



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

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

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE  
MANUFACTURA FLEXIBLE DE ORDEN ALEATORIO Y  
DISTRIBUCIÓN EN LÍNEA CON CONTROL DE CALIDAD  
PARA PRÁCTICAS DE FMS EN EL LABORATORIO DE CNC”.**

**AUTORES:**

**MAURICIO DANILO CHILQUINGA MALLIQUINGA**

**WALTER MIGUEL JARA MIGUEL**

**DIRECTOR: ING. FAUSTO ACUÑA**

**LATACUNGA**

**2017**



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

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo titulado “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE MANUFACTURA FLEXIBLE DE ORDEN ALEATORIO Y DISTRIBUCIÓN EN LÍNEA CON CONTROL DE CALIDAD PARA PRÁCTICAS DE FMS EN EL LABORATORIO DE CNC**”, realizado por **MAURICIO DANILO CHILQUINGA MALLIQUINGA** y **WALTER MIGUEL JARA RAMOS**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los señores **MAURICIO DANILO CHILQUINGA MALLIQUINGA** y **WALTER MIGUEL JARA RAMOS** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, Enero del 2017.

Atentamente,

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser 'Fausto Acuña Coello', escrita sobre una línea horizontal.

**ING. FAUSTO ACUÑA COELLO**  
**DIRECTOR**



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### AUDITORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **MAURICIO DANILO CHILQUINGA MALLIQUINGA** y **WALTER MIGUEL JARA RAMOS**, con cédula de identidad N° 050364283-7 y N° 020210380-0 respectivamente, declaramos que este trabajo denominado **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE MANUFACTURA FLEXIBLE DE ORDEN ALEATORIO Y DISTRIBUCIÓN EN LÍNEA CON CONTROL DE CALIDAD PARA PRÁCTICAS DE FMS EN EL LABORATORIO DE CNC”**, 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 esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Enero del 2017.

---

**MAURICIO DANILO CHILQUINGA MALLIQUINGA**  
C.C.: 050364283-7

---

**WALTER MIGUEL JARA RAMOS**  
C.C.: 020210380-0



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### AUTORIZACIÓN

Nosotros, **MAURICIO DANILO CHILQUINGA MALLIQUINGA** y **WALTER MIGUEL JARA RAMOS**, autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE, publicar en la Biblioteca Virtual de la Institución el presente trabajo de titulación **“Diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad para prácticas de FMS en el Laboratorio de CNC.”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva auditoría y responsabilidad.

Latacunga, Enero del 2017.

---

**MAURICIO DANILO CHILQUINGA MALLIQUINGA**  
C.C.: 050364283-7

---

**WALTER MIGUEL JARA RAMOS**  
C.C.: 020210380-0

## DEDICATORIA

*Dedico este proyecto a Dios por darme la fortaleza, por no dejarme vencer en los momentos difíciles y por haberme permitido llegar hasta este instante tan importante en mi formación profesional para culminar con éxito esta etapa de mi vida.*

*En memoria de mi Abuelito, Aunque hoy no está aquí, vive por siempre en mi memoria y habita en mis recuerdos. Sus enseñanzas me ayudaron a enfrentar la vida y vivo orgulloso de él por su ejemplo, su dedicación, por lo que me enseñó. Gracias Abuelito por haber existido.*

*Agradecer a mi Madre y Abuelita por ser la guía que me orientaron a mirar siempre hacia adelante y hacer posible mi educación. Sin ustedes nada fuera posible porque han sido un ejemplo de superación y me han demostrado que los esfuerzos de la vida te recompensan.*

*Cuando uno da un gran paso en la vida, se debe ser grato con todas las personas que te han brindado la mano siempre, también agradezco a aquellas personas que siempre me han dado razones para seguir y poner toda mi voluntad en lo que hago.*

**Danilo Chiliquinga**

## DEDICATORIA

*Gracias a todas las personas importantes en mi vida que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, las personas que hicieron todo para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano. Con todo cariño esta tesis les dedico a ustedes.*

*A mis padres que son el sostén fundamental en todo mí existir, quienes me dieron la vida, educación, consejos, apoyo en los momentos difíciles y por sustentarme con los recursos necesarios para estudiar. A todos que estuvieron a mi lado como mi hermana y demás familiares que siempre se encontraban pendientes de mí.*

*A mi novia Carla quien me apoyo y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir, así como a toda su familia quienes estuvieron incondicionalmente conmigo en todo momento.*

