kg}) * \left( 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * 1.5$$

$$P_{B1} = 118.04 \text{ N}$$

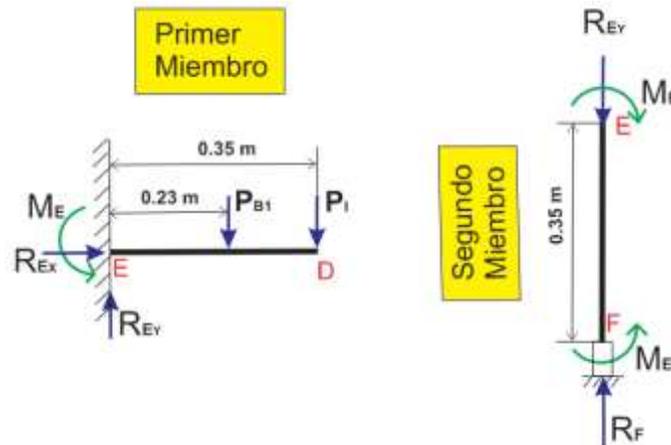
- **Peso de la matriz de inserción ( $P_I$ )**

$$m_I = 4.11 \text{ Kg}$$

$$P_I = (4.11 \text{ Kg}) * \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * 1.5$$

$$P_I = 60.4 \text{ N}$$

La Figura 73 se muestra cómo actúan las fuerzas antes calculadas en el brazo inferior (B1) y de la misma manera se analiza como dos miembros independientes 1 y 2. La Figura 74 muestra los diagramas de cuerpo libre de cada miembro.



**Figura 74 Diagrama de cuerpo libre de miembros del brazo inferior**

En el proceso de cálculo se considera la selección del tubo hueco cuadrangular de 50x50 mm y con la ayuda del software MDSolids se obtienen los valores del momento flector máximo que se genera, por lo que se procede con los valores resueltos:

#### **Cálculos para el primer miembro (B1)**

- **Valores resueltos del Software MDSolids**

$$R_{Ey} = 178.44 \text{ N}$$

$$M_{max} = -48.29 \text{ Nm}$$

## Cálculos para el segundo miembro (B2)

- **Longitud efectiva**

$$L_e = K * l$$

$$L_e = 2.10 * (0.35 \text{ m})$$

$$L_e = 0.73 \text{ m}$$

- **Relación de esbeltez**

$$SR = \frac{L_e}{r}$$

$$SR = (0.73 \text{ m}) / (0.01945 \text{ m})$$

$$SR = 37.78$$

- **Constante de columna**

$$C_c = 125.66$$

- **Fórmula de Euler para carga crítica**

$$P_{cr} = ASy \left( 1 - \frac{Sy(SR)^2}{4\pi^2 E} \right)$$

$$P_{cr} = (0.0003737 \text{ m}^2) * (250 \text{ MPa}) \left( 1 - \frac{250 \text{ MPa} * (37.78)^2}{4\pi^2 * (200 \text{ GPa})} \right)$$

$$P_{cr} = 89.20 \text{ KN}$$

- **Carga permisible**

$$P_p = \frac{P_{cr}}{3}$$

$$P_p = \frac{89.20 \text{ KN}}{3}$$

$$P_p = 29.73 \text{ KN}$$

### c. Pruebas de diseño del brazo de soporte

Se ha establecido que para la construcción de todo el brazo de soporte para el proceso de inserción tanto inferior como superior, se emplee el tubo hueco cuadrangular de 50x50 mm en acero estructural, por lo que se procede a validar

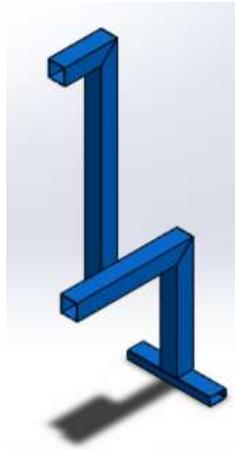
la selección mediante la justificación de esfuerzos y cargas permisibles que se generan en los brazos de soporte. En la Tabla 24 se establecen los valores ya calculados para el brazo superior e inferior.

**Tabla 24**

**Justificación de esfuerzos y cargas permisibles**

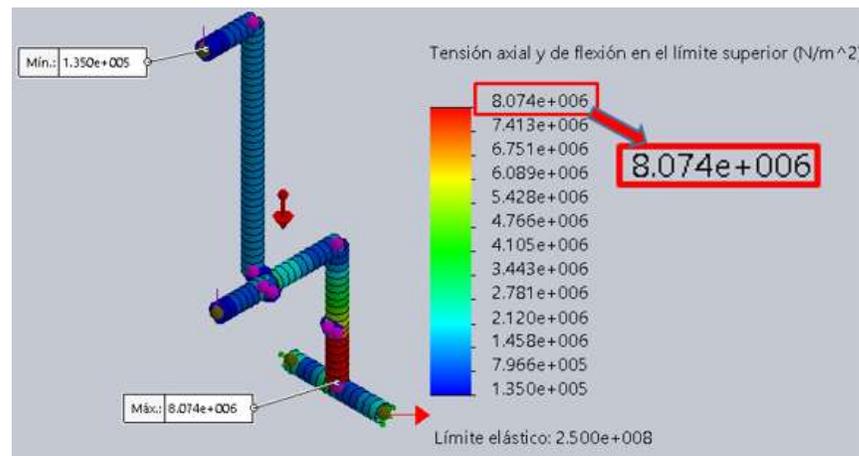
Brazo superior (B1)	Brazo inferior (B2)
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Esfuerzo máximo</b></li> </ul> $\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S}$ $\sigma_{max} = \frac{9.08 \text{ N.m}}{5.655 * 10^{-6} \text{ m}^3}$ $\sigma_{max} = 1.63 \text{ MPa}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Esfuerzo máximo</b></li> </ul> $\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S}$ $\sigma_{max} = \frac{48.29 \text{ N.m}}{5.655 * 10^{-6} \text{ m}^3}$ $\sigma_{max} = 8.52 \text{ MPa}$
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Justificación de esfuerzos</b></li> </ul> <p><i>Esf. de diseño</i> <math>\geq</math> <i>Esf. maximo</i></p> $\sigma_d \geq \sigma_{max}$ $83.33 \text{ MPa} \geq 1.63 \text{ MPa}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Justificación de esfuerzos</b></li> </ul> <p><i>Esf. de diseño</i> <math>\geq</math> <i>Esf. maximo</i></p> $\sigma_d \geq \sigma_{max}$ $83.33 \text{ MPa} \geq 8.52 \text{ MPa}$
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Justificación de cargas</b></li> </ul> <p><i>Carga permisible</i> <math>\geq</math> <i>Carga</i></p> $P_p \geq F$ $26.28 \text{ KN} \geq 56.74 \text{ N}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Justificación de cargas</b></li> </ul> <p><i>Carga permisible</i> <math>\geq</math> <i>Carga</i></p> $P_p \geq F$ $29.73 \text{ KN} \geq 178.44 \text{ N}$

Con los resultados de la tabla anterior se comprueba la seguridad de todo el diseño estructural de los brazos de soporte inferior y superior, en la Figura 75 se muestra el diseño final de los mismos.



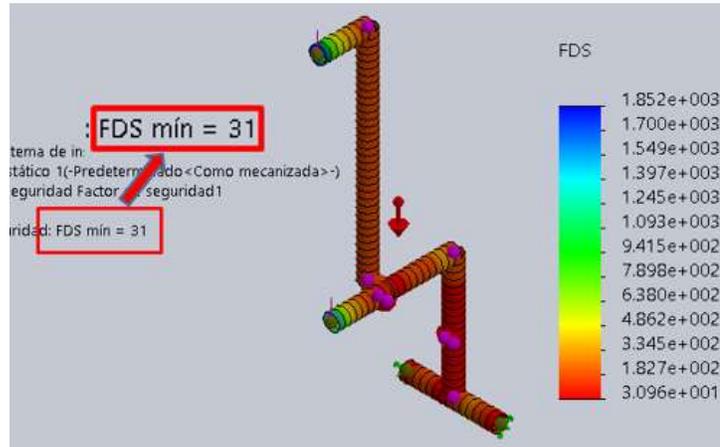
**Figura 75 Brazos de soporte para el proceso de inserción**

Con la ayuda del software CAD, se ha determinado que el esfuerzo máximo que se producirá será de 8.074 MPa, valor similar al valor calculado. En la estructura donde se presenta el esfuerzo máximo es en el brazo de soporte inferior (B2) en el segmento EF, como se puede observar en la Figura 76.



**Figura 76. Análisis de Esfuerzos para el brazo de inserción**

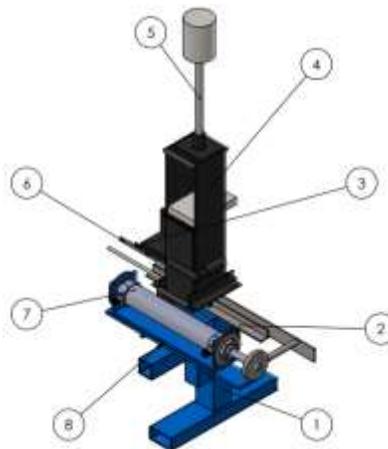
El factor de seguridad mínimo obtenido es de  $FDS = 31$  (ver Figura 77), siendo un valor mayor al FDS de diseño, lo que implica que el diseño del brazo de soporte es completamente seguro.



**Figura 77 Análisis del factor de diseño del brazo de soporte de inserción**

### 3.1.7 Diseño del alimentador de cerdas flexibles

La alternativa que se indujo para el alimentador de cerdas flexibles, es un sistema de alimentación lineal por gravedad y como se estableció en el apartado (2.4 Actuadores), al ser este alimentador parte del proceso de inserción debe disponer de un actuador neumático, el diseño de su estructura parte de inventiva propia ya que debe ajustarse y acoplarse a la matriz de inserción adquirida.



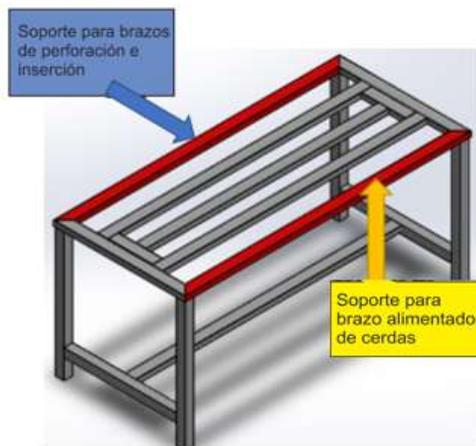
**Figura 78 Partes de la estructura del alimentador de cerdas flexibles**

*Elementos: (1) Brazo de soporte, (2) Base guía, (3) Contra guía, (4) Dosificador de cerdas flexibles, (5) Contra peso, (6) Guía lineal para cerdas flexibles, (7) Cilindro neumático, (8) Soporte del cilindro*

En la Figura 78, se puede observar el diseño final del alimentador ensamblado con su respectivo cilindro neumático, paralelo al vástago del cilindro éste se encuentra acoplado a un eje lineal, encargado de abastecer a la matriz de inserción de suficientes cerdas flexibles mediante un destaje que este posee.

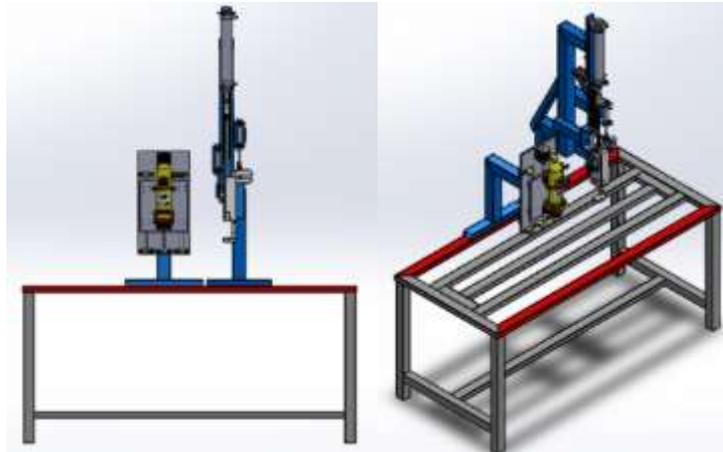
### 3.1.8 Diseño de la mesa base

En el apartado (3.1.4 Diseño del eje Longitudinal X) se estableció las dimensiones de trabajo para la mesa en el eje longitudinal, es así que de acuerdo al espacio físico de trabajo se ha previsto de una mesa base de 1.3 m de largo por 0.60 m de ancho, la misma que tendrá dos miembros paralelos a su eje longitudinal (ver Figura 79), uno de estos sirve de base para montar los brazos de soporte para los procesos de perforación e inserción y el segundo miembro soporta el brazo de soporte para el alimentador de cerdas.



**Figura 79 Modelo CAD de la mesa base**

Para calcular las dimensiones del perfil a emplearse en el diseño de la mesa, se analiza el miembro más crítico, siendo este la viga que soporta el peso de los dos brazos para el proceso de perforación e inserción, tal como se muestra en Figura 80.



**Figura 80 Diseño de mesa base con brazos de soporte**

Se realiza el análisis como una viga simplemente apoyada, la misma que soporta dos cargas perpendiculares, con el diseño CAD de los dos brazos se obtiene el peso total de cada uno, la Figura 81 muestra el diagrama de cuerpo libre respectivo del sistema.

- **Peso del brazo de soporte de perforación ( $F_1$ )**

*Masa total del brazo de perforación = 6.22 Kg*

$$F_1 = (6.22 \text{ Kg}) * \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$F_1 = 60.96 \text{ N}$$

- **Peso del brazo de soporte de inserción ( $F_2$ )**

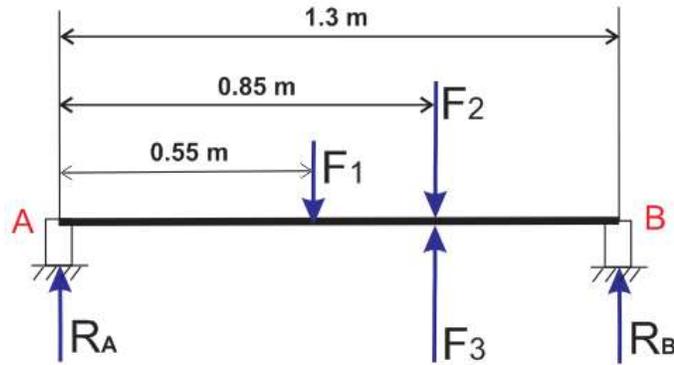
*Masa total del brazo de inserción = 16.77 Kg*

$$F_2 = (16.77 \text{ Kg}) * \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$F_2 = 164.35 \text{ N}$$

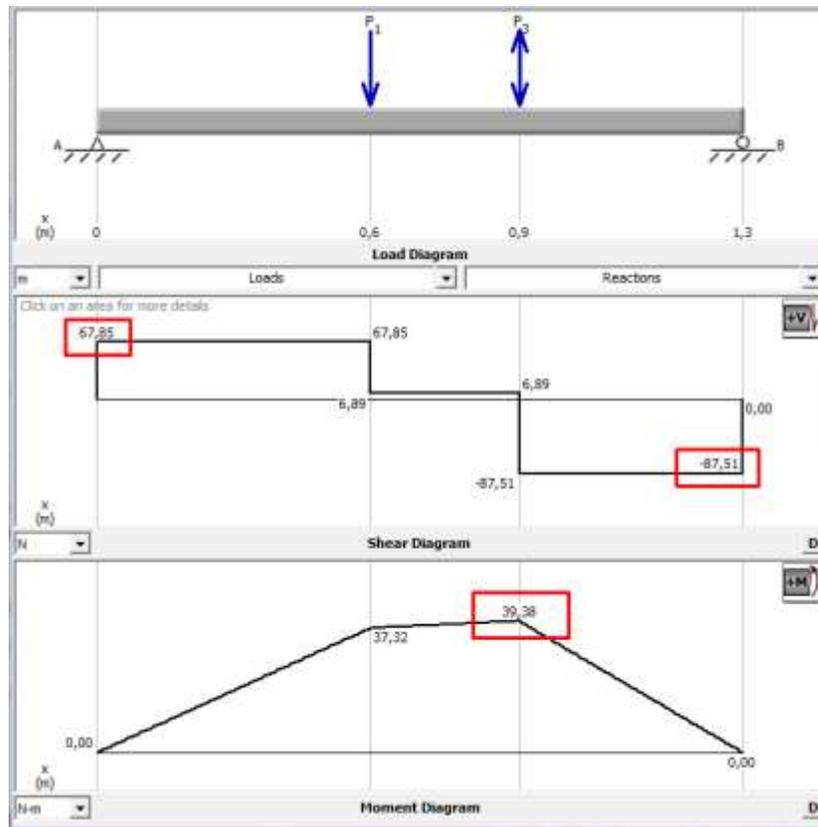
- **Fuerza de empuje generada por el proceso de inserción ( $F_3$ )**

$$F_3 = 69.95 \text{ N (Valor antes calculado)}$$



**Figura 81 Diagrama de cuerpo libre del miembro crítico de la mesa base**

El material designado para la construcción de la mesa base es acero estructural (ver Tabla 19 ), se emplea el software MDSolids para obtener las reacciones y momentos flectores debido a que el procedimiento de cálculo ya se desarrolló en puntos anteriores, por lo tanto:



**Figura 82 Reacciones y momentos flectores del miembro crítico de la mesa**

- **Valores resueltos del Software MDSolids**

$$R_A = 67.85 N, R_B = 87.51 N$$

$$M_{max} = 39.38 Nm$$

- **Esfuerzo de diseño del acero estructural**

$$\sigma_d = 83.33 MPa$$

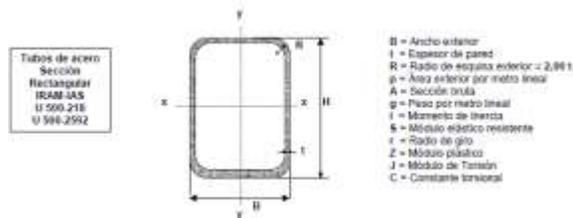
- **Módulo de sección**

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{max}}$$

$$S = \frac{39.38 N.m}{83.83 MPa}$$

$$S = 0.00046 * 10^{-3} m^3 (0.46 cm^3)$$

En el Anexo C, que corresponde a tubería hueca rectangular se determina un valor de módulo de sección mayor al calculado, en la Figura 88 el tubo idóneo es el tubo rectangular de 30x50 mm, ya en la práctica el tubo rectangular a emplearse por disponibilidad inmediata es el tubo hueco rectangular de 25x50 mm, de la misma manera presenta módulo de sección similar.



H	h	t	p	A <sub>g</sub>	g	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	r <sub>x</sub>	Z <sub>x</sub>	Z <sub>y</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	J	C	
[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m]	[cm <sup>2</sup> ]	[kg/m]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	
20	40	0.00	0.117	1.027	0.896	2.129	1.064	1.440	1.319	0.727	0.727	0.841	0.816	1.716	1.341
		1.25	0.116	1.367	1.097	2.817	1.408	1.420	1.769	0.853	0.853	0.826	1.090	2.276	1.809
		1.60	0.115	1.752	1.375	3.431	1.716	1.400	2.183	1.149	1.149	0.810	1.341	2.773	2.245
30	40	1.25	0.136	1.647	1.293	3.795	1.878	1.510	2.253	1.412	1.008	1.290	1.851	4.572	3.278
		1.60	0.135	2.077	1.625	4.611	2.306	1.492	2.756	2.092	1.866	1.194	2.256	5.646	3.474
		2.00	0.133	2.637	1.992	5.491	2.746	1.471	3.376	2.504	2.336	1.175	2.766	6.762	4.225
30	50	1.25	0.156	1.897	1.489	6.438	2.576	1.842	3.138	2.928	1.952	1.242	2.211	6.369	3.496
		1.60	0.155	2.360	1.877	7.950	3.180	1.923	3.914	3.596	2.366	1.226	2.751	7.816	4.363
		2.00	0.153	2.937	2.306	9.519	3.812	1.801	4.744	4.268	2.859	1.208	3.326	9.368	5.345
2.50	0.151	3.562	2.687	11.241	4.510	1.776	5.624	5.048	3.421	1.190	3.959	11.058	6.471		

Figura 83 Selección de las dimensiones del tubo rectangular

### a. Prueba de diseño de la mesa base

Se calcula el esfuerzo actual que se produce en el miembro más crítico de la mesa base, ya con el material y las dimensiones del perfil a emplearse, entonces:

#### Datos:

Módulo de sección:  $2.859 \text{ cm}^3 = 2.859 * 10^{-6} \text{ m}^3$ . (ver Anexo C)

- **Esfuerzo máximo**

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S}$$

$$\sigma_{max} = \frac{39.38 \text{ N.m}}{2.859 * 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{max} = 13.77 \text{ MPa}$$

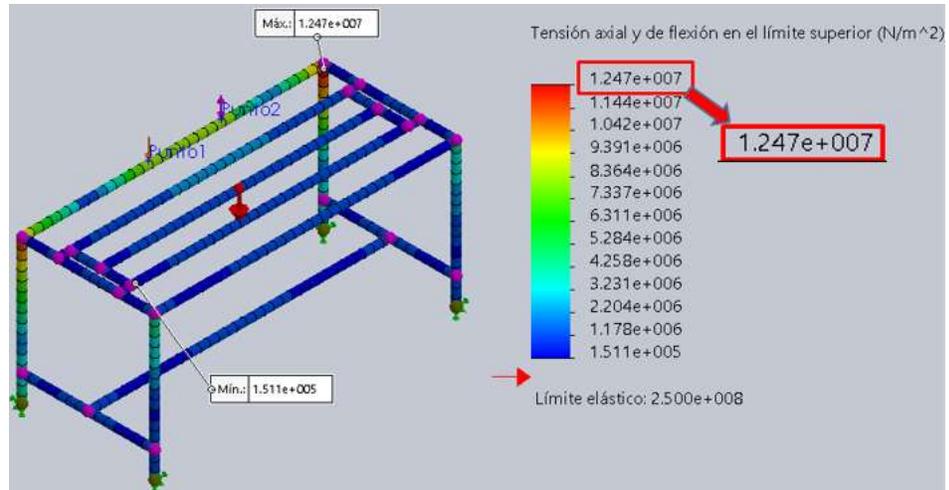
- **Justificación de esfuerzos**

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$83.33 \text{ MPa} \geq 13.77 \text{ MPa}$$

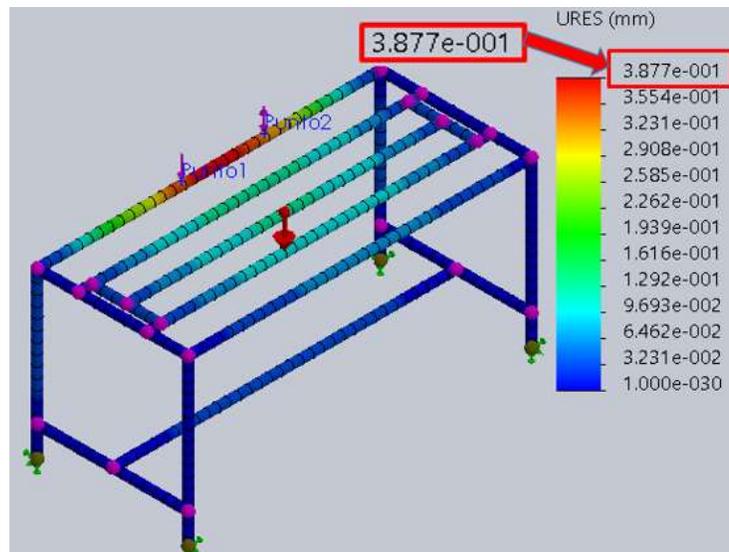
De esta manera se aprueba que el diseño estructural de los miembros de soporte para las cargas es seguro.

El esfuerzo máximo producido en el Software CAD en el lado de la viga que soporta el mayor número de componentes es de 12.47 MPa como se ve en Figura 84, cercano al valor calculado, lo que indica que la mesa base soportará de manera eficiente las cargas acopladas sin que tienda a deformarse.

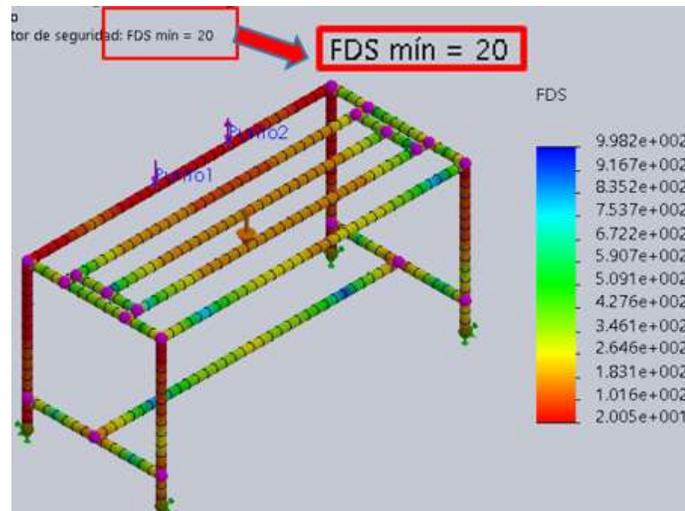


**Figura 84. Análisis de esfuerzos de la mesa base**

En la Figura 85 se puede observar la deformación máxima que se genera en la mesa base, dando como resultado una deformación tolerable de  $3.877 \times 10^{-0.01} = 0.38 \text{ mm}$ . El factor de seguridad resultante es de 20 (ver Figura 86) siendo un FDS mucho mayor al valor de diseño.

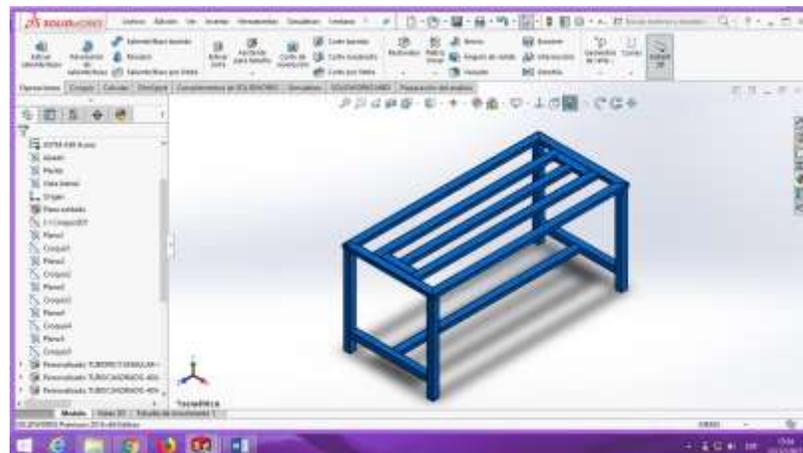


**Figura 85. Análisis de deformación máxima en la mesa base**



**Figura 86 Análisis de factor de seguridad de la mesa base**

De esta manera se garantiza todo el diseño de la mesa base y en la Figura 87 se muestra el diseño final de la misma, por lo que se puede proceder a la construcción de la estructura.



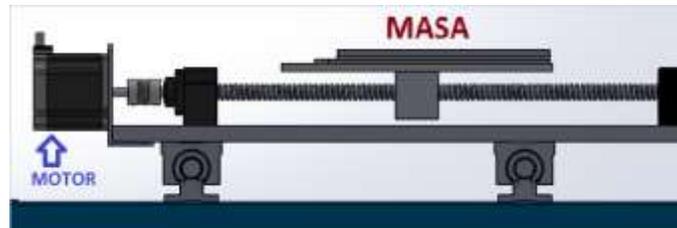
**Figura 87 Diseño CAD de la mesa base**

### 3.2 Selección de motores

En puntos anteriores se diseñó las bases superior e inferior de la estructura de la máquina, por lo que se procede a calcular el par del motor necesario para accionar el sistema de movimientos en el eje X e Y.

### 3.2.1 Sistema de movimiento eje Y

El primer motor a seleccionarse es para el sistema mostrado en la Figura 88 correspondiente al desplazamiento de la base superior en el eje transversal Y. Como dato principal es requerido el peso total de la mesa superior y en el apartado (3.1.3 Diseño del eje transversal Y) se obtuvo todo el peso neto de la misma que es de 14.21 N.



**Figura 88 Sistema de movimientos de eje Y**

Un factor que debe ser tomado en cuenta para cálculos posteriores, es el coeficiente de fricción que aunque en la disposición de esta estructura es despreciable debido a que los rieles o guías disminuyen considerablemente este aspecto, es necesario incluir un coeficiente de fricción estático para poder obtener la fuerza total requerida al mover la carga total del eje Y. La Tabla 25 muestra los diferentes coeficientes de roce estático y dinámico de algunas superficies.

**Tabla 25**

#### Coeficientes de roce estático

Superficie	Coeficiente de fricción estático ( $u_s$ )	Coeficiente de fricción cinético ( $u_k$ )
Madera sobre madera	0.4	0.2
Hielo sobre hielo	0.1	0.03
Metal sobre metal (lubricado)	0.15	0.07
Hule sobre concreto seco	1.0	0.5

Continúa 

Articulaciones en humanos	0.01	0.01
---------------------------	------	------

Fuente: (jfinternational, 2017)

La fuerza de fricción debe ser sumada a la fuerza que actúa en el eje, por lo tanto se procede a calcular la fuerza total necesaria para mover la carga del eje Y ( $F_{ey}$ ) mediante la ecuación [ 17 ], empleando el valor del coeficiente de fricción estático de metal sobre metal de la tabla anterior.

$$F_{ey} = F + F * u \quad [ 17 ]$$

Donde:

$F$ : Fuerza que actúa en el eje por inercia

$u$ : coeficiente metal sobre metal (lubricado)

$$F_{ey} = 14.21 N + (14.21 N) * (0.15)$$

$$F_{ey} = 16.34 N$$

El torque que debe proveer el motor se calcula mediante la ecuación [ 18 ], para lo cual se tienen los siguientes datos:

**Datos:**

$P$ : 0.004 m

$n$  = 0.90

$$T_{ejey} = F_{ey} * \frac{P_y}{2\pi n} * f \quad [ 18 ]$$

Donde:

$T_{ejey}$ : Torque requerido para el eje Y

$P_y$ : Paso del husillo del eje Y (m)

$n$ : Rendimiento del husillo de paso

$f$ : factor de seguridad

$$T_{ejey} = (16.34 N) * \frac{0.004 m}{2 * \pi * (0.90)} * (1.5)$$

$$T_{ey} = 0.017 N.m$$

Para la selección del motor en la Tabla 26 se encuentran las especificaciones técnicas de los motores Nema más comunes. En el Anexo D, se puede apreciar más a detalle las características de dichos motores.

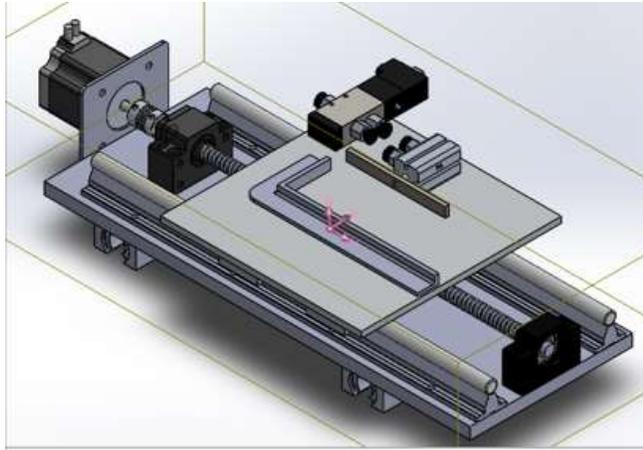
**Tabla 26**

**Datos técnicos de los motores NEMA**

<b>Motor</b>	<b>Corriente Nominal (Amp)</b>	<b>Par de retención (Nm)</b>	<b>Inercia del rotor (g.cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Pasos</b>	<b>Peso (Kg)</b>
<b>Nema 17</b>	2	0.48	57	200	0.28
<b>Nema 23</b>	2.2	1.50	220	200	0.60

De acuerdo a los datos técnicos proporcionados, el motor idóneo que cumple con el torque requerido para mover el sistema del eje Y es el Motor Nema 17, como se mencionó en puntos anteriores el sobredimensionar algún miembro de estructura o selección de motor, mientras no afecte la funcionalidad del sistema se puede proceder de dicha manera, es así que por disposición y accesibilidad del motor, se empelará el NEMA 23 para dar movimiento al eje Y.

En la Figura 89 se muestra el diseño final para la mesa superior ya ensamblado con sus respectivos ejes, husillo, motor y con todos los componentes que este soporta.



**Figura 89** Ensamble de la mesa superior (Eje Y)

### 3.2.2 Sistema de movimiento eje X

De la misma manera se emplean las ecuaciones [ 17 ] y [ 18 ], para seleccionar el motor adecuado para mover todo el sistema del eje X es decir la mesa superior (ver Figura 89), se emplean los siguientes datos:

**Datos:**

$F$ : 50.47 N (*Peso total de la mesa superior*)

$P_x$ : 0.005 m

- **Cálculo de ecuación [ 17 ]**

$$F_{ex} = F + F * u$$

$$F_{ex} = 50.47 \text{ N} + ( 50.47 \text{ N} ) * (0.15)$$

$$F_{ex} = 58.04 \text{ N}$$

- **Cálculo de ecuación [ 18 ]**

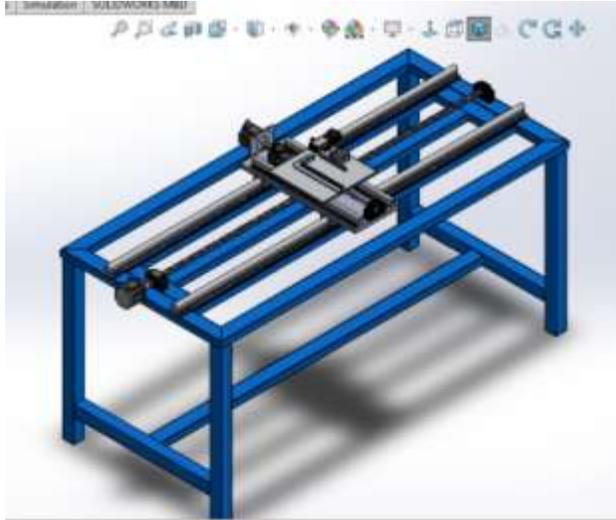
$$T_{ejex} = F_{ex} * \frac{P_x}{2\pi n} * f$$

$$T_{ejey} = (58.04 \text{ N}) * \frac{0.005 \text{ m}}{2 * \pi * (0.90)} * (1.5)$$

$$T_{ey} = 0.76 \text{ N.m}$$

Al revisar los datos técnicos de la Tabla 26, se puede observar que el motor adecuado es el NEMA 23 ya que el torque establecido es más que suficiente para mover el sistema del eje X.

En la Figura 90 se muestra ya el diseño final de la mesa superior e inferior ensamblado con sus respectivos ejes guías, motores, acoples y husillos de bolas conjuntamente con la mesa base.



**Figura 90 Ensamble final de la mesa superior e inferior**

### **3.2.3 Sistema de movimiento del eje Z proceso de perforación**

El motor a seleccionarse deberá mover el sistema de transporte vertical del taladro para el proceso de perforación, la Figura 91 muestra el diseño CAD de todos los componentes que debe soportar el sistema y de la misma manera se determinar la masa total que actúa en el mismo.



**Figura 91 Diseño CAD para el sistema de perforación**

**Datos:**

$m = \text{masa total} : 2.78 \text{ Kg}$  (masa del Diseño CAD + masa del taladro)

$v = \text{velocidad máxima} : 0.3 \text{ m/s}$  (ver Anexo E)

$t = \text{tiempo de aceleración} : 0.2 \text{ s}$  (ver Anexo E)

$f = \text{resistencia de la superficie de la guía} : 20 \text{ N}$  (ver Anexo E)

- **Peso Total**

$$F = m * g$$

$$F = (2.78 \text{ Kg}) * \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * 1.5$$

$$F = 40.87 \text{ N}$$

- **Aceleración**

$$\alpha = V/t$$

$$\alpha = \frac{0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.2 \text{ s}}$$

$$\alpha = 1.5 \text{ m/s}^2$$

Es necesario calcular la fuerza que se produce tanto para la elevación como el descenso del sistema de perforación, de la misma manera en aceleración y movimiento uniforme, por lo que se procede:

- **Durante la aceleración hacia arriba**

$$F_{a1} = F + f + m * a$$

$$F_{a1} = 40.87 \text{ N} + 20 \text{ N} + (2.78 \text{ kg} * 1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

$$F_{a1} = 40.87 \text{ N} + 20 \text{ N} + 4.17 \text{ N}$$

$$F_{a1} = 65.04 \text{ N}$$

- **Durante el movimiento uniforme hacia arriba**

$$F_{a2} = F + f$$

$$F_{a2} = 40.87 \text{ N} + 20 \text{ N}$$

$$F_{a2} = 60.87 \text{ N}$$

- **Durante la desaceleración hacia arriba**

$$F_{a3} = F + f - m * a$$

$$F_{a3} = 40.87 \text{ N} + 20 \text{ N} - 4.17 \text{ N}$$

$$F_{a3} = 56.7 \text{ N}$$

- **Durante la aceleración hacia abajo**

$$F_{a4} = F - f - m * a$$

$$F_{a4} = 40.87 \text{ N} - 20 \text{ N} - 4.17 \text{ N}$$

$$F_{a4} = 16.7 \text{ N}$$

- **Durante el movimiento uniforme hacia abajo**

$$F_{a5} = F - f$$

$$F_{a5} = 40.87 \text{ N} - 20 \text{ N}$$

$$F_{a5} = 20.87 \text{ N}$$

- **Durante la desaceleración hacia abajo**

$$F_{a6} = F + f - m * a$$

$$F_{a6} = 40.87 N + 20 N - 4.17 N$$

$$F_{a6} = 56.7 N$$

Por ende, La carga máxima que se genera en el husillo es de 65.04 N, con este dato se emplea la ecuación [ 18 ] para determinar el torque requerido.

- **Cálculo de ecuación [ 18 ]**

**Datos:**

$P_z$ : 0.008 m (pasos del husillo eje Z)

$$T_{ejex} = F_{max} * \frac{P_z}{2\pi n} * f$$

$$T_{ejey} = (65.04 N) * \frac{0.008 m}{2 * \pi * (0.90)} * (1.5)$$

$$T_{ey} = 0.14 N.m$$

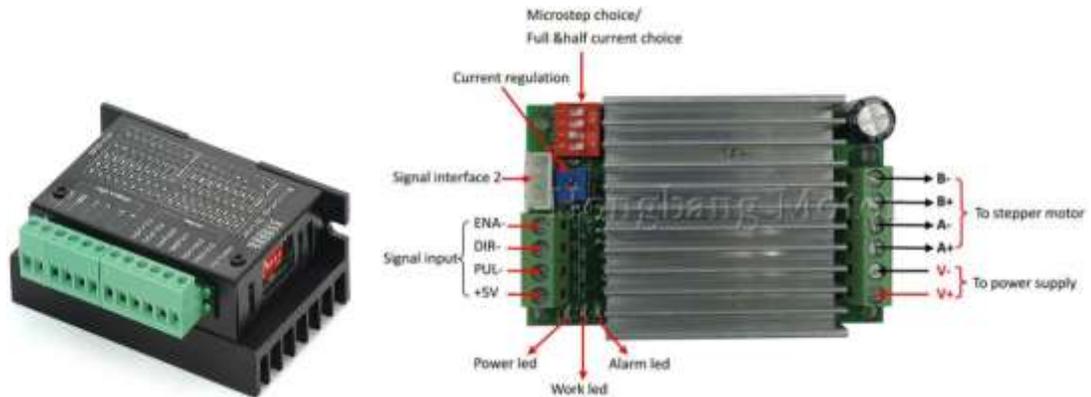
De acuerdo a los datos técnicos proporcionados en la Tabla 26 el motor adecuado a cumplir con el torque requerido es el Motor Nema 17.

### 3.3 Diseño eléctrico/electrónico

En este apartado se establecerán los diagramas de conexión de cada motor con su respectivo driver o controlador.