*Sobre todo dedico este proyecto a todos aquellos que no creyeron en mí, a todos aquellos que deseaban mi fracaso, a todos aquellos que ponían obstáculos en mi avanzar, a todos aquellos que apostaban a que me rendiría a medio camino, a todos que supusieron que no lo lograría, a todos ellos les dedico esta tesis.*

**Miguel Jara**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A todas las personas que de una u otra manera influyeron en nuestras vidas, la ayuda que nos han brindado, el apoyo incondicional y compañía durante todo nuestro desarrollo profesional.*

*Queremos expresar un afectuoso agradecimiento a nuestro director de tesis Ing. Fausto Acuña Coello por su esfuerzo, dedicación, sus conocimientos, sus orientaciones, su paciencia, inculcarnos valores y sentido de responsabilidad, seriedad y rigor académico, sin los cuales no tendríamos una formación completa, ganándose nuestra admiración y lealtad, así como sentirnos en deuda por todo lo recibido durante el desarrollo de este proyecto de titulación.*

*Un especial agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPEL por abrirnos las puertas, acogernos en su seno científico, por las oportunidades que nos han brindado, por prepararnos para un futuro competitivo y formarnos como profesionales.*

*A todos nuestros catedráticos quienes en su difícil tarea de transmitirnos sus diversos conocimientos dieron todo su esfuerzo y capacidad por dejarnos toda su enseñanza, guiándonos en el camino correcto y de esa manera lograr finalmente nuestra meta.*

*A todos nuestros compañeros y amigos presentes y pasados, quienes compartieron con nosotros sus conocimientos, alegrías, tristezas, confianza, consejos y por todos los momentos vividos.*

**Gracias de todo corazón**

**Danilo y Miguel**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AUDITORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
PRESENTACIÓN .....	xix

### CAPÍTULO I

#### ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

1.1	Introducción .....	1
1.2	Celdas de Manufactura en el País .....	5
1.2.1	Componentes .....	10
1.2.2	Clasificación de los FMS.....	14
1.2.3	Configuración de Layouts .....	16
1.3	Sondas de medición.....	17
1.3.1	Introducción .....	17
1.3.2	Tipos de sondas.....	18
1.3.3	Componentes.....	19
1.3.4	Controlador .....	20

### CAPÍTULO II

#### DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES PARA LA CELDA DE MANUFACTURA CON CONTROL DE CALIDAD

2.1	Introducción .....	21
2.2	Diseño por calidad .....	21

2.2.1	Casa de la calidad .....	21
2.2.2	Requisitos del cliente .....	22
2.2.3	Requisitos técnicos .....	22
2.2.4	Conclusión de la casa de la calidad .....	23
2.3	Factores y requerimientos para el diseño de la estación de control de calidad .....	25
2.4	Requerimientos para selección de la estación de control de calidad..	25
2.5.1	Selección de la sonda de medición .....	26
2.5.2	Alternativas de solución para la sonda de medición.....	27
2.5.3	Selección de sonda de medición.....	30
2.5.4	Esquema de conexión de la sonda de medición .....	31
2.6	Diseño del soporte para sonda de medición .....	31
2.6.1	Desarrollo de piezas de sujeción .....	32
2.7	Selección del sistema de posicionamiento .....	33
2.7.1	Alternativas de solución para sistema posicionamiento automático ..	34
2.7.2	Selección del sistema de posicionamiento .....	37
2.7.3	Características del sistema de posicionamiento del laboratorio de CNC de la institución.....	38
2.8	Arquitectura global del sistema electrónico .....	39
2.9	Selección del hardware de interpretación .....	40
2.9.1	Alternativas de solución para el hardware de interpretación.....	40
2.9.2	Selección del hardware de interpretación .....	44
2.10	Selección del hardware controlador de motores PAP Nema 17 .....	44
2.10.1	Alternativas de solución para el hardware controlador de motores PAP Nema 17 .....	45
2.10.2	Selección del hardware controlador de motores PAP Nema 17 .....	48
2.11	Selección de driver para motores PAP Nema 17 .....	48
2.11.1	Alternativas de solución de driver para motores PAP Nema 17 .....	49
2.11.2	Selección de driver para motores PAP Nema 17 .....	50
2.12	Sistema de alimentación eléctrica.....	51
2.13	Selección de alimentación eléctrica del sistema .....	52
2.13.1	Alternativas de alimentación eléctrica del sistema .....	52
2.13.2	Selección de alternativas de fuentes de alimentación .....	54

2.14	Arquitectura global final del sistema electrónico.....	55
2.15	Selección de software para la estación de control de calidad .....	56
2.15.1	Alternativas de selección de software para la estación .....	56
2.15.2	Selección de software para la estación de control de calidad .....	57
2.15.3	Diagrama de flujo del software GRBL BCNC .....	59
2.16	Selección de software para la interfaz HMI de la estación de control de calidad .....	60
2.16.1	Alternativas de selección de software para la Interfaz HMI de la estación de control de calidad.....	60
2.16.2	Selección de software para la interfaz HMI de la estación .....	62
2.16.3	Etapa de diseño de la interfaz Hombre - Máquina .....	63
2.16.4	Diseño de una interfaz HMI para la conexión y acoplamiento a la celda de manufactura.....	63
2.17	Diseño de la placa PCB de conexiones de motores pap Nema 17 y resistencia Pull-Up para la sonda de medición .....	65

### **CAPÍTULO III**

#### **IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD**

3.1	Implantación del módulo .....	67
3.1.1	Elaboración del soporte de la sonda de medición en impresión 3D ....	67
3.1.2	Elaboración de la placa PCB de conexiones para motores PAP y resistencia Pull-Up para la sonda de medición.....	67
3.1.3	Implementación del sistema de posicionamiento con la sonda .....	68
3.2	Etapa electrónico y de potencia .....	69
3.2.1	Plano de conexiones eléctricas.....	69
3.2.2	Conexión eléctrica para la sonda de palpación .....	72
3.2.3	Configuración de la resolución de los motores pap nema 17 .....	72
3.3	Etapa del sistema de control.....	73
3.3.1	Funcionamiento y preparación de GRBL BCNC .....	74
3.3.2	Introducción al funcionamiento del programa GRBL BCNC .....	76
3.3.3	Configuración de GRBL v0.9i para la estación de control .....	76
3.3.4	Configuración de GRBL para la estación de control de calidad.....	86
3.4	Regulación de voltaje de referenica VREF para los motores PAP .....	87

## **CAPÍTULO IV**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

4.1 Pruebas Mecánicas .....	<b>89</b>
4.1.1 Error de medición de longitud .....	<b>89</b>
4.1.3 Pruebas de disparo Sonda de Palpación .....	<b>96</b>
4.1.4 Pruebas de programación y palpación .....	<b>96</b>
4.2 Prueba de aceptación del sistema de palpación .....	<b>98</b>
4.3 Pruebas control de calidad.....	<b>102</b>
4.3.1 Prueba de obtención de la incertidumbre de medición.....	<b>102</b>
4.4 Pruebas de corrientes en los motores paso a paso.....	<b>109</b>
4.5.1 Planteamiento de la hipótesis de trabajo y nula .....	<b>112</b>
4.5.2 Designación de variables .....	<b>112</b>
4.5.3 Valores observados .....	<b>112</b>
4.5.4 Cálculo de chi cuadrado .....	<b>113</b>
4.5.5 Cálculo del grado de libertad y nivel de significancia .....	<b>114</b>
4.6 Manual de operación .....	<b>115</b>
4.7 Análisis económico del proyecto.....	<b>115</b>
4.7.1 Análisis económico de la estación de control de calidad.....	<b>115</b>
4.5.2 Análisis económico de la celda de manufactura.....	<b>118</b>