#### 3.3.1 Diagrama de Conexión eléctrica de motores paso a paso

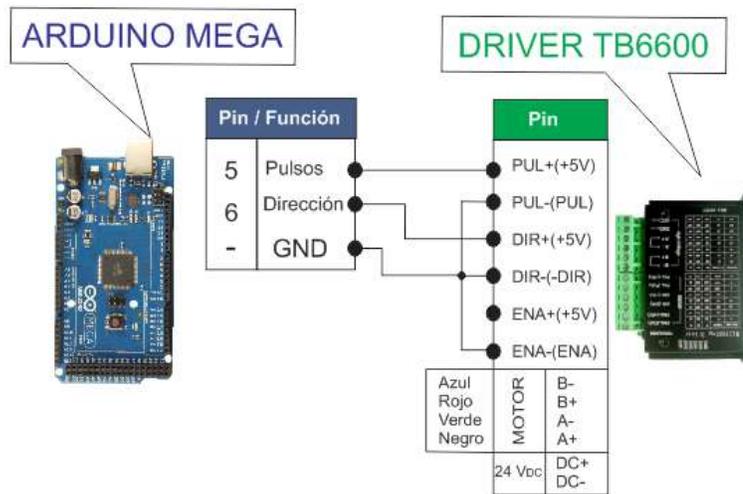
En la máquina se dispondrá de 4 motores paso a paso, los mismos que han sido seleccionados en el apartado 3.2 Selección de motores, el controlador para los motores NEMA 23 serán los drivers TB6600 (ver Figura 92), estos permiten configurar los pasos a emplearse para el motor, además de soportar hasta 5A por cada canal, lo que lo hace un controlador fiable, robusto, económico y accesible.



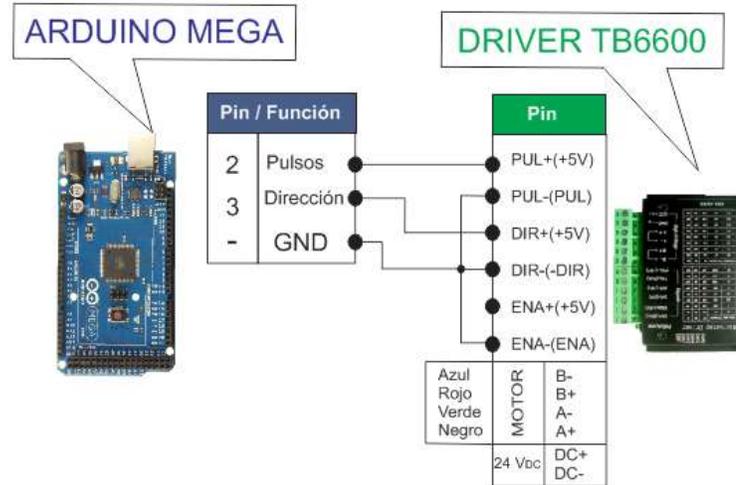
**Figura 92 Driver TB6600**

Autor: (robotshop, 2017)

La configuración que se emplea en este controlador es de pasos completos por lo que los Switchs designados en el driver como SW1, SW2 y SW3 se mantendrán en bajo. En la Figura 93 y Figura 94, se muestran los diagramas de la conexión eléctrica entre los pines de la tarjeta Arduino Mega y el driver para los motores del eje X e Y.

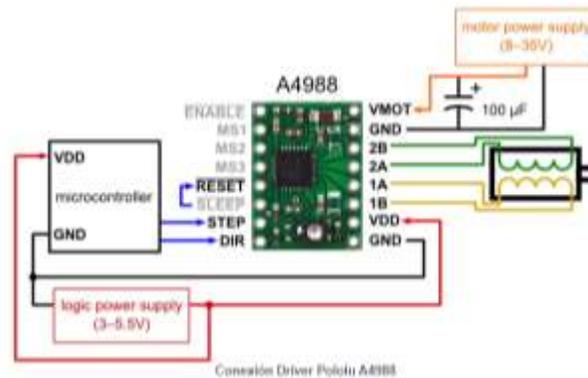


**Figura 93 Conexión de pines Arduino Mega – NEMA 23 (EJE Y)**



**Figura 94 Conexión de pines Arduino Mega – NEMA 23 (EJE X)**

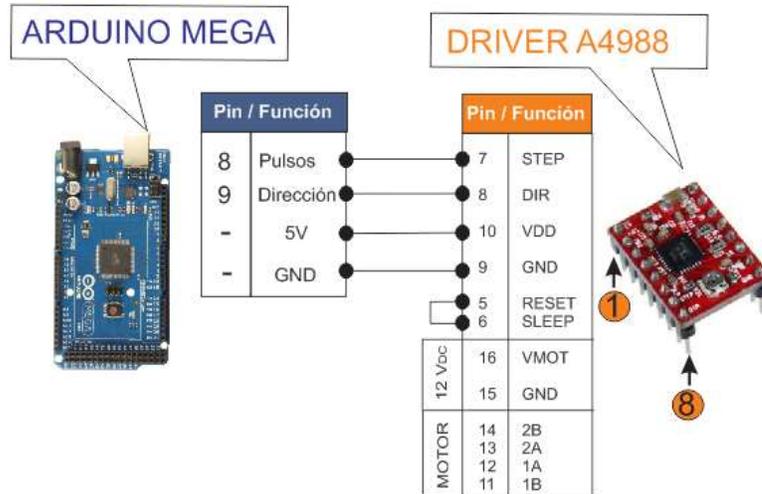
Los motores NEMA 17 usualmente se emplean con el driver Pololu A4988, el diagrama de su conexión general se presenta en la Figura 95. Para una configuración de pasos completos del motor los pines MS1, MS2 y MS3 deben estar en bajo.



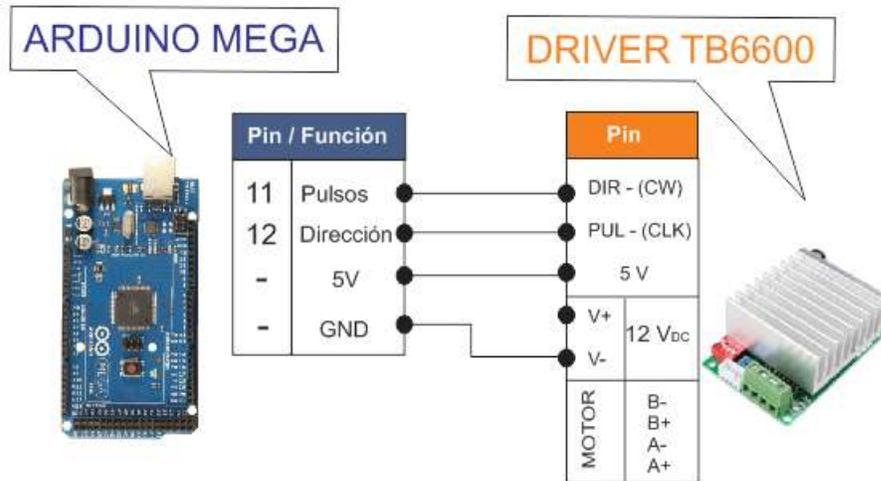
**Figura 95 Modo de conexión del driver Pololu A4988**

Autor: (robotshop, 2017)

De acuerdo al uso de los pines de la tarjeta Arduino MEGA para el proyecto a desarrollarse, en la Figura 96 se muestra las conexiones del primer motor NEMA 17 que tiene como función el movimiento del eje Z para el proceso de perforación y la Figura 97 ilustra la conexión del segundo motor NEMA 17 encargado de impulsar el alambre del carrito hacia la matriz de inserción.



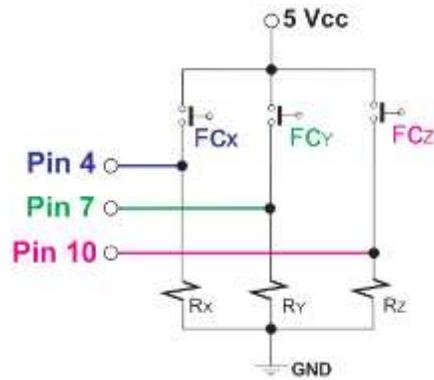
**Figura 96 Conexión de pines Arduino Mega – NEMA 17 (EJE Z)**



**Figura 97 Conexión de pines Arduino Mega – NEMA 17 (ALAMBRE)**

**3.3.2 Diagrama de conexión de finales de carrera**

Al requerir la máquina de un punto de referencia o HOME para poder posicionarse en el espacio, es indispensable el uso de finales de carrera. En la Figura 98 se establece el diagrama de conexión Pull Down para los finales de carrera (FC) de los ejes de la mesa (X e Y) y el Proceso de perforación (eje Z).



**Figura 98 Diagrama de conexión de los finales de carrera**

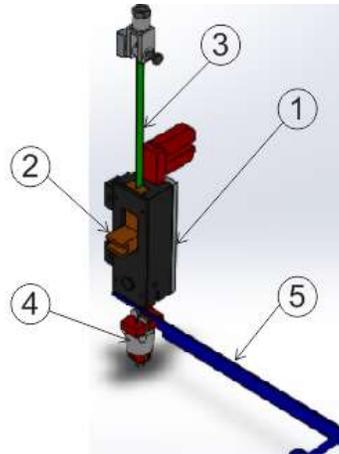
La figura a continuación muestra los pines empleados de la tarjeta Arduino Mega para la conexión de los finales de carrera electromecánicos.



**Figura 99 Pines Arduino Mega – Finales de carrera**

### 3.4 Diagrama del circuito electroneumático

Los actuadores neumáticos serán empleados en su mayoría en el proceso de inserción, la Figura 100 muestra las partes de la matriz de inserción que requieren el uso de un actuador neumático y en la Tabla 27 se establece la función de cada actuador que se emplea, así como también el pin de la placa Arduino establecida para su control.



**Figura 100 Matriz del insertador con sus componentes**

*Elementos: (1) Marco, (2) Cortador, (3) Lengüeta, (4) Boca, (5) Dosificador de cerdas flexibles*

**Tabla 27**

**Actuadores neumáticos en el proceso de inserción**

Actuador	Pin de control (Arduino)	Designación	Función
01	PIN 43	Sujetador de matriz	Se encarga de prensar cada matriz pequeña, mediana y grande en la mesa superior.
02	PIN 45	Marco	Su función es la de servir de molde para la forma de la grapa.
03	PIN 47	Cortador	Corta el alambre y conjuntamente con el marco y forma la grapa en sus cuchillas internas.
04	PIN 49	Lengüeta	Se encarga de llevar en conjunto la grapa y el material a través de la matriz hacia la boca.
05	PIN 51	Boca	Sirve de canal para las cerdas

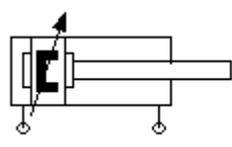
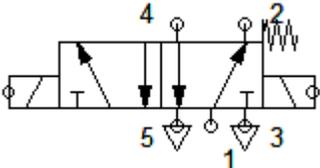
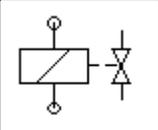
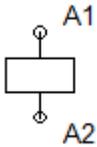
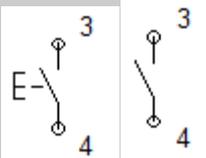
Continúa 

			flexibles, aprisionándolas en su canal con la grapa.
06	PIN 53	Guía de Alimentación de cerdas flexibles	Lleva el material exacto (cerdas flexibles), mediante un destaje en su guía lineal hacia la matriz de inserción.

Ya establecido el número de actuadores neumáticos (6), estos requieren de solenoides y relés para su activación, en la Tabla 28 se enlistan los elementos necesarios para diseñar el circuito electroneumático.

**Tabla 28**

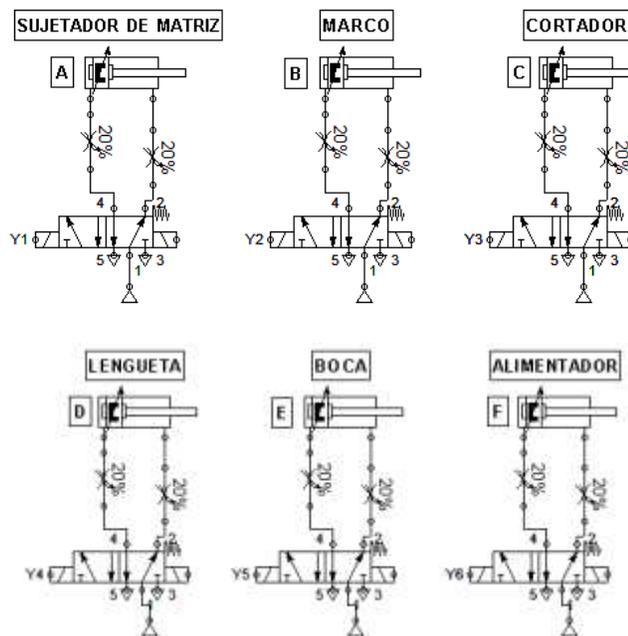
**Componentes del circuito electroneumático**

Simbología	Nombre	Cantidad
	Actuador neumático de doble efecto	X 6
	electroválvula de 5/2 vías	X 6
	Solenoides de válvula	X 6
	Relé	X 6
	Pulsadores, Obturadores	Varios

El circuito electroneumático consta de 2 partes: la primera es el circuito neumático y la segunda es el circuito eléctrico que se subdivide en la parte de control y la parte de potencia.

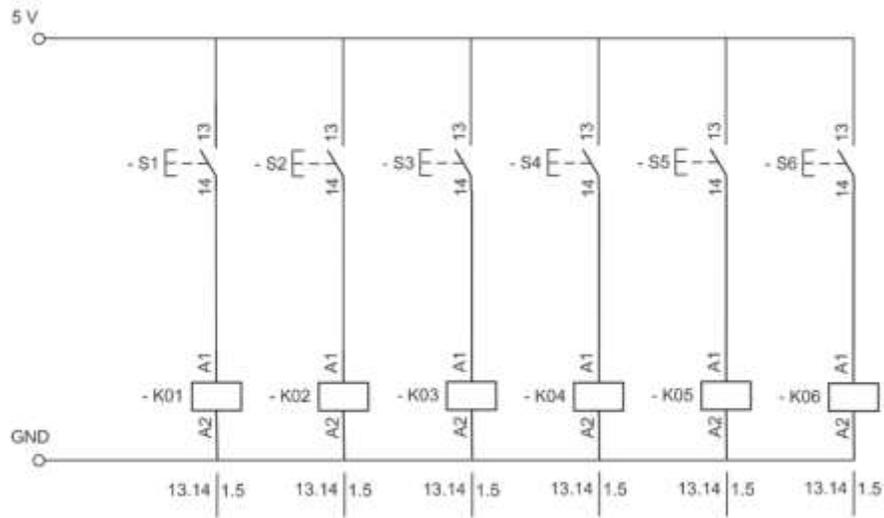
### 3.4.1 Diagramas de conexión

Se empleará el software FluidSIM para verificar el funcionamiento en la secuencia de los actuadores y establecer las conexiones de cada uno. La Figura 101 muestra las conexiones de los 6 actuadores neumáticos con sus respectivas electroválvulas.



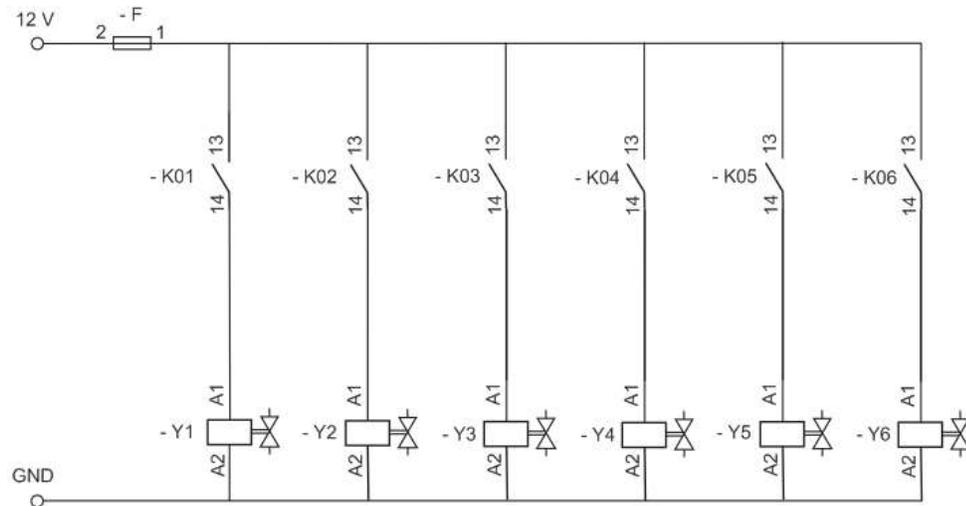
**Figura 101 Circuito neumático**

Para el control de los actuadores se empleará la tarjeta de control preseleccionada Arduino Mega, como en la Tabla 27 ya se designó los pines de control para cada cilindro neumático, estos pines de la tarjeta Arduino actúan en el circuito de control como pulsadores ya que se generará una señal de activación o desactivación (HIGH - LOW). La Figura 102 muestra el diagrama del circuito eléctrico de control con la activación directa para cada relé (K) que se emplea para cada actuador.



**Figura 102 Circuito eléctrico. Parte de control**

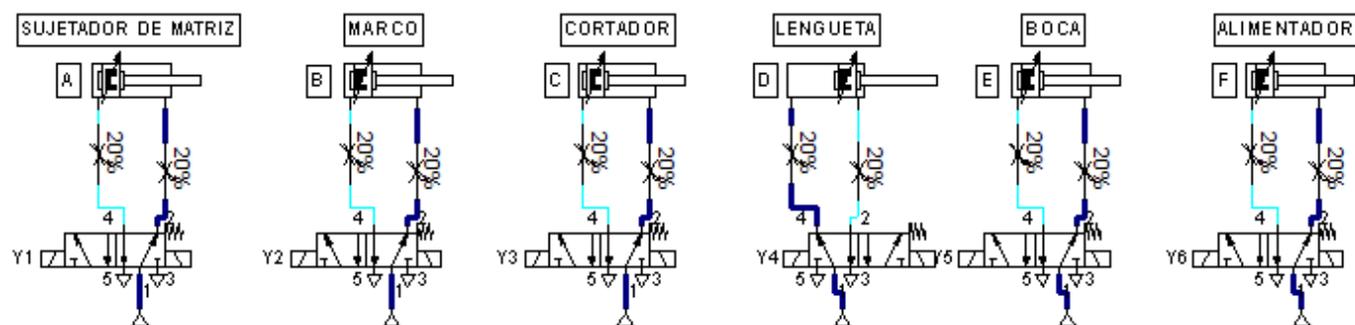
En la Figura 103 se observa el diagrama de conexiones que se emplea para el circuito de potencia en la activación de cada solenoide (Y).



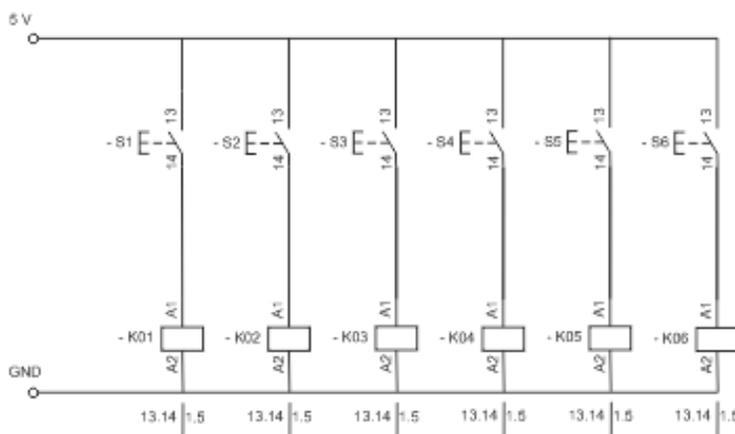
**Figura 103 Circuito eléctrico. Parte de potencia**

A continuación se puede apreciar el diagrama completo del circuito electro neumático empleado para el proceso de inserción.