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones .....	<b>121</b>
5.2 Recomendaciones .....	<b>123</b>
BIBLIOGRAFÍA.....	<b>125</b>
NETGRAFÍA.....	<b>126</b>
ANEXOS .....	<b>129</b>
ANEXO A: Características técnicas: Arduino Uno, Pololu A4988, CNC Shield V3.0, Fuente ATX, Diagrama de conexión del control.	
ANEXO B: Cálculo de exactitud y repetibilidad de la estación, nivel de confianza, chi cuadrado.	
ANEXO C: Líneas de programación para Proccesing3.	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Celda de manufactura configuración anillo .....	3
Figura 2 Celda de manufactura implementada .....	3
Figura 3 a) Estación de trabajo, b) HMI procesamiento de imágenes .....	4
Figura 4 Celda de manufactura robotizada. Brazo Robótico KUKA .....	8
Figura 5 Partes constitutivas celda de manufactura, Robot CRS A255.....	10
Figura 6 Sistema Automatizado de AS/RS .....	11
Figura 7 Transferencia de piezas por parte de un brazo robótico .....	13
Figura 8 Transportador de rodillos en la industria del vestido .....	13
Figura 9 Sistema de Control por Computador .....	14
Figura 10 Layout en línea .....	17
Figura 11 Sonda por contacto .....	17
Figura 12 Tipos de sondas .....	18
Figura 13 Componentes de una sonda .....	19
Figura 14 Componentes de una sonda (Muelle) .....	19
Figura 15 Casa de la Calidad .....	24
Figura 16 sonda Motorizada .....	27
Figura 17 Sonda de inspección.....	28
Figura 18 Sonda de inspección.....	29
Figura 19 Diagrama de flujo del funcionamiento de la sonda.....	31
Figura 20 Diseño en Solidworks 2014 del soporte para la sonda.....	32
Figura 21 Soporte de sujeción para la sonda .....	33
Figura 22 Mesa de posicionamiento .....	34
Figura 23 Brazo articulado de medición.....	35
Figura 24 Máquina de medición con mecanismo paralelo .....	36
Figura 25 Arquitectura global del sistema eléctrico .....	39
Figura 26 Arduino Uno Rev3 .....	41
Figura 27 Raspberry Pi A+ .....	42
Figura 28 GRBL Shield.....	46
Figura 29 Placa Grecko GM215.....	47
Figura 30 CNC Shield Arduino v3.0 .....	47
Figura 31 Driver Pololu A4988.....	51
Figura 32 Fuente de alimentación ATX.....	55

Figura 33 Arquitectura final del sistema eléctrico .....	55
Figura 34 Interfaz GRBL BCNC .....	58
Figura 35 Diagrama de flujo del software GRBL BCNC .....	59
Figura 36 Interfaz de Processing 3 .....	63
Figura 37 Esquema de programación para la Interfaz HMI .....	64
Figura 38 HMI para la estación de control de calidad .....	65
Figura 39 Diseño de pistas de la placa de interfaz.....	65
Figura 40 Diseño de pistas de la placa de interfaz.....	66
Figura 41 Soporte de sujeción impreso en 3D .....	67
Figura 42 Placa con elementos soldados .....	68
Figura 43 Sistema de posicionamiento y sonda de medición.....	68
Figura 44 Área de sujeción de piezas .....	69
Figura 45 Plano de conexiones eléctricas.....	70
Figura 46 Conexiones Eléctricas en el Gabinete de Control .....	70
Figura 47 Conexión del Driver Pololu A4988 .....	71
Figura 48 Bloque de ubicación del Arduino Uno, CNC Shield, Driver A4988 y Ventilador.....	71
Figura 49 Esquema de conexión de la sonda .....	72
Figura 50 Pines de Configuración de Resolución .....	73
Figura 51 Pines de resolución de la tarjeta CNC Shield Arduino v3.0.....	73
Figura 52 Presentación de XLoader .....	75
Figura 53 Configuración global de GRBL.....	76
Figura 54 Lista de configuración de GRBL .....	77
Figura 55 Estado actual en Grbl .....	86
Figura 56 Voltaje de referencia en el driver Pololu A4988.....	88
Figura 57 Longitudes de compensación .....	89
Figura 58 Algunos ejemplos de líneas de medición .....	90
Figura 59 Valores promedios de cada uno de las líneas 7 mediciones.....	92
Figura 60 Error de medición en centros de mecanizado .....	95
Figura 61 Señal de Accionamiento de la Sonda de Medición .....	96
Figura 62 Operación de palpado.....	98
Figura 63 Esfera de prueba de aceptación del sistema de palpación .....	98
Figura 64 Puntos recomendados por la norma ISO 10360-5:2010 .....	99
Figura 65 Distancias radiales de las muestras tomadas en la tabla 23 .....	101