## CIRCUITO NEUMÁTICO



CIRCUITO DE CONTROL



CIRCUITO DE POTENCIA

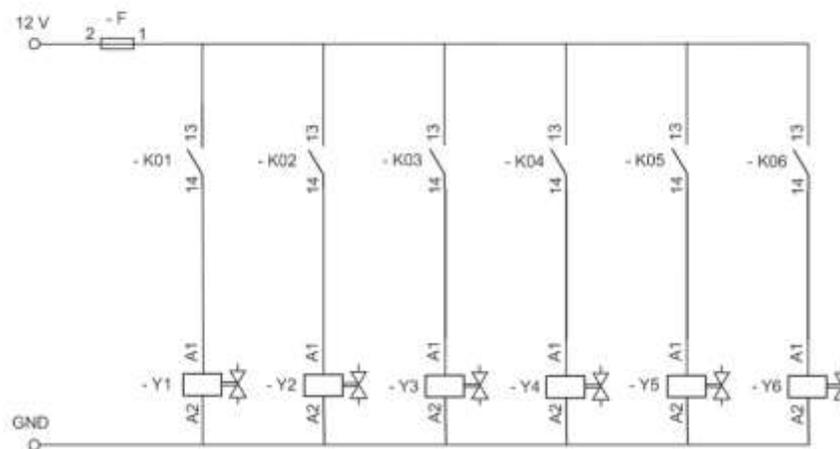
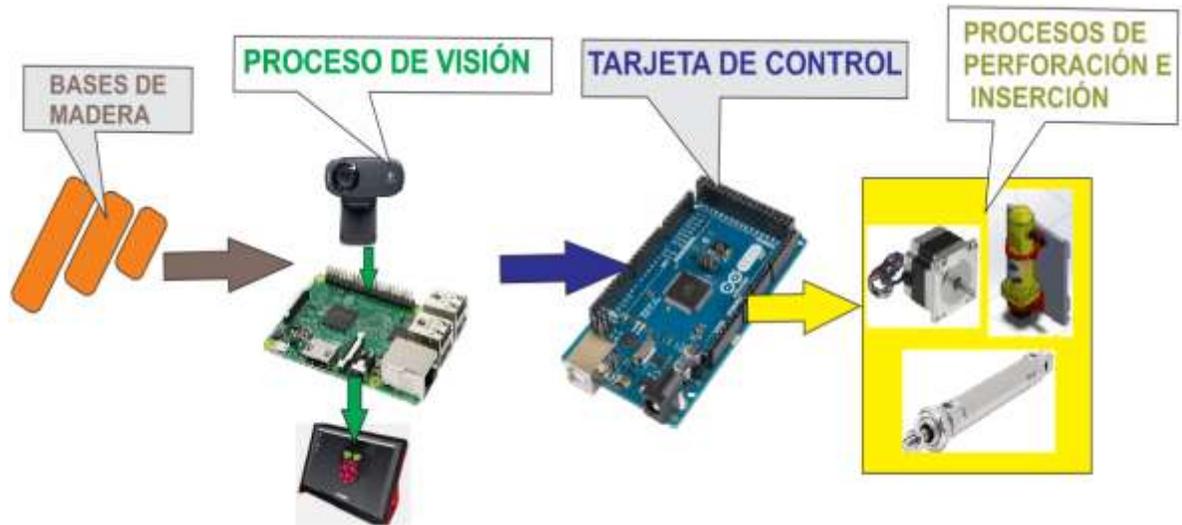


Figura 104 Circuito electro neumático

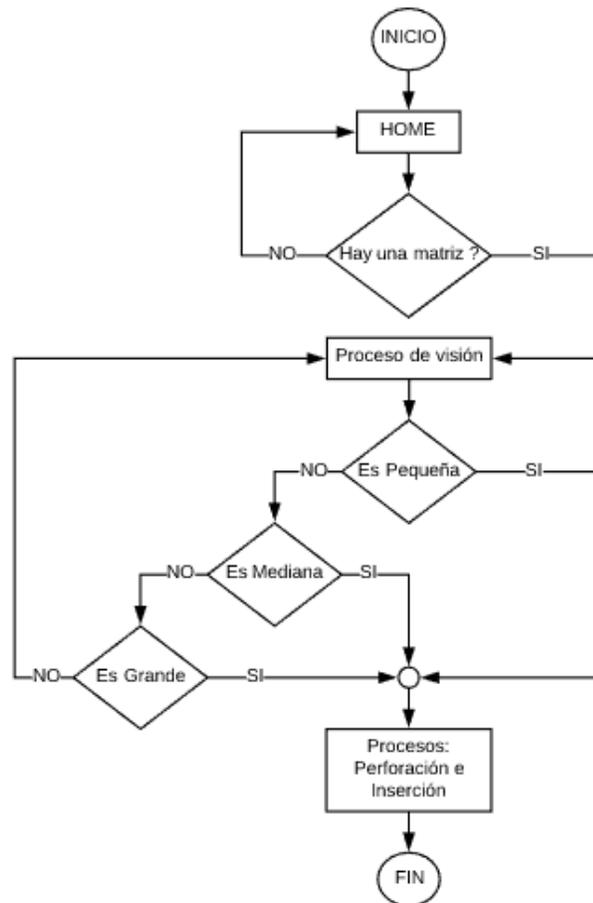
### 3.5 Sistema de control

De manera general la Figura 105 muestra el proceso de control y funcionamiento de la máquina perforadora e insertadora a desarrollarse.



**Figura 105 Proceso general de funcionamiento y control**

El funcionamiento general de la máquina se define por el diagrama de flujo referido en la Figura 106, la misma que establece en un inicio el reconocimiento de áreas de cada matriz o bases de madera y la configuración automática de toda la máquina para los procesos de perforación e inserción respectivos a cada una.



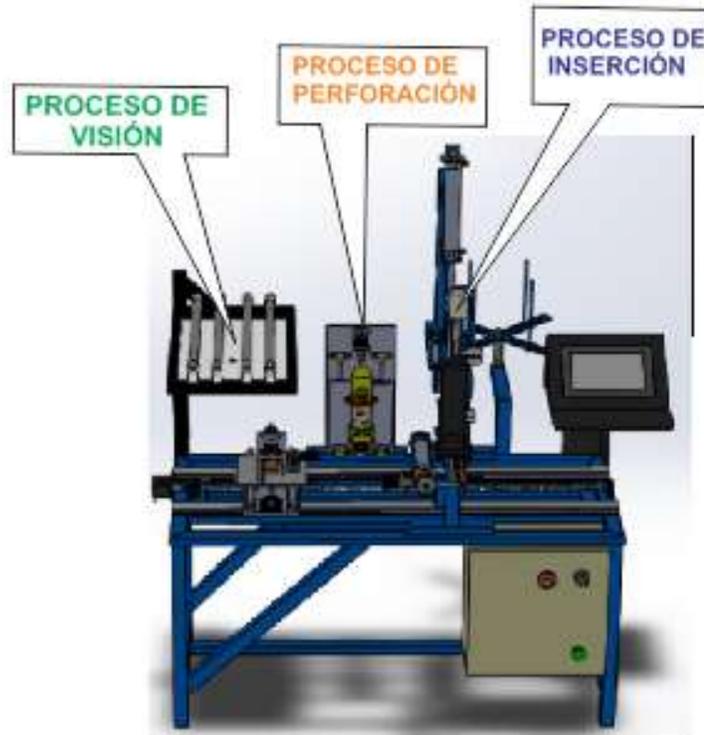
**Figura 106 Diagrama de flujo del funcionamiento general de la máquina**

El funcionamiento parte en el proceso de visión artificial, con el reconocimiento de las áreas de interés de las diferentes bases de madera, el programa desarrollado en el software Python y cargado en la tarjeta Raspberry se encarga de reconocer una máscara establecida en un rango de valores del color a detectar, mediante la función “moments” se calcula el área de la máscara y se compara con valores establecidos, para determinar si la base matriz es pequeña, mediana o grande, la programación se la puede observar en el Anexo F.

Debido a que la tarjeta Raspberry dispone de puertos USB, ésta se encargará de energizar a la tarjeta Arduino Mega y habilitar la comunicación serial con el mismo.

### 3.5.1 Diseño CAD de la máquina

Finalmente el proyecto a implementarse dispone de tres procesos claves como anteriormente se los mencionó, estos son: el sistema de visión artificial, el proceso de perforación y finalmente el proceso de inserción. La Figura 107 muestra el diseño CAD completo de toda la máquina perforadora insertadora con sus respectivos procesos a desarrollarse.



**Figura 107 Diseño CAD de la máquina última**

## CAPÍTULO IV

### CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA PERFORADORA INSERTADORA

El capítulo presente comprende toda la construcción mecánica e implementación eléctrica y electrónica de toda la máquina, también las debidas pruebas de funcionamiento de la parte de visión artificial y procesos de perforación e inserción.

#### 4.1 Construcción e implementación de estructuras

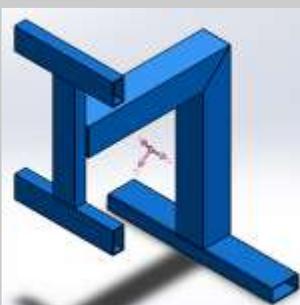
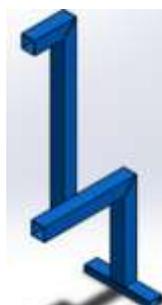
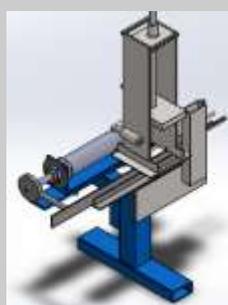
Establecidos todos los cálculos de diseño para la estructura de la máquina y designado los materiales a emplearse, se procede a la construcción de toda la estructura en los diferentes procesos requeridos, para facilitar su desarrollo en la Tabla 29 se establece de manera progresiva cada estructura y su diseño mecánico a realizarse.

**Tabla 29**

#### División estructural de la máquina

N	Nombre	Material	Dimensiones	Diseño mecánico
01	Mesa base	Acero estructural ASTM A36	Tubo hueco rectangular de 25x50 mm	

Continúa 

<b>02</b>	Estructura del sistema de visión	Madera	Vigas rectangulares de 40x30 mm	
<b>03</b>	Brazo de soporte para el proceso de perforación	Acero estructural ASTM A36	Tubo cuadrado de 50*50 mm y Tubo hueco rectangular de 25x50 mm	
<b>04</b>	Brazo de soporte para el proceso de inserción	Acero estructural ASTM A36	Tubo cuadrado de 50*50 mm y Tubo hueco rectangular de 25x50 mm	
<b>05</b>	Brazo y alimentador de cerdas flexibles estructura del	Acero estructural ASTM A36	Tubo cuadrado de 50*50 mm y platinas de 6 mm de espesor	

#### 4.1.1 Construcción de la mesa base

Toda la base se encuentra construida con perfiles estructurales a los cuales se les realiza una serie de cortes con las dimensiones ya establecidas en los planos de los anexos para luego proceder a unirlos mediante soldadura por arco eléctrico con electro revestido, (ver Figura 108 y Figura 109).



**Figura 108 Corte y soldadura de la mesa base**

Para obtener mayor rigidez en la mesa base se optó por ubicar soportes en la parte lateral de la mesa, tal como muestra el diseño CAD de la tabla anterior (Tabla 29).



**Figura 109 Mesa base pulida**

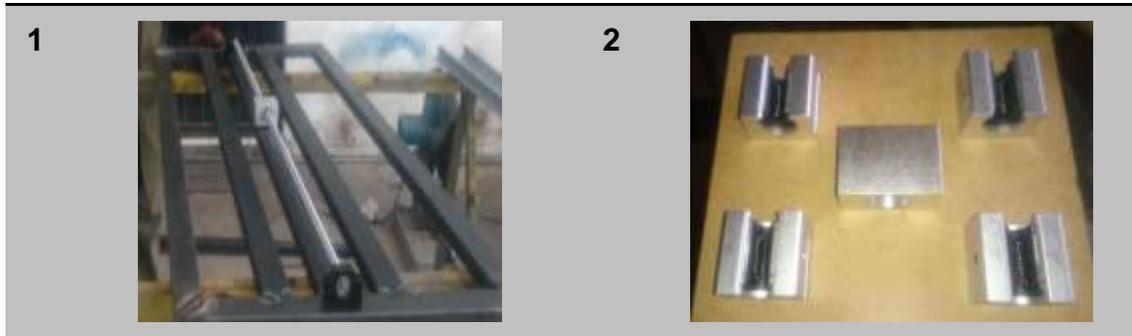
#### **4.1.2 Implementación y montaje de los sistemas de movimiento X e Y**

Ya adquirido todos los elementos del sistema móvil como los husillos y ejes guías para los ejes X e Y, procedemos a ensamblarlos en la mesa base. La Tabla 30 muestra el proceso que se desarrolló para ensamblar las mesas superior e inferior con sus respectivos ejes guías y husillos sobre la mesa base.

**Tabla 30****Proceso de implementación de la mesa superior e inferior**

Se determina la ubicación y distancia de ensamble para cada eje guía.

Se ubica en la mesa inferior (eje X) todos los componentes que este abarca como la tuerca de potencia y los bloques de rodamiento lineal.



Establecidas sus distancias se perfora la mesa inferior para sujetar sus elementos mediante pernos.



En base a los bloques lineales y la tuerca de potencia de la mesa inferior, ésta se la hacer recorrer por sus ejes guía a medida que se va perforando la mesa base y sujetando los ejes guías mediante pernos y tuercas.



Continúa 

Con la mesa inferior completamente ensamblada se ubica sobre ella los ejes guías y el husillo de potencia encargado de dar movilidad a la mesa superior (eje Y), de la misma manera con ayuda de prensas se perfora y sujeta con tornillos y tuercas para posteriormente ubicar la mesa superior.



En la Figura 110 se puede observar el ensamble completo del sistema de movimiento de la mesa superior e inferior sobre la mesa base con todos sus componentes que lo conforman.



**Figura 110 Ensamble completo de la mesa superior e inferior**

Para las pruebas de los motores y actuadores se requiere de un área donde se puedan ubicar todos las fuentes, drivers, y tarjetas, por lo que se ubica una caja de control en la parte inferior derecha de la mesa base como se muestra en la Figura 111.



**Figura 111** Ensamble de la caja de control en la mesa base

#### 4.1.3 Construcción e implementación de la estructura del sistema visión

La estructura dispondrá de un marco de madera que servirá como base para el montaje de cada lámpara led, la iluminación debe ser uniforme en toda el área de trabajo de la cámara por lo que se emplea la iluminación difusa frontal para reducir las sombras y reflejos del objeto, mientras que la posición de la cámara sigue siendo frontal al mismo. La Tabla 31 muestra el proceso de elaboración de la estructura para el proceso de visión.

**Tabla 31**

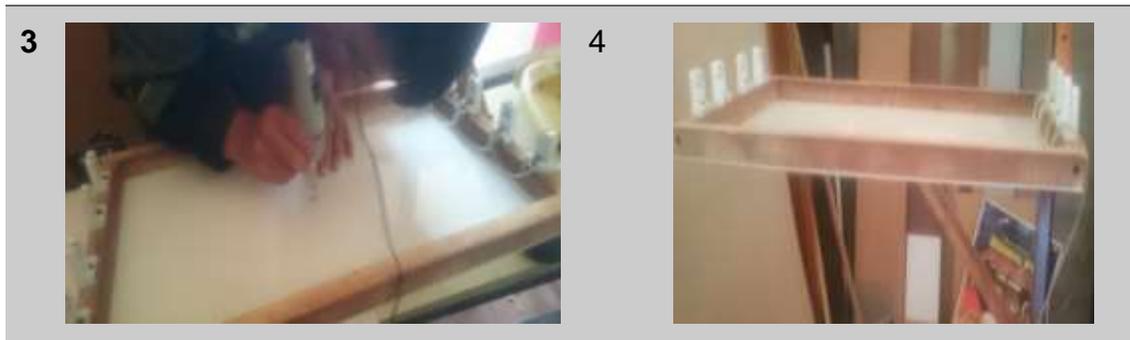
#### Desarrollo de la estructura para el proceso de visión artificial

<p>Ensamble del marco de madera para emplear la tecnica de iluminación difusa.</p>	<p>Ubicación de las lámparas led.</p>
<p>1</p> 	<p>2</p> 
<p>Perforación del agujero para la</p>	<p>Ensamble con el brazo lateral de</p>

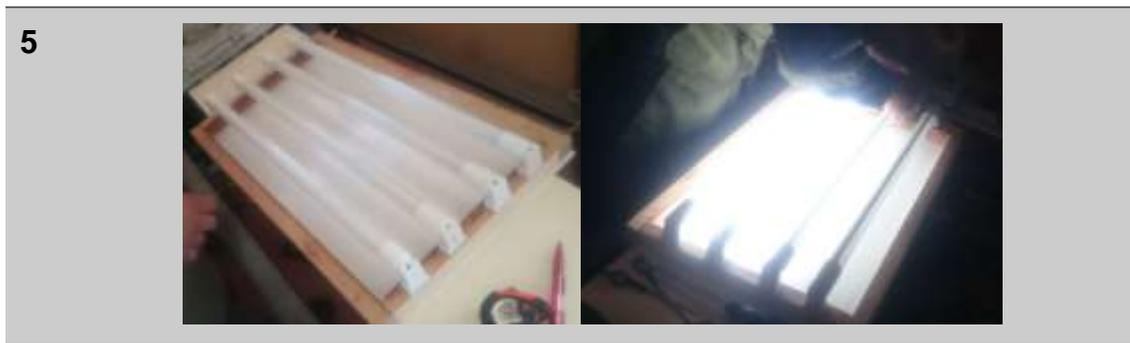
Continúa 

ubicación de la cámara web.

soporte mediante pernos y tuercas.



Prueba de luz led.



Finalmente ensamblamos la estructura conjuntamente a la mesa base en la posición inicial de la misma (ver Figura 112) ya que es el primer proceso a desarrollarse como se mostró en el apartado 3.5.1 Diseño CAD de la máquina. Se pinta toda la estructura para una mejor presentación.



**Figura 112 Ensamble de la estructura de visión en la mesa base**

#### 4.1.4 Construcción e implementación de los brazos de soporte

Para la construcción de los brazos de soporte se emplearon perfiles estructurales huecos cuadrados, posteriormente se cortaron de acuerdo a las dimensiones establecidas, se soldaron y pulieron.

##### a. Proceso de perforación

La Tabla 32 muestra el proceso de construcción e implementación de todos los elementos que este brazo conlleva para posteriormente ensamblarlo con la mesa base como el segundo proceso de la máquina.

**Tabla 32**

#### Elaboración del brazo para el proceso de perforación

Corte a 45 ° y soldadura de los perfiles estructurales.



Se implementa el eje Z (Proceso de perforación) con todos sus componentes (ejes, guías, husillo y motor) y las sujeciones del taladro.



Continúa 



Se ensambla el eje Z en el brazo de soporte mediante pernos y tuercas.

3



Una vez ensamblado todo lo brazo de soporte, se lo acopla a la mesa base sujetándolo con pernos y tuercas de presión.

4



Se pinta todo el brazo de soporte y sus componentes para darle una mejor presentación.

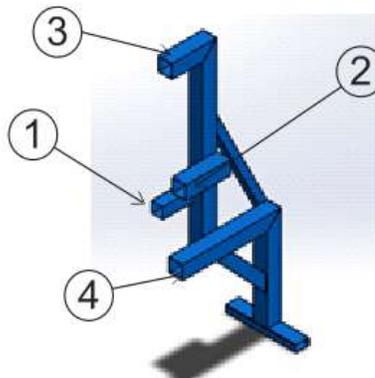
5



## b. Proceso de inserción

**El proceso de construcción y ensamble de todos los componentes pertinentes al brazo de soporte se muestra en la**

Tabla 33. Es importante recalcar que el brazo dispondrá de 2 brazos salientes encargados de sostener a dos actuadores neumáticos ubicados en la parte superior del brazo general, la Figura 113 muestra el diseño final del brazo de soporte y la ubicación de cada actuador neumático así como también la ubicación de la matriz de inserción.



**Figura 113 Diseño final del brazo de soporte (Proceso de inserción)**

*Elementos: (1) Actuador del cortador, (2) Actuador de la boca, (3) Actuador de la lengüeta, (4) Matriz de inserción.*

**Tabla 33**

### **Elaboración del brazo para el proceso de inserción**

Corte, ensamble, soldadura y pulida del brazo de soporte.



Se elabora las piezas de sujeción para cada actuador neumático, se las pule

y se las pinta.



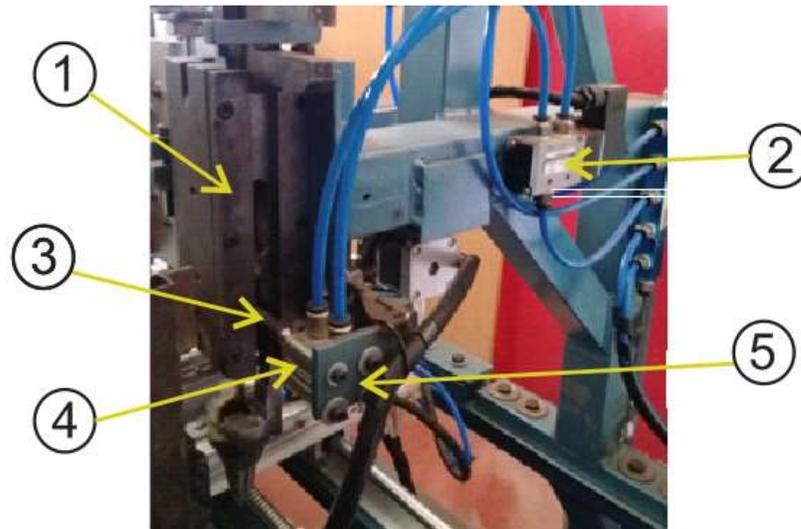
Se ensamblan los brazos salientes de sujeción al brazo de soporte general para pulirlo y pintarlo completamente.



Con el brazo de soporte ya ensamblado se lo acopla a la mesa base como el tercer proceso de la máquina y a su vez se ubican todos los componentes neumáticos como son las electroválvulas, los cilindros y las mangueras de aire. También se ubica la matriz de inserción y sus partes acopladas a cada actuador neumático. Las figuras siguientes muestran el brazo ensamblado completamente con todos sus componentes, así como también la prueba funcional de cada actuador neumático.

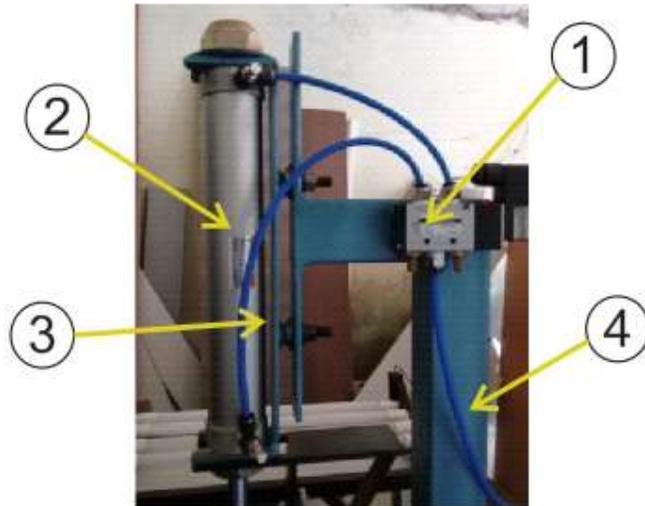


**Figura 114 Prueba de funcionamiento de cada actuador neumático**



**Figura 115 Actuador del marco de la matriz de inserción**

*Elementos: (1) Matriz de inserción, (2) Electroválvula, (3) Marco, (4) Cilindro neumático, (5) Soporte del actuador.*



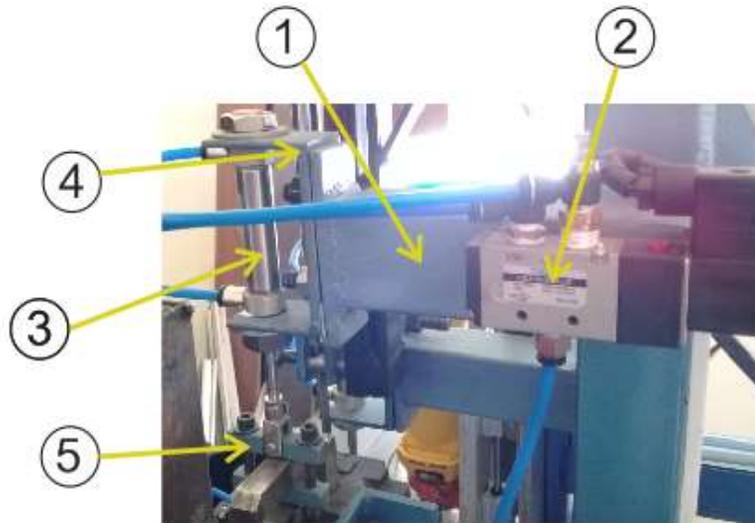
**Figura 116 Actuador de la lengüeta de la matriz de inserción**

*Elementos: (1) Electroválvula, (2) Cilindro neumático, (3) Soporte del actuador, (4) Manguera neumática.*



**Figura 117 Actuador del cortador de la matriz de inserción**

*Elementos: (1) Brazo de soporte saliente, (2) Electroválvula, (3) Cilindro neumático, (4) Soporte del actuador, (5) Placas de ajuste del cortador.*



**Figura 118 Actuador de la boca de la matriz de inserción**

*Elementos: (1) Brazo de soporte saliente, (2) Electroválvula, (3) Cilindro neumático, (4) Soporte del actuador, (5) Placas de ajuste de la Boca.*



**Figura 119 Implementación completa del brazo de soporte en la mesa base**

#### **4.1.5 Construcción e implementación de alimentadores**

##### **a. Alimentador de cerdas flexibles**

En la Tabla 34 se detalla el proceso de construcción del alimentador lineal acorde al diseño de la Figura 78.

**Tabla 34****Elaboración del alimentador de cerdas flexibles**

Se fabrica el brazo de soporte que sirve como base para el cilindro y la base de la guía lineal.

1



Se ensambla la estructura que sirve como dosificador de cerdas flexibles y se la ubica en la parte superior de la contraguía.

2



Se ubica el contra peso en la parte superior de la estructura del dosificador.

3



Se implementa toda la estructura en la mesa base al lado contrario de la matriz de inserción.

Continúa 

4



Se corrige los errores de estructura y se pinta completamente.

5

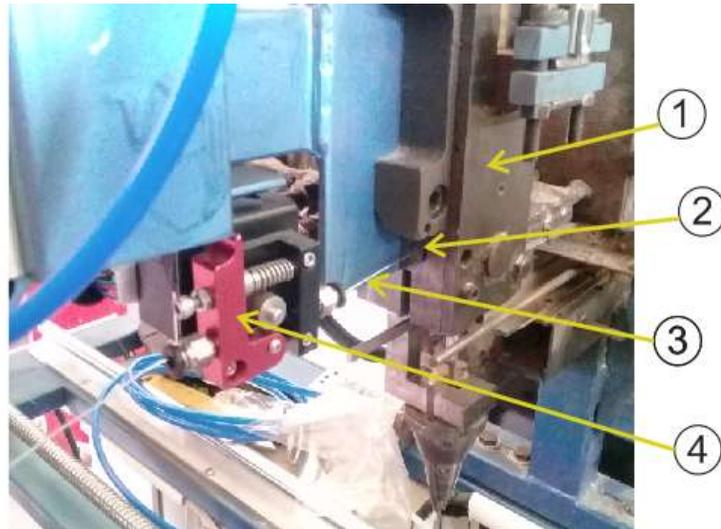


#### b. Alimentador de alambre

Como se mencionó con anterioridad el proceso de inserción requiere de un alimentador de tipo carrete para el alambre que será introducido de manera constante en la matriz de inserción. La Figura 120 muestra el ensamble del carrete a la mesa base y en la Figura 121 se observa la implementación conjunta con el motor a pasos encargado de trasladar el alambre hacia la matriz de inserción.



**Figura 120 Izq. Construcción del carrete. Der. Implementación a la mesa**

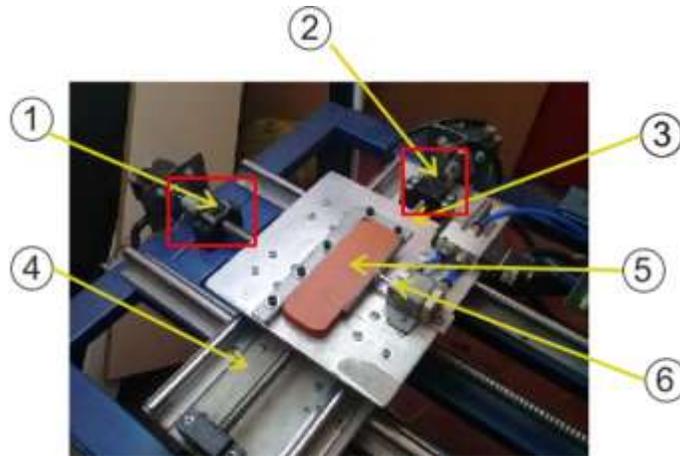


**Figura 121 Ensamble del alimentador de alambre**

*Elementos: (1) Matriz de inserción, (2) Apertura para el alambre, (3) Alambre, (4) Motor a pasos.*

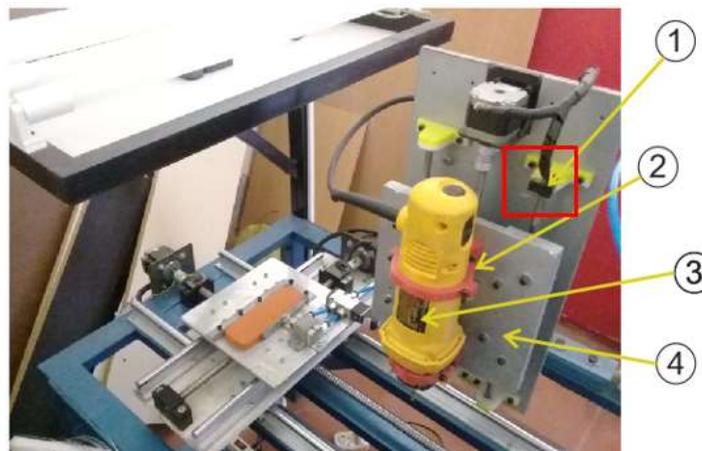
## 4.2 Implementación del sistema de control

En primera instancia se deben ubicar los finales de carrera, ya que permiten a la máquina posicionarse en el espacio desde una posición HOME que se validará en la programación de la máquina, como se mencionó con anterioridad se emplearan 3 finales de carrera para los ejes X (mesa inferior), Y (mesa superior), Z (proceso de perforación).



**Figura 122 Ubicación de los finales de carrera en la mesa superior e inferior**

*Elementos: (1) Final de carrera eje X, (2) Final de carrera eje Y, (3) Mesa superior, (4) Mesa inferior, (5) Matriz base, (6) Actuador del sujetador de matriz.*



**Figura 123 Ubicación del final de carrera para el proceso de perforación**

*Elementos: (1) Final de carrera eje Z, (2) Sujeciones del taladro, (3) Taladro, (4) Meza del eje Z.*

A continuación se realizan las conexiones de cada motor a pasos con su respectivo driver. Además para el HMI se ensambla una caja que contenga a la pantalla de la tarjeta Raspberry y se la ensambla en la parte final de la mesa base posterior a todos los procesos de la máquina (ver Figura 126).



**Figura 124 Conexión de motores, drivers, fuente de poder (X e Y)**

*Elementos: (1) Fuente de poder 24 V, (2) Driver para el eje X, (3) Driver para el eje Y.*



**Figura 125 Conexión de motores, drivers, fuente de poder (Z y Alambre)**

*Elementos: (1) Fuente de poder 12 V, (2) Driver para el eje Z, (3) Driver para el motor del alambre.*



**Figura 126 HMI de la máquina**

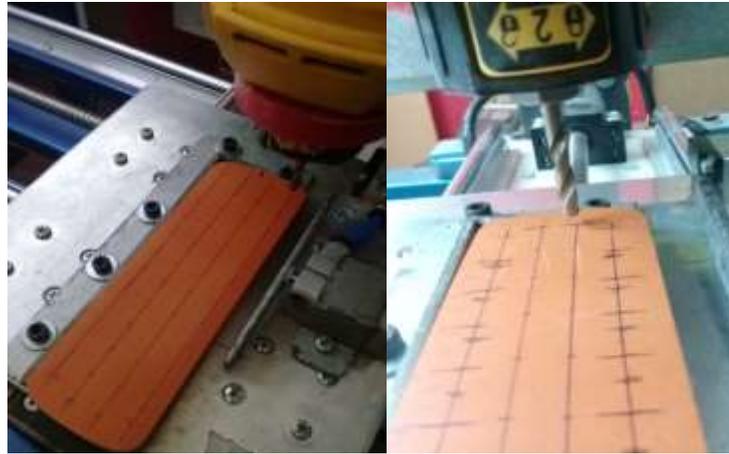
Se realiza la conexión entre la pantalla y la tarjeta Raspberry Pi 3 (ver Figura 127), así como también la conexiones con la tarjeta Arduino Mega.



**Figura 127 Conexiones de la pantalla con la tarjeta Raspberry Pi 3**

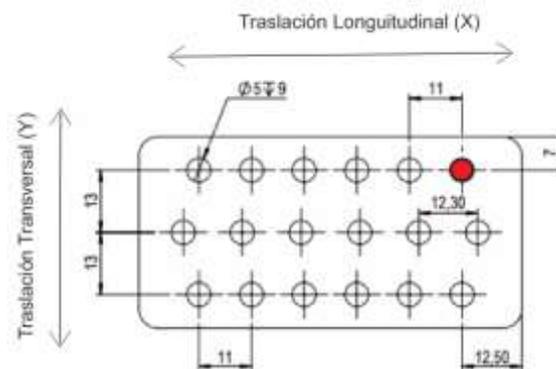
*Elementos: (1) Minikey (Teclado), (2) Pantalla de Raspberry 10", (3) Tarjeta Raspberry Pi 3.*

Ubicados cada final de carrera y las conexiones de cada motor con su respectivo driver, se procede a probar el funcionamiento del sistema de movimientos, es decir la funcionalidad de cada motor a pasos para posteriormente realizar la ejecución matricial de posiciones de cada matriz base, como se puede observar en la Figura 128.

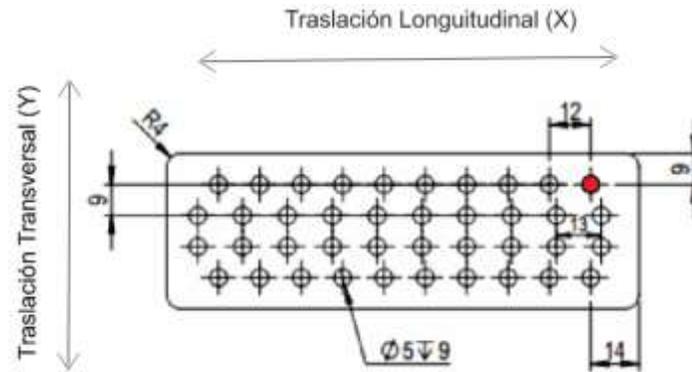


**Figura 128 Posición matricial de cada base de madera**

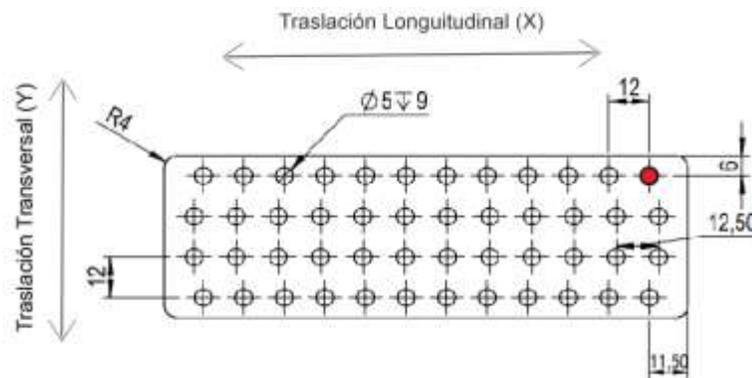
Al determinar el tamaño de cada matriz en el proceso de visión, la matriz base se traslada al proceso de perforación y se ubica en el primer agujero que representa la primera coordenada de todo el proceso dependiendo del modelo de cada cepillo, sea este pequeño, mediano o grande. La ubicación del primer agujero es muy importante ya que a partir de este, se programa las distancias entre cada perforación y la posición de sus filas y columnas. Las figuras siguientes muestran los diseños de cada cepillo preestablecido por el fabricante y el primer agujero se encuentra ilustrado con color rojo.



**Figura 129 Diseño de la matriz base pequeña (Cepillo pequeño)**



**Figura 130 Diseño de la matriz base mediana (Cepillo mediano)**



**Figura 131 Diseño de la matriz base grande (Cepillo grande)**

#### 4.2.1 Implementación del tablero de control

El tablero de control se encarga de contener las fuentes de poder, la tarjeta de control, los indicadores como son las luces pilotos, y todas las conexiones de control y potencia para los motores y actuadores lineales. La Figura 132 siguiente muestra la disposición de los elementos y sus conexiones.



**Figura 132 Tablero de control vista externa**

*Elementos: (1) Indicadores de clasificación de los cepillos, (2) Botoneras de ON/OFF, PARO DE EMERGENCIA Y RESET, (3) Indicador de encendido de la máquina.*

### 4.3 Montaje final de la máquina

Establecidas todas las conexiones de los motores y actuadores, así como también la conexión serial entre la tarjeta Raspberry Pi 3 y Arduino, se procede a etiquetar todas las conexiones, dados los diagramas antes establecidos.

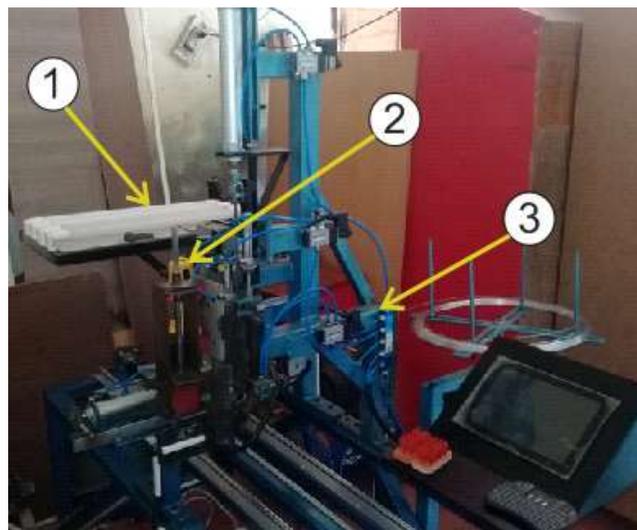


**Figura 133 Etiquetado de las conexiones**

Las figuras siguientes muestran el ensamble y la implementación general de la máquina, señalando los tres procesos a desarrollarse.



**Figura 134 Ensamble de la máquina final**



**Figura 135 Procesos de la máquina**

*Elementos: (1) Proceso de visión artificial, (2) Proceso de perforación, (3) Proceso de inserción.*

## **4.4 Pruebas de funcionamiento**

### **4.4.1 Pruebas del sistema de visión artificial**

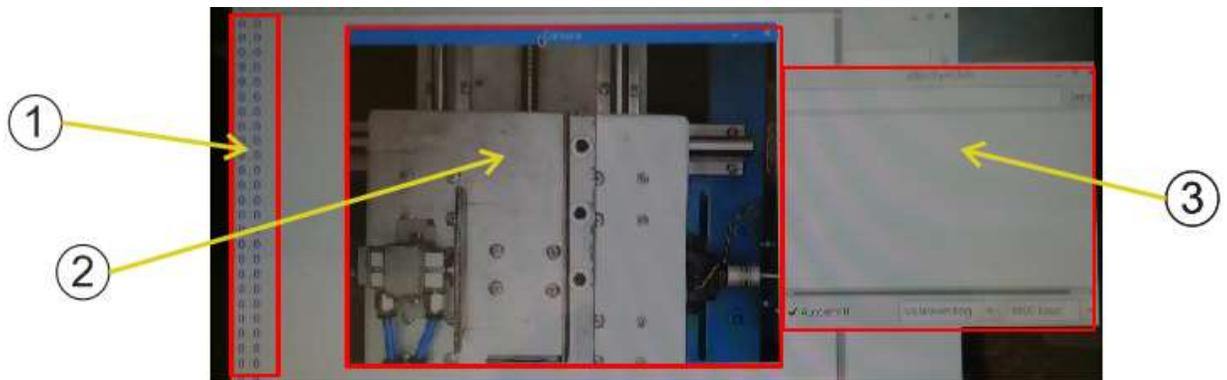
El sistema de visión artificial es el primer proceso a ejecutarse, dentro del funcionamiento inicial de la máquina donde las mesas de trabajo de la misma se trasladarán a la posición HOME que se encuentra determinada por el área

de la cámara Web, el sistema de visión artificial al no identificar una matriz base (base de madera) no iniciará la autoconfiguración para los procesos de perforación e inserción y se encontrará a espera de dicha matriz (ver Figura 136).



**Figura 136 Funcionamiento del sistema de visión artificial**

La máquina dispone de un HMI que se encuentra vinculado con el sistema de visión artificial para que el operario pueda apreciar el área de trabajo y validar la clasificación de la máquina.

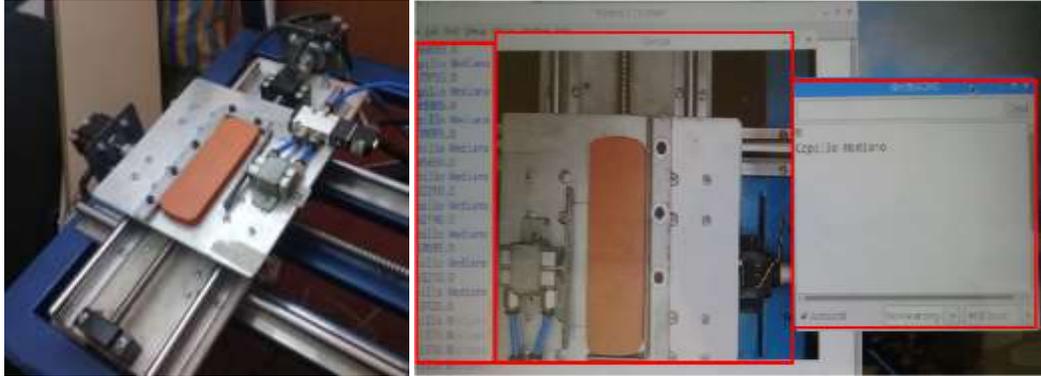


**Figura 137 HMI de la máquina al no encontrar la matriz base**

*Elementos: (1) Valores del área de la máscara, (2) Pantalla visor de la Webcam, (3) Monitor serial de Arduino.*

Una vez que el operario coloque una matriz base a la máquina, el sistema de visión detecta el área de la matriz en tiempo real y la clasifica según etiquetas en pequeño (P), mediano (M) y grande (G). El reconocimiento de la matriz se puede apreciar en el HMI de la máquina (ver Figura 138). De esta manera se

valida la funcionalidad del proceso de visión para posteriormente auto configurar a toda la máquina para los procesos subsiguientes.



**Figura 138 Izq. Disposición de la matriz base. Der. Visualización en el HMI**

#### 4.4.2 Pruebas del sistema de perforación

Realizada la clasificación por el proceso de visión, además de poder visualizar en el HMI la matriz base, en el tablero de control se activa la luz piloto perteneciente a la clasificación dada y consecuentemente las mesas de trabajo se trasladan al área de perforación. En este proceso de acuerdo al diseño de la matriz previamente programada se ejecuta el taladrado respectivo.



**Figura 139 Luces indicadoras del tablero de control**



**Figura 140** Proceso de perforación de la matriz base

#### 4.4.3 Pruebas del sistema de inserción

De la misma manera una vez completado el proceso de perforación de la matriz, esta se traslada a la coordenada de su primer taladrado en el área de inserción, donde para que el proceso de inserción se lleve a cabalidad todo el sistema de inserción requiere del funcionamiento constante y sincronizado de dos alimentadores como son el alimentador de cerdas y de alambre.



**Figura 141** Alimentadores del proceso de inserción

*Elementos: (1) Alimentador de cerdas flexibles, (2) Alimentador de alambre.*

### a. Prueba del alimentador de cerdas

La funcionalidad de este alimentador es abastecer de una cantidad constante de cerdas flexibles al insertador, por medio de un destaje que la guía lineal posee, dicha guía se encuentra ensamblada al vástago del actuador lineal.

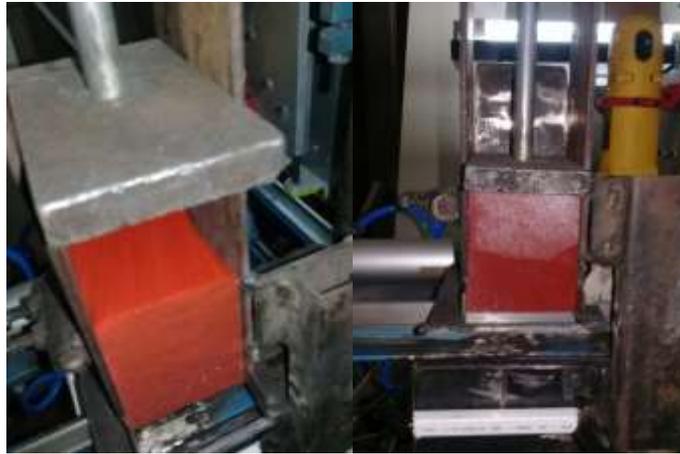


**Figura 142 Transporte de las cerdas flexibles hacia el insertador**

Como se observa en la figura anterior la guía lineal cumple con su funcionalidad, siempre y cuando el dosificador de su estructura disponga de suficiente material (cerdas flexibles) y esté ubicado el contra peso (ver Figura 143)



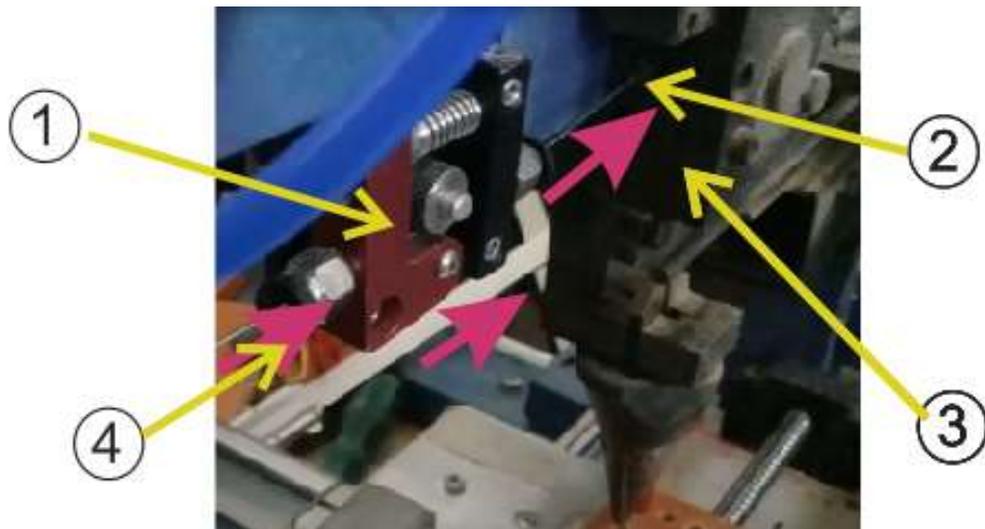
Continúa 



**Figura 143 Ubicación de las cerdas flexibles**

#### **b. Prueba del alimentador de alambre**

Este alimentador como parte principal dispone de un carrete de alambre ubicado en la parte posterior de la máquina, como se observó en la Figura 120, donde un extremo del alambre, ingresa en un armazón adaptado al motor Nema 17 que se encarga de aprisionar al alambre e impulsarlo hacia la matriz de inserción, como se puede apreciar en la Figura 144.

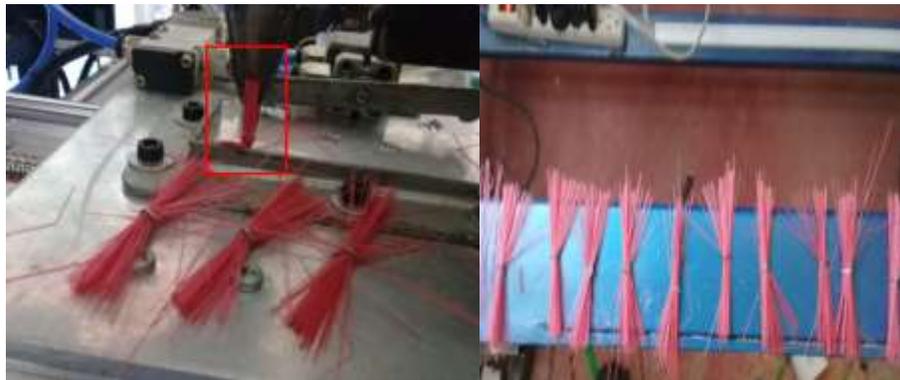


**Figura 144 Armazón que impulsa al alambre hacia la matriz de inserción**

*Elementos: (1) Armazón adaptado al motor Nema 17, (2) Alambre, (3) Matriz de inserción, (4) Dirección del alambre.*

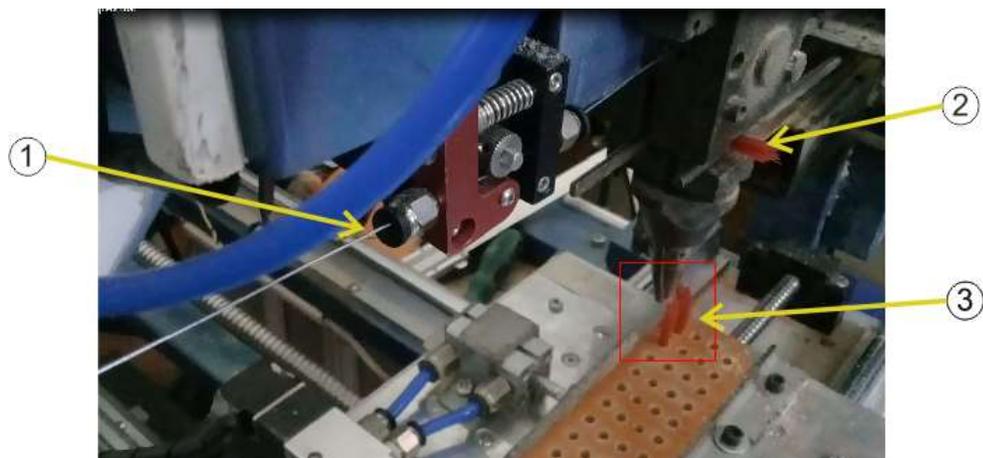
### c. Proceso de inserción completo

Una vez que el alambre y el conjunto cerdas flexibles se encuentran en la posición establecida, en el interior de la matriz se genera un proceso previo a la inserción y es el de corte y embutido del alambre para producir la grapa que se encargará de aprisionar a las cerdas flexibles a través de la boca del insertador. Se realizó pruebas en vacío para comprobar el proceso de la formación de cada mechón de cerdas flexibles, en la Figura 145 se puede corroborar el funcionamiento del insertador al vacío.



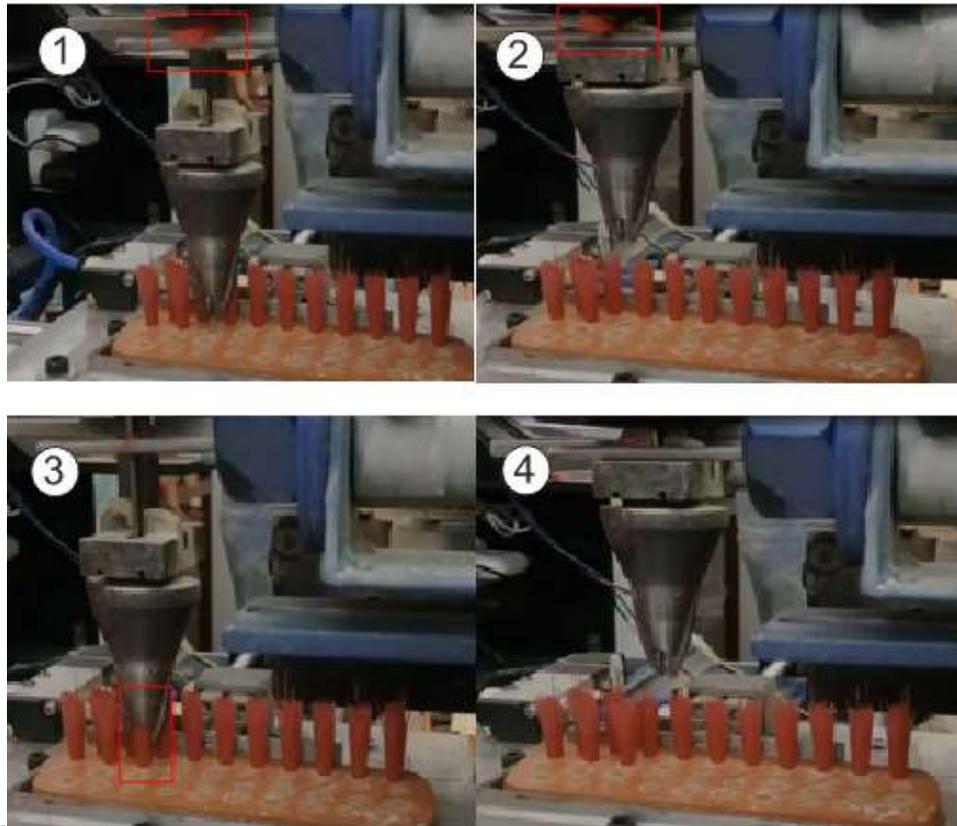
**Figura 145 Mechas de cerdas aprisionadas por la grapa**

Corroborado el funcionamiento del insertador con sus respectivos alimentadores se procede a probar la máquina con la matriz base antes perforada, el resultado se muestra en las figuras siguientes.



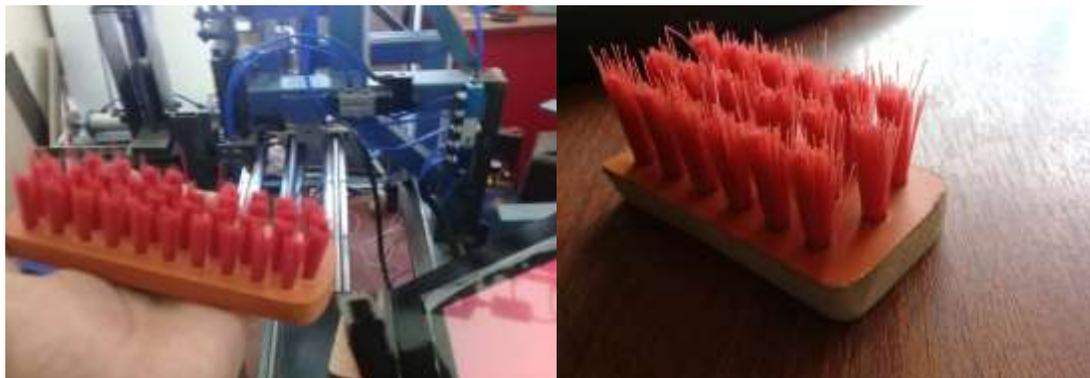
**Figura 146 Proceso inicial de inserción**

*Elementos: (1) Alambre, (2) Cerda flexible, (3) Inserción en la matriz base.*



**Figura 147 Proceso de inserción**

*Elementos: (1) Cerdas flexibles y matriz base posicionada en el siguiente agujero a insertar, (2) elevación de la boca del insertador para servir como guía para las cerdas y la grapa previamente formada, (3) Acción de la lengüeta a través de todo el cuerpo del insertador y la boca hasta llegar a la matriz base, (4) Inserción completa y ubicación de la matriz al siguiente agujero.*



Continúa →



**Figura 148 Cepillos completados**

#### 4.5 Manual de operación

El manual de operación de la máquina desarrollada e implementada se encuentra en el ANEXO O.

#### 4.6 Análisis económico del proyecto

La construcción e implementación de la máquina se ha completado satisfactoriamente, por lo que es necesario cuantificar el costo total de la misma y comprobar la inversión realizada con el costo de adquisición de otras maquinarias semejantes. En la Tabla 35 se detalla el listado de materiales eléctricos, electrónicos y mecánicos empleados en la construcción total del proyecto.

**Tabla 35**

##### Costos totales del proyecto

CANT.	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Tornillo de potencia de bolas - SFU1605 1300 mm	140,00	140,00

Continúa 

4	Bloques de guías lineales - SBR16UU	8,00	32,00
1	Soportes extremos del husillo de bolas - Juego BK12	39,00	39,00
3	Un metro de Riel guía para SBR16UU	35,00	105,00
2	Acoplador neumático para motores 10 mm	10,00	20,00
2	Motores Nema 23	60,00	120,00
3	Drivers TB6600	48,00	144,00
1	Fuente de poder 24 V	50,00	50,00
1	Tornillo de potencia de bolas - SFU1204 40 mm	85,00	85,00
4	Bloques de guías lineales - SBR12UU	7,50	30,00
1	Soportes extremos del husillo de bolas - Juego BK10	34,00	34,00
2	Un metro de Riel guía para SBR12UU	15,50	31,00
1	Tornillo de bolas – T8 20 mm – 4 hilos	33,00	33,00
4	Bloques de guías lineales – SBR08UU	6,00	24,00
2	Ejes guías redondos	1,50	3,00
2	Acoplador flexible	5,00	10,00
-	Impresiones de soporte para los ejes guías	-	29,00
1	Rotor dewalt dw660	100,00	100,00
2	Motores Nema 17	27,00	54,00
1	Drivers Pololu A4988	5,00	5,00
1	Fuente de poder 12 V	18,00	18,00
1	Armazón del motor Nema 17	29,00	29,00
1	Raspberry pi3	88,00	88,00

Continúa 

1	Minikey	23,00	23,00
1	Adaptador HDMI-VGA	19,00	19,00
1	Webcam cámara Genius	21,00	21,00
-	Tubos led y soportes de conexión	-	10,90
1	Pantalla Touch 10.1''	160,00	160,00
1	Cargador para la pantalla	14,00	14,00
1	Arduino Mega	27,00	27,00
-	Módulos relés	30,00	30,00
-	Cilindro neumáticos, electroválvulas y componentes	-	695,00
-	Planchas de aluminio y duralón	-	36,00
-	Construcción de la mesa base	-	60,00
-	Construcción e implementación de brazos de soporte y alimentadores a la mesa base	-	550
-	Gabinete de control (gabinete, luces piloto, botoneras, rieles, fusibles)	-	80,00
-	Matriz de inserción de segunda mano	2500,00	2500,00
-	Varios (Cables, tornillería, material eléctrico, etc.)	-	200
<b>TOTAL</b>			<b>5648.90</b>

El costo total de la construcción e implementación de la máquina es de \$ 5648.90 y de acuerdo a la Tabla 36 el costo de máquinas similares oscila entre \$ 80000,0 a \$ 190000,00 para máquinas completamente automáticas dependiendo de su velocidad de trabajo, un costo de \$ 38000,00– \$ 48000,00 para máquinas semiautomáticas y un costo variable de \$5000,00 a \$10000,00

para máquinas electromecánicas que requieren de la participación continua del operador.

**Tabla 36**

**Análisis económico de máquinas perforadoras insertadoras**

Marca o Modelo	Ilustración	Descripción	Costo (\$)
SN5 (spanish.alibaba, 2018)		Máquina completamente automática para fabricar escobas y cepillos	80000,00- 190000,00
WD-4-TEM3-B (spanish.alibaba, 2018)		Máquina semiautomática para fabricar cepillos	38000,00- 48000,00
Tufaidera convencional		Máquina manual para hacer cepillos	8000,00
Máquina perforadora insertador Borgui SP2		Máquina manual para hacer cepillos (Segunda mano)	5000,00

La máquina desarrollada al ser semiautomática ya que no requiere de la intervención continua de un operador su costo es muy competitivo, ya que al promediar un costo de las máquinas desarrolladas fuera del país de \$ 43000,00 para máquinas semejantes se logra reducir en un 85% el costo total.

## **4.7 Validación de hipótesis**

### **4.7.1 Hipótesis**

¿El sistema mecatrónico de perforación e inserción de filamentos flexibles es capaz de mejorar la producción de la Microempresa CEPIBRILLO-ECUADOR en la fabricación de los tres tipos diferentes de cepillos de limpieza?

### **4.7.2 Variables de la investigación**

- **Variable independiente**

Sistema Mecatrónico de perforación e inserción de cerdas flexibles.

- **Variable dependiente**

Mejora en la producción de cepillos de limpieza.

### **4.7.3 Comprobación de Hipótesis**

Antes de validar la hipótesis, es necesario tomar datos de la productividad de la micro empresa actual, es decir determinar cuántos cepillos son capaces de producir al día.

La Tabla 37 detalla la cantidad de cepillos que se producen por días de trabajo, es así que producen un total de 220 cepillos aproximadamente por semana, tomando en cuenta que se fabrica un solo tipo de cepillo por día.

**Tabla 37****Producción de cepillos de la microempresa**

Designación	Producción diaria (8 horas)	Lunes y Martes	Miércoles y Jueves	Viernes
Cepillos pequeños	60	120	-	-
Cepillos medianos	35	-	70	-
Cepillos grandes	30	-	-	30
<b>Total de cepillos por semana</b>			<b>220</b>	

Con la máquina implementada y las pruebas pertinentes, se obtienen los siguientes resultados.

**Tabla 38****Tiempos de máquina**

HOME-Proceso de Visión	Tiempo de transición (TM1)	Proceso de Perforación	Tiempo de transición (TM2)	Proceso de Inserción	Tiempo de salida (TM3)	TOTAL
<b>CEPILLO PEQUEÑO</b>						
<b>14.67 seg</b> ≈ <b>15 seg</b>	13.7 seg ≈ 14 seg	≈ 35 seg	10.2 seg ≈ 10 seg	≈ 192 seg	≈ 5 seg	271 seg = 4 min 31 s
<b>CEPILLO MEDIANO</b>						
≈ <b>15 seg</b>	11.88 seg ≈ 12 seg	≈ 85 seg	7.88 seg ≈ 8 seg	≈ 434 seg	≈ 5 seg	559 seg = 6 min 39 s
<b>CEPILLO GRANDE</b>						
≈ <b>15 seg</b>	10.62 seg ≈ 11 seg	≈ 102 seg	6.96 seg ≈ 7 seg	≈ 519 seg	≈ 5 seg	659 seg = 10 min 59 s

Como se puede observar en la Tabla 38, para fabricar un cepillo pequeño, mediano y grande se emplea un tiempo de aproximadamente 5 min, 7 min y 11 min respectivamente, es decir al trabajar la máquina 8 horas diarias los 5 días de la semana se producen un total de 340 cepillos, considerando que solo se fabrica un tipo de cepillo por día.

**Tabla 39**  
**Producción de cepillos de la máquina**

Designación	Tiempo de producción individual	Producción diaria (8 horas)	Lunes y Martes	Miércoles y Jueves	Viernes
Cepillos pequeños	5 <i>min</i>	90	180	-	-
Cepillos medianos	7 <i>min</i>	60	-	120	-
Cepillos grandes	11 <i>min</i>	40	-	-	40
<b>Total de cepillos por semana</b>				<b>340</b>	

Como se puede observar en las tablas anteriores, la máquina implementada aproximadamente mejora en un 50 % la producción de los cepillos pequeños, en un 70 % la producción de los cepillos medianos y en un 30 % la producción de los cepillos grandes. De esta manera en lo que se refiere a pruebas planteadas de la máquina se observa que se mejora la productividad de la microempresa y se demuestra la hipótesis planteada.

#### 4.7.4 Comprobación de Hipótesis empleando Chi-Cuadrado

Sin embargo es necesario validar esta hipótesis mediante un método estadístico, por lo que se emplea la prueba estadística del Chi-cuadrado ( $\chi^2$ ), el cual según (ufg.edu, 2017), es un método muy útil para comprobar si existe relación entre las variables dependientes e independientes de una hipótesis, relacionando la diferencia entre el conjunto de frecuencias observadas ( $f_o$ ) en una muestra y el conjunto de frecuencias teóricas y esperadas ( $f_e$ ) de la misma.

El primer paso es elaborar la tabla con los datos de frecuencias observadas, esta se desarrolla mediante los datos obtenidos por la Tabla 38.

**Tabla 40**  
**Valores de frecuencias observadas (*f<sub>o</sub>*)**

PRODUCCIÓN	TIEMPOS DE MÁQUINA (seg.)			TIEMPOS MUERTOS (seg.)			TOTAL
	VISIÓN	PERFORACIÓN	INSERCIÓN	(TM1)	(TM2)	(TM3)	
<b>Cepillo Pequeño</b>	15	35	192	14	10	5	271
<b>Cepillo Mediano</b>	15	85	434	12	8	5	559
<b>Cepillo Grande</b>	15	102	519	11	7	5	659
<b>TOTAL</b>	45	222	1145	37	25	15	<b>1489</b>

Para esta prueba de hipótesis se trabajará con un nivel de confianza del 99 %, es decir el nivel de significancia ( $\alpha$ ) a emplearse es de 0.01. El número de grados de libertad ( $n$ ), se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$n = (\#f - 1) * (\#c - 1) \quad [ 19 ]$$

Donde:

*#f*: número de filas

*#c*: número de columnas

$$n = (3 - 1) * (6 - 1)$$

$$n = 10$$

De acuerdo a la tabla del Chi-cuadrado crítico (ver Figura 149), da un valor de  $\chi^2_{crítico} = 23.21$

DISTRIBUCION DE  $\chi^2$ 

Grados de libertad	Probabilidad										
	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,01	0,001
1	0,004	0,02	0,06	0,15	0,46	1,07	1,64	2,71	3,84	6,64	10,83
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60	5,99	9,21	13,82
3	0,35	0,58	1,01	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	11,34	16,27
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	13,28	18,47
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	15,09	20,52
6	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	16,81	22,46
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	18,48	24,32
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	20,09	26,12
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	21,67	27,88
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	23,21	29,59
	No significativo								Significativo		

Figura 149 Chi-cuadrado

Autor: (ufg.edu, 2017)

A continuación, se procede a formular la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis de trabajo ( $H_1$ ).

**$H_0$  (Nula): Parámetros Independientes** ( $x^2_{calculado} < x^2_{crítico}$ )

El sistema Mecatrónico de perforación e inserción de cerdas flexibles, no mejora la producción de los cepillos de limpieza, sean estos pequeños, medianos o grandes.

**$H_1$  (Alternativa): Parámetros no Independientes** ( $x^2_{calculado} > x^2_{crítico}$ )

El sistema Mecatrónico de perforación e inserción de cerdas flexibles, mejora la producción de los cepillos de limpieza, sean estos pequeños, medianos o grandes.

Para generar la tabla de contingencia (ver Tabla 41), es necesario aplicar la siguiente ecuación.

$$x^2 = \sum \frac{(fo - fe)^2}{fe} \quad [20]$$

Tabla 41

## Tabla de contingencia. Productividad

Alternativa	$(fo)$	$(fe)$	$fo - fe$	$(fo - fe)^2$	$\frac{(fo - fe)^2}{fe}$
Tiempo de máquina proceso de visión cepillo pequeño	15	8.19	6.81	46.3761	5.6625
Tiempo de máquina proceso de visión cepillo mediano	15	16.89	-1.89	3.5721	0.2114
Tiempo de máquina proceso de visión cepillo grande	15	19.91	-4.91	24.1081	1.2108
Tiempo de máquina proceso de perforación cepillo pequeño	35	40.40	-5.40	29.16	0.7217
Tiempo de máquina proceso de perforación cepillo mediano	85	83.34	1.66	2.7556	0.0330
Tiempo de máquina proceso de perforación cepillo grande	102	98.25	3.75	14.0625	0.1431
Tiempo de máquina proceso de inserción cepillo pequeño	192	208.39	-16.39	268.6321	1.2890

Continúa 

<b>Tiempo de máquina proceso de inserción cepillo mediano</b>	434	429.85	4.15	17.2225	0.0400
<b>Tiempo de máquina proceso de inserción cepillo grande</b>	519	506.75	12.25	150.0625	0.2961
<b>Tiempo muerto de transición al proceso de perforación del cepillo pequeño</b>	14	6.73	7.27	52.8529	7.8533
<b>Tiempo muerto de transición al proceso de perforación del cepillo mediano</b>	12	13.89	-1.89	3.5721	0.2571
<b>Tiempo muerto de transición al proceso de perforación del cepillo grande</b>	11	16.37	-5.37	28.8369	1.7615
<b>Tiempo muerto de transición al proceso de inserción del cepillo pequeño</b>	10	4.55	5.45	29.7025	6.5280
<b>Tiempo muerto de transición al proceso de inserción del cepillo mediano</b>	8	9.38	-1.38	1.9044	0.2030
<b>Tiempo muerto de transición al proceso de inserción del cepillo</b>	7	11.06	-4.06	16.4836	1.4903

<b>grande</b>					
<b>Tiempo muerto de transición a la salida del cepillo pequeño</b>	5	2.73	2.27	5.1529	1.8875
<b>Tiempo muerto de transición a la salida del cepillo mediano</b>	5	5.63	-0.63	0.3969	0.0705
<b>Tiempo muerto de transición a la salida del cepillo grande</b>	5	6.63	-1.63	2.6569	0.4007
<b>TOTAL</b>				$x^2_{calculado} = 30.06$	

$$\rightarrow x^2_{calculado} > x^2_{crítico}$$

$$30.06 > 23.21$$

Si compara el valor del Chi-cuadrado calculado con el valor crítico, este es mucho mayor, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Esto representa que la implementación del sistema mecatrónico de perforación e inserción de cerdas flexibles, mejora la producción de los cepillos sean estos pequeños, medianos y grandes, debido a que la variable de producción se relaciona directamente con los tiempos de producción de la máquina. De esta manera se valida la hipótesis planteada.

#### 4.7.5 Prueba de calidad

En cuestión de la calidad del producto terminado, tras haber realizado varias pruebas de 10 matrices por cada tipo de cepillo, se obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 42**  
**Calidad del producto final**

Designación	Cantidad de muestras	Cantidad de huecos a insertar por muestra	Cantidad de huecos a insertar	Fallos de inserción	Porcentaje de error (%)
Cepillos pequeños	10	18	180	2	1.1
Cepillos medianos	10	40	400	13	3.25
Cepillos grandes	10	48	480	29	6.04

En la Tabla 42 el porcentaje de error de las muestras analizadas es menor que el 10 %, haciendo que el proyecto tenga buena validez funcional. De la misma manera se emplea el método estadístico del Chi-cuadrado para dar validez a la calidad del producto y se siguen los mismo pasos anteriores, la tabla siguiente muestra los valores de frecuencia observados (ver Tabla 43) y su respectiva tabla de contingencia (ver Tabla 44).

**$H_0$  (Nula): Parámetros Independientes** ( $x^2_{calculado} < x^2_{crítico}$ )

El proceso de perforación e inserción de la máquina implementada no mejora la calidad de los cepillos de limpieza.

**$H_1$  (Alternativa): Parámetros no Independientes** ( $x^2_{calculado} > x^2_{crítico}$ )

El proceso de perforación e inserción de la máquina implementada mejora la calidad de los cepillos de limpieza.

**Tabla 43**  
**Valores de frecuencias observadas ( $f_o$ )**

TIPOS DE CEPILLOS	PERFORACIÓN E INSERCIÓN DE LA MÁQUINA		TOTAL
	Correcto	Incorrecto	
Cepillo Pequeño	178	2	180
Cepillo Mediano	387	13	400

Continúa 

<b>Cepillo Grande</b>	451	29	480
<b>TOTAL</b>	1016	44	1060

Tabla 44

Tabla de contingencia. Calidad

Alternativa	(fo)	(fe)	fo - fe	(fo - fe) <sup>2</sup>	$\frac{(fo - fe)^2}{fe}$
<b>Inserción correcta del cepillo pequeño</b>	178	172.53	5.47	29.92	0.17
<b>Inserción correcta del cepillo mediano</b>	387	383.39	3.61	13.03	0.033
<b>Inserción correcta del cepillo grande</b>	451	460.07	-9.07	82.26	0.178
<b>Inserción incorrecta del cepillo pequeño</b>	2	7.47	-5.47	29.92	4.005
<b>Inserción incorrecta del cepillo mediano</b>	13	16.60	-3.6	12.96	0.78
<b>Inserción incorrecta del cepillo grande</b>	29	19.92	9.08	82.44	4.138
<b>TOTAL</b>					$x^2_{calculado} = 9.310$

**Datos:**

$\alpha$ : 0.01

$n$ : 2

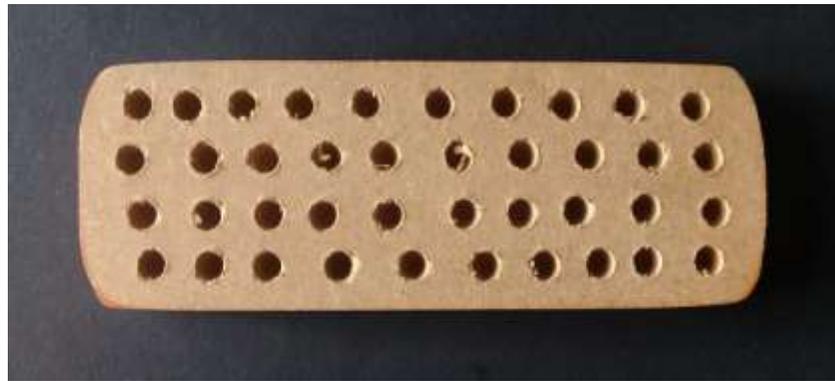
$x^2_{crítico}$  : 9.21 (ver Figura 149)

$$\rightarrow x^2_{calculado} > x^2_{crítico}$$

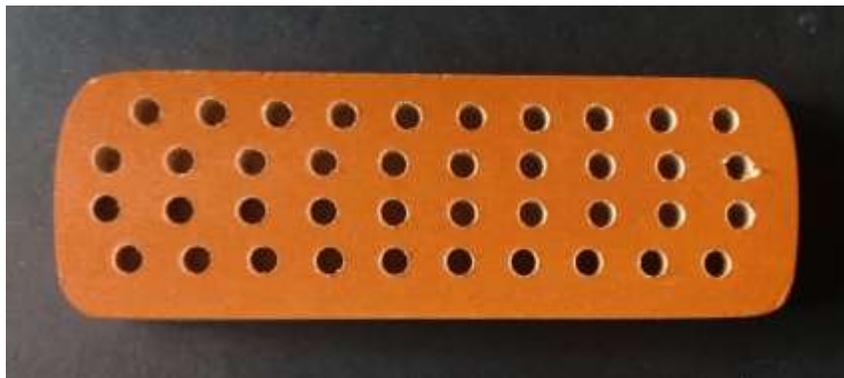
$$9.310 > 9.21$$

El valor del Chi-cuadrado calculado es mayor al valor crítico, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Es decir la calidad del producto final (cepillos de limpieza) mejora al emplear el sistema mecatrónico de perforación e inserción de filamentos flexibles.

Esto también se corrobora con la comparación visual de una matriz base perforada manualmente y otra al salir del proceso de perforación de la máquina. Como se puede observar en la Figura 150, existe una gran diferencia en la perforación por parte de la máquina y es importante recalcar que la disposición de cada agujero de la matriz base es clave para la presentación final del producto, ya que en cada agujero se insertarán las cerdas flexibles.



**Figura 150 Perforación manual**



**Figura 151 Perforación en la máquina**

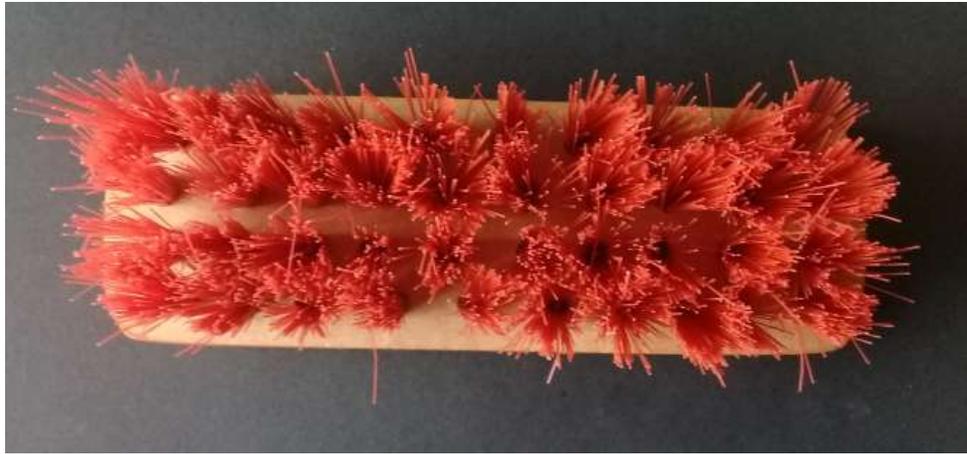
Las figuras siguientes muestran el producto final, completado manualmente y por la máquina, cabe recalcar que en la inserción por parte de la máquina es mucho más precisa ya que engancha las cerdas flexibles exactamente a una distancia media de las mismas y las inserta de manera uniforme y de un solo golpe, dándole un mejor acabado y presentación al cepillo de limpieza.



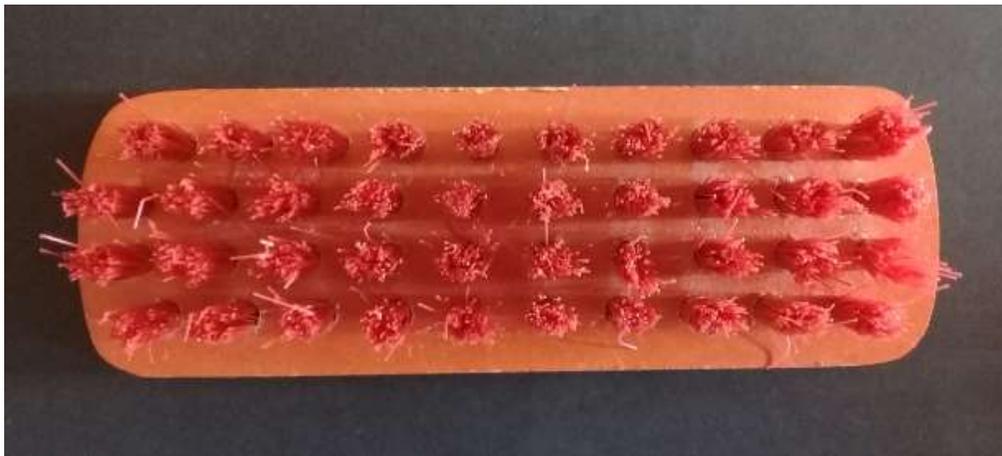
**Figura 152 Producto final a mano. Vista lateral**



**Figura 153 Producto final realizado en la máquina. Vista lateral**



**Figura 154 Producto final a mano. Vista Superior**



**Figura 155 Producto final realizado en la máquina. Vista Superior**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Se diseñó e implementó un sistema mecatrónico auto configurable, que dentro de su funcionalidad dispone de tres procesos: el primer proceso de visión artificial se encarga de la categorización de 3 tipos de matrices, siendo estas las bases de madera para los cepillos pequeños, medianos y grandes; el segundo proceso se encarga de la perforación completa de la matriz dependiendo del diseño del cepillo preclasificado, y el tercer proceso se encarga del corte y embutido del alambre para posteriormente realizar la inserción de los filamentos flexibles.
- La indagación de información acerca de este tipo de maquinaria, no se la encuentra con facilidad, ya que las empresas y microempresas que se dedican a la actividad de ensamblarlas, no proporcionan ni detallan información alguna para el desarrollo de estos tipos de máquina, por ser posibles competencias para las mismas.
- Las piezas y mecanismos para el sistema de inserción, específicamente para la matriz de inserción que es el núcleo de este proceso, son muy complicadas de replicar, ya que no existe la apertura por parte de empresas en el país que disponen de esta maquinaria y es posible solo adquirir la matriz de inserción de empresas extranjeras, que se dedican netamente a la construcción de este tipo de máquinas, además representa un costo demasiado elevado solo para este componente.
- Para el proyecto se partió de una matriz ya obsoleta de la empresa “La hogareñita”, a dicha matriz fue necesario realizarle un proceso de repotenciación, para que pueda obtener su funcionalidad inicial y pueda servir al desarrollo del proyecto.

- La implementación del sistema mecatrónico, logra reducir en un 85% el costo en la adquisición de una máquina semiautomática similar, y tomando en cuenta que en el país existe maquinaria netamente mecánica, se reduce el costo en un 28 %, logrando un costo de implementación muy competitivo a nivel nacional.
- A diferencia de las máquinas electromecánicas disponibles en el país, que simplemente pueden realizar de uno a tres modelos de cepillos por máquina, todo esto debido a que es muy complejo configurar sus sistemas de movimientos mecánicos; la máquina implementada puede realizar el diseño de cualquier tipo de cepillo de limpieza, no solo de formas rectangulares sino también con formas libres dependiendo del fabricante, debido a que la máquina es un sistema mecatrónico completamente flexible.
- A pesar de que existen empresas consolidadas en el país dedicadas a la producción de cepillos y escobas, esta actividad no se encuentra definida como una actividad económica, posiblemente porque dicha actividad se encuentra relacionada a generar una expectativa solo de trabajo u ocupación en sectores rurales, como en la parroquia San Juan de Pastocalle.
- En el país no existe alguna empresa que se dedique a la construcción e implementación de maquinaria de este tipo, maquinaria enfocada a la elaboración de cepillos de limpieza, por ende el proyecto desarrollado representa un gran paso en este campo y puede servir de base para futuras mejoras.
- Para todo el ensamble de la máquina se empleó tornillos y pernos de grado 8, tomando en cuenta que toda la estructura se encontrará sometida a cargas externas, evitando que el sistema mecatrónico falle en cualquier momento.
- La tarjeta Raspberry Pi 3 al disponer de puertos USB, se encarga de energizar a la tarjeta Arduino Mega y permite la comunicación serial entre

sí, y como la detección de las áreas de interés es en tiempo real, no genera tiempos muertos entre el proceso de visión y los procesos subsiguientes.

- La implementación del proceso de visión al inicio del sistema mecatrónico, cumple una función muy positiva, no solo para el autoajuste de los procesos posteriores de acuerdo a la matriz dispuesta, sino que también cuida de la integridad de la máquina, al asegurar que el proceso a desarrollarse sea específicamente para la matriz dada, de esta manera no desperdicia material al realizar un proceso inadecuado para una matriz errónea.
- La producción diaria de cepillos, al implementar la máquina es de aproximadamente 90, 60 y 40 en cepillos pequeños, medianos y grandes respectivamente, es decir se mejora en un 50 % la producción de los cepillos pequeños, en un 70 % la producción de los cepillos medianos y en un 30 % la producción de los cepillos grandes, dicha producción se encuentra comparada con la producción manual de la microempresa CEPIBRILLO-ECUADOR.
- Se diseñó 3 tipos de alimentadores de cerdas flexibles, tomando en consideración la disponibilidad de las partes mecánicas y eléctricas, por lo que se optó por un alimentador lineal y un actuador neumático, por la facilidad de acople. Dicho sistema es inventiva propia, y al ser un complemento de la matriz de inserción, su estructura general es robusta y simplificada, además de ser muy precisa en llevar la cantidad exacta de cerdas flexibles hacia la matriz,
- El manejo de la máquina es muy amigable con el operador, debido a que al ser autónoma y disponer del proceso de visión artificial, sólo requiere que se disponga o se coloque la matriz base a fabricar en la mesa superior y los procesos posteriores lo realiza la máquina.
- Por cualquier motivo de inseguridad por parte del operador, la máquina cuenta con botoneras de fácil acceso en su área de operación, dichas botoneras son Inicio, Paro de emergencia y Reset.

- En cada oportunidad que el operador presione el paro de emergencia, se debe accionar el botón Reset para que la máquina excluya todos los procesos que en el momento se encuentran corriendo y reinicie todo el funcionamiento, es decir cortará todo tipo de proceso actual y volverá a la posición HOME.
- La velocidad del sistema de movimiento referido a las mesas de trabajo, se encuentran directamente ligadas a los pasos de los husillo de bolas y también a la programación en el control de sus motores, por medio de pruebas se obtuvo que el tiempo máximo entre la activación y desactivación de los pasos del motor, en la programación es de 800 microsegundos.
- Las carreras de los actuadores deben ser exactas al momento de acoplarlos a los componentes independientes de la matriz de inserción, por lo que se ubicaron topes mecánicos para ajustar las carreras en los actuadores neumáticos no disponibles en el país.
- Todas las fuentes de poder deben estar aisladas unas de otras, evitando que los ruidos eléctricos que afecten la funcionalidad de los drivers y tarjetas de control.
- Se debe considerar el tiempo de importación de todos los materiales a emplearse en el proyecto, para evitar retardos innecesarios en su desarrollo.

## **5.2 Recomendaciones**

- Una buena lubricación es esencial para el funcionamiento adecuado de los tornillos de potencia y ejes guía, un lubricante de calidad ayuda a prolongar la vida útil de los mismos.
- Es recomendable comprobar en cada arranque de la máquina, la calidad de la lubricación, es decir una revisión regularmente mensual, por si la grasa o lubricación de los husillos puede optar por un color más oscuro, siendo un

indicio de oxidación o suciedad en el entorno por lo que se debe volver a lubricar.

- Si el sistema de inserción falla en el embutido del alambre para la formación de la grapa, es decir no arroja la grapa de manera constante en pruebas al vacío (ver manual de operación), se debe calibrar la carrera del marco que se encuentra acoplado al vástago del actuador neumático.
- La punta del alambre debe posicionarse exactamente en la entrada lateral de la perforación que tiene la matriz de inserción, para así evitar posibles choques del alambre en el momento de traslación a su interior.
- Para aumentar la velocidad de la máquina se recomienda cambiar los husillos de bolas, por una designación de husillos de cuatro hilos de entrada.
- Es recomendable emplear para el sistema de inserción una alimentación de aire igual o mayor a 70 bares, evitando así posibles problemas de corte del alambre o procesos de inserción.
- Para el manejo óptimo de la máquina, se recomienda capacitarse con el manual de usuario y de esta manera prevenir cualquier fallo innecesario.
- Para el sistema de inserción, al seleccionar las carreras de los actuadores, se debe tomar en cuenta el desplazamiento exacto de los componentes independientes de la matriz de inserción.
- Al terminar de calibrar las velocidades de cada actuador neumático, se deben ajustar completamente las contra tuercas de las válvulas de velocidad, para evitar posibles cambios o alteraciones en su velocidad de funcionamiento.
- El dosificador de cerdas flexibles debe estar siempre al 25 % o más de su contenedor, de la misma manera debe estar ubicado el contrapeso para evitar fallos en la cantidad exacta que debe llevar el eje guía lineal del alimentador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, A., Acaro, H., & Valdiviesos, C. (2010). Aplicación de Visión Robótica con Matlab. Guayaquil. Recuperado el 11 de Febrero de 2017, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/8991>
- abcinnova. (05 de Diciembre de 2017). Recuperado el 26 de Abril de 2017, de <http://www.abcinnova.com/articulos-e-informacion/18-ique-es-un-plc-y-que-beneficios-tiene.html>
- almadeherrero. (25 de Noviembre de 2016). Recuperado el 25 de Enero de 2017, de <http://almadeherrero.blogspot.com/2008/06/mecanismo-de-una-mquina-de-coser.html>
- aprendemostecnologia. (06 de Diciembre de 2017). Mecanismo de piñon cremallera. Recuperado el 16 de Marzo de 2017, de <https://aprendemostecnologia.org/2008/09/04/mecanismo-de-pinon-cremallera/>
- arduino.cl. (05 de Diciembre de 2017). Recuperado el 24 de Abril de 2017, de <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
- areatecnologia. (23 de Septiembre de 2017). Recuperado el 05 de Febrero de 2017, de <http://www.areatecnologia.com/que-es-la-neumatica.htm>
- Arroyo, B. (13 de Marzo de 2009). Escobas, cepillos y similares. Recuperado el 05 de Enero de 2017, de [www.inaes.gob.mx/doctos/pdf/guia\\_empresarial/escobas\\_y\\_cepillos.pdf](http://www.inaes.gob.mx/doctos/pdf/guia_empresarial/escobas_y_cepillos.pdf)
- bcnvision. (05 de Diciembre de 2017). Recuperado el 08 de Enero de 2017, de <http://www.bcnvision.es/blog-vision-artificial/iluminacion-vision-artificial2/>
- Bean Boozled Channel. (09 de 03 de 2015). Homemade brooms tufting machine. Recuperado el 18 de Abril de 2017, de [https://www.youtube.com/watch?v=WuC\\_Yj2XTks](https://www.youtube.com/watch?v=WuC_Yj2XTks)
- BOHMAN, I. (11 de Diciembre de 2015). CATALOGO DE ACEROS. Guayaquil: Paraninfo. Recuperado el 12 de Abril de 2017, de <http://www.proveedorariobamba.com/wp-content/uploads/2015/12/catalogo-de-aceros.pdf>
- borghi. (01 de 04 de 2017). Recuperado el 01 de 04 de 2017, de <http://www.borghi.com/es/k2-styles-3/insertadoras-tecnico-industrial/item/217-manual-simple-vertical-filling-tool-produce-brushes-pre-drilled-block/217-manual-simple-vertical-filling-tool-produce-brushes-pre-drilled-block?jjj=1491078447032>

- bricotodo. (13 de Diciembre de 2014). Recuperado el 22 de Noviembre de 2016, de <http://www.bricotodo.com/taladrar.htm>
- campus.almagro. (03 de Julio de 2017). Recuperado el 03 de Julio de 2017, de <http://campus.almagro.ort.edu.ar/educaciontecnologica/segundo/articulo/49641/mecanismo-de-una-maquina-de-coser->
- Caniparoli, J. (05 de Diciembre de 2017). Sensores de final de carrera. Recuperado el 24 de Abril de 2017, de <https://es.slideshare.net/JavierCaniparoli/sensores-de-final-de-carrera>
- casamcgregorx. (25 de Octubre de 2017). Recuperado el 25 de Octubre de 2017, de <http://www.casamcgregor.com.ni/servicio/2/marca/8/producto/151/>
- catarina.udlap.mx. (22 de Enero de 2015). Recuperado el 12 de Enero de 2017, de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/huerta\\_t\\_ca/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/huerta_t_ca/capitulo3.pdf)
- catedu. (09 de Febrero de 2015). Transmisión por poleas y correas o cadenas. Recuperado el 2018 de Marzo de 2017, de [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/3\\_transmisin\\_por\\_poleas\\_y\\_correas\\_o\\_cadenas.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/3_transmisin_por_poleas_y_correas_o_cadenas.html)
- Chancusi , S., & Navarrete Paúl. (2014). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D AUTO-REPLICABLE CONTROLADA INALÁMBRICAMENTE PARA EL PROTOTIPADO DE PIEZAS PLÁSTICAS DE BAJO COSTO, MEDIANTE SOFTWARE LIBRE. Latacunga.
- Cifuentes, M., Izurieta, A., & Faria, H. (12 de Septiembre de 2012). Medición de la efectividad del manejo de áreas protegidas. Recuperado el 10 de Febrero de 2017, de <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2000-131-Es.pdf>
- demaquinasyherramientas. (03 de Diciembre de 2017). Recuperado el 10 de Marzo de 2017, de <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/fresadoras-cnc>
- desarrolloweb. (04 de Abril de 2017). Recuperado el 04 de Abril de 2017, de <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>
- Díaz, C., & Guerra, F. (2016). Educación para adultos: Ámbito Científico Tecnológico I. Editex.

- directindustry. (04 de Diciembre de 2017). Recuperado el 15 de Marzo de 2017, de <http://www.directindustry.es/prod/eichenberger-gewinde/product-13697-58015.html>
- documents.mx. (01 de Diciembre de 2016). Recuperado el 10 de Febrero de 2017, de <http://documents.mx/documents/labview-caracteristicas.html>
- ECHAEFFLER GROU PIndustrial. (12 de Enero de 2015). dibsamexico-Sistemas de guiado por eje. Obtenido de <http://www.dibsamexico.com/pdf/SISTEMADEGUIADOPOREJE.pdf>
- etitudela. (27 de Mayo de 2010). etitudela. Recuperado el 06 de Enero de 2017, de <http://www.etitudela.com/celula/downloads/visionartificial.pdf>
- gabrielmecanismos. (29 de Noviembre de 2017). Sistemas polea - correa. Recuperado el 17 de Marzo de 2017, de <https://sites.google.com/site/gabrielmecanismos/Home/parte-iii/transformacion-de-movimiento-giratorio-en-giratorio/1-2---sistema-polea-correa>
- Herrera, D., Liang, Y., & Sotomayor, N. (13 de Noviembre de 2016). Diseño y construcción de una máquina para la elaboración de circuitos impresos basado en control numérico computarizado. Quito, Ecuador. Recuperado el 03 de Febrero de 2017, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4893/1/Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20una%20m%C3%A1quina%20para%20la.pdf>
- ingemecanica. (28 de Abril de 2017). Transmisión por cadenas, cálculo y diseño. Recuperado el 18 de Marzo de 2017, de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>
- ingemecanica.com. (24 de Mayo de 2017). Recuperado el 15 de Marzo de 2017, de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html>
- Ingeniería mecafenix. (05 de Diciembre de 2017). Sensor de proximidad capacitivo. Recuperado el 22 de Abril de 2017, de <http://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensor-proximidad-capacitivo/>
- ingenieriaelectronica.org. (05 de Diciembre de 2017). Que es un PLC, definición y características. Recuperado el 02 de Abril de 2017, de <https://ingenieriaelectronica.org/que-es-un-plc-definicion-y-caracteristicas/>
- jfinternational. (28 de Febrero de 2017). Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, de <http://www.jfinternational.com/mf/fuerzas-friccion.html>

- Keyence. (05 de Diciembre de 2017). Qué es un sensor de proximidad inductivo. Recuperado el 13 de Abril de 2017, de <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/proximity/info/>
- lenovo. (08 de Diciembre de 2016). Recuperado el 05 de Marzo de 2017, de <http://shop.lenovo.com/es/es/desktops/ideacentre/stick-300/>
- mecapedia. (13 de Abril de 2016). Sistemas de guiado lineal. Recuperado el 05 de Abril de 2017, de [http://www.mecapedia.uji.es/catalogos/guia\\_lineal/ina.2.pdf](http://www.mecapedia.uji.es/catalogos/guia_lineal/ina.2.pdf)
- Mercola, J. (6 de Febrero de 2015). Sentarse Aumenta su Riesgo de Morir por Cualquier Causa, Aunque Haga Ejercicio. Recuperado el 04 de Enero de 2017, de <http://ejercicios.mercola.com/sitios/ejercicios/archivo/2015/02/06/efectos-de-estar-sentado-mucho-tiempo.aspx>
- Morales Ríos, H. A. (14 de Noviembre de 2012). Diseño mecánico de la estructura para un router CNC. Mexico D.F. Recuperado el 08 de Marzo de 2017, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5355/tesis.pdf?sequence=1>
- Mott, R. (2006). Diseño de elementos de máquinas. México: Pearson Educacion.
- Mott, R. L. (2009). Resistencia de Materiales. México: Pearson Educación.
- muycomputer. (04 de Diciembre de 2017). Recuperado el 05 de Marzo de 2017, de <https://www.muycomputer.com/2015/12/31/lattepanda-mini-pc/>
- NBS. (10 de Enero de 2013). Catálogo Técnico General-Sistemas de Guiado lineal. Recuperado el 05 de Diciembre de 2016, de [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwibt9Cmkd7QAhWGGJiYKHSg6DCsQFggrMAM&url=https%3A%2F%2Fwww.interempresas.net%2FFeriaVirtual%2FCatalogos\\_y\\_documentos%2F2623%2FSistemas-Lineales\\_NBS.pdf&usg=AFQjCNHbw9sE](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwibt9Cmkd7QAhWGGJiYKHSg6DCsQFggrMAM&url=https%3A%2F%2Fwww.interempresas.net%2FFeriaVirtual%2FCatalogos_y_documentos%2F2623%2FSistemas-Lineales_NBS.pdf&usg=AFQjCNHbw9sE)
- neréida.deioc. (29 de Diciembre de 2002). Recuperado el 11 de Febrero de 2017, de <http://nereida.deioc.ull.es/~pcgull/ihiu01/cdrom/matlab/contenido/node2.html>
- ni. (01 de Diciembre de 2016). Recuperado el 10 de Febrero de 2017, de <http://www.ni.com/labview/esa/>

- Nieto, E. (2013). Mantenimiento industrial práctico. Badalona: Fidestec. doi:[http://www.fidestec.com/download/mantenimiento\\_industrial\\_practico\\_demo.pdf](http://www.fidestec.com/download/mantenimiento_industrial_practico_demo.pdf)
- omicron. (09 de Diciembre de 2016). Recuperado el 06 de Marzo de 2017, de <http://www.omicron.com/2016/02/raspberry-pi-3-model-b/>
- Perez, M., Hidalgo , A., & Berenguer, E. (14 de Septiembre de 2013). Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. Recuperado el 05 de Febrero de 2017, de <http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unidad1y2.pdf>
- Pozzimaq. (05 de 05 de 2013). Tufaidera MTE1438. Recuperado el 20 de Abril de 2017, de <https://www.youtube.com/watch?v=3Zgvg1akO-g>
- RDSolutions3D. (07 de Abril de 2017). Selección de materiales. Recuperado el 23 de Abril de 2017, de <http://rds077.blogspot.com/2015/07/seleccion-de-materiales-5-webs.html>
- robotshop. (27 de Diciembre de 2017). Recuperado el 26 de Septiembre de 2017, de <https://www.robotshop.com/uk/tb6600-stepper-motor-driver.html>
- Schaeffler. (4 de Diciembre de 2016). Sistemas de guiado lineal. Recuperado el 24 de Marzo de 2017, de [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/tpi/downloads\\_8/seleccion\\_de\\_sistemas\\_de\\_guiado\\_lineal.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/seleccion_de_sistemas_de_guiado_lineal.pdf)
- Schaeffler. (26 de Octubre de 2016). Sistemas de guiado por eje. Recuperado el 05 de Abril de 2017, de [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/catalogue\\_1/downloads\\_6/wf\\_1\\_es.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/wf_1_es.pdf)
- sii.cl. (17 de Enero de 2017). Recuperado el 17 de Enero de 2017, de <http://www.sii.cl/catastro/codigos.htm#4>
- simbolocalidad. (28 de Marzo de 2017). Recuperado el 28 de Marzo de 2017, de <http://blog.simbolocalidad.com/problematika-de-la-inhalacion-del-polvo-de-madera>
- skf. (05 de Diciembre de 2016). Recuperado el 05 de Diciembre de 2016, de <http://www.skf.com/es/products/linear-motion/ball-and-roller-screws/index.html>
- spanish.alibaba. (09 de Enero de 2018). Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/cnc-broom-tufting-machine->

- brush-making-machine-1097240899.html?spm=a2700.8699010.29.2.1113b67duaMAHV&s=p
- tallerdedalo. (11 de Mayo de 2017). Recuperado el 08 de Marzo de 2017, de <http://tallerdedalo.es/web/node/15>
- todoproductividad. (13 de Diciembre de 2016). Recuperado el 16 de Diciembre de 2016, de <http://todoproductividad.blogspot.com/2009/10/motor-por-pasos-o-servomotor.html>
- ufg.edu. (21 de Junio de 2017). Comprobación de hipótesis. Recuperado el 16 de Enero de 2018, de <http://ri.ufg.edu.sv/jspui/bitstream/11592/8187/7/371-M671f-CAPITULO%20VI.pdf>
- unac.edu. (25 de Abril de 2017). Recuperado el 15 de Marzo de 2017, de [http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes\\_Finales\\_Investigacion/Abril\\_2011/IF\\_LOAYZA\\_FIME/CAPITULO%20II.PDF](http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Abril_2011/IF_LOAYZA_FIME/CAPITULO%20II.PDF)
- Valarezo, I., & Vizúete, G. (06 de 05 de 2016). Diseño de una dosificadora de jabones de glicerina con capacidad de setenta y dos unidades por minuto. Quito. Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15228/1/CD-7003.pdf>
- visionartificial.fpcat.cat. (4 de Octubre de 2012). Recuperado el 24 de Noviembre de 2016, de [http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/UD\\_1\\_didac\\_Conceptos\\_previos.pdf](http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/UD_1_didac_Conceptos_previos.pdf)
- Yépez, F., & Lema, V. (2015). MODERNIZACIÓN DE UNA MÁQUINA PERFORADORA LINEAL DE EBANISTERÍA. Ibarra. Recuperado el 16 de Enero de 2017, de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/4352>

# ANEXOS



**ESPE**  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

## **CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **EDWIN FERNANDO BANDA IZA Y RICHARD PAÚL TOASA ABATA.**

En la ciudad de Latacunga, a los 31 días del mes de Enero del 2018.

**Aprobado por:**