Figura 66 Variación del error de palpado .....	101
Figura 67 Gráfica de aceptación o rechazo según la tolerancia .....	102
Figura 68 Tomas de muestras .....	103
Figura 69 Rango donde se encuentra valor real de medición muestra 1....	104
Figura 70 Rango donde se encuentra valor real de medición muestra 2....	105
Figura 71 Rango donde se encuentra valor real de medición muestra 3...	105
Figura 72 Rango donde se encuentra valor real de medición muestra 4...	106
Figura 73 Rango donde se encuentra valor real de medición muestra 5...	107
Figura 74 Rango donde se encuentra valor real de medición muestra 6....	108
Figura 75 a) Corriente en Motor PAP Eje X. b) Corriente en Motor PAP Eje Y. c) Corriente en Motor PAP Eje Z.....	110
Figura 76 Consumo de Corriente en el Eje X.....	111
Figura 77 Consumo de Corriente en el Eje Y.....	111
Figura 78 Consumo de Corriente en el Eje Z.....	111
Figura 79 Crysta Plus M544 .....	117
Figura 80 Celda instalada en la Universidad San Francisco de Quito.....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Posicionamiento del palpador .....	20
Tabla 2 Selección de la sonda de medición .....	30
Tabla 3 Selección del sistema de posicionamiento .....	37
Tabla 4 Características de la mesa de posicionamiento disponible .....	38
Tabla 5 Características técnicas de la placa Arduino Uno Rev3 .....	41
Tabla 6 Características Técnicas de la placa Raspberry Pi A+ .....	42
Tabla 7 Características de Microcontrolador PIC 16F877A.....	43
Tabla 8 Selección del hardware de interpretación .....	44
Tabla 9 Selección para hardware controlador de motores PAP Nema 17 ....	48
Tabla 10 Principales características del driver A4988.....	49
Tabla 11 Principales características del driver DRV8825.....	50
Tabla 12 Selección para hardware controlador de motores PAP Nema 17 ..	50
Tabla 13 Selección para hardware controlador de motores PAP .....	54
Tabla 14 Selección de software para la estación de control de calidad .....	57
Tabla 15 Selección de software para la Interfaz HMI del proyecto.....	62
Tabla 16 Resolución del driver A4988 POLOLU .....	72
Tabla 17 Inversión de sentido de los ejes .....	79
Tabla 18 Informes disponibles en GRBL.....	80
Tabla 19 Puntos de orientación dentro del área de trabajo .....	90
Tabla 20 Resultados de la prueba error de longitud de medición .....	91
Tabla 21 Obtención de la precisión.....	93
Tabla 22 Mediciones en CM ExpertMill VMC-0600n el C.....	94
Tabla 23 Mediciones en CM Vertical CNC de 5 ejes.....	95
Tabla 24 Acciones del Código “G38” .....	97
Tabla 25 Datos de la prueba de aceptación.....	100
Tabla 26 Mediciones de la posición 1 del cono de prueba .....	103
Tabla 27 Mediciones de la posición 2 del cono de prueba .....	104
Tabla 28 Mediciones de la posición 3 del cono de prueba .....	105
Tabla 29 Mediciones de la posición 4 del cono de prueba .....	106
Tabla 30 Mediciones de la posición 5 del cono de prueba .....	106
Tabla 31 Mediciones de la posición 6 del cono de prueba .....	107
Tabla 32 Resultado final de incertidumbre al 99% de confianza .....	109

Tabla 33 Corriente vs velocidad de los motores PAP Nema 17 .....	110
Tabla 34 Valores observados .....	113
Tabla 35 Frecuencia Observada.....	113
Tabla 36 Frecuencia esperada .....	113
Tabla 37 Nómina de elementos utilizados en la estación.....	116
Tabla 38 Costo de mano de obra.....	117
Tabla 39 Equipos disponibles en el Laboratorio de CNC de institución .....	118
Tabla 40 Equipo y material proporcionado por los estudiantes .....	118

## RESUMEN

Las técnicas de control de calidad en los procesos industriales son todos los mecanismos, acciones y herramientas que se pueden utilizar para poder detectar la presencia de algún tipo de error. El control de calidad existe para conocer las especificaciones establecidas durante la elaboración del producto y aportar asistencia en el proceso de fabricación, para que la producción alcance ciertas especificaciones o características, por lo tanto consiste en la recolección y análisis de grandes cantidades de datos que servirán para poder controlar la calidad de un producto y de esta manera iniciar una acción correctiva adecuada. Mediante el uso de distintos elementos y herramientas tecnológicas se ha desarrollado una estación de control de calidad, creando un diseño de toda una celda de manufactura flexible de orden aleatorio con control de calidad en un software especializado de diseño, la misma que cuenta con todas las facilidades de manejo para los usuarios, conteniendo botones y direccionamientos sencillos de reconocer, permitiendo de esta manera que el laboratorio sea versátil, entregando productos de gran eficiencia y ayuda para los alumnos, ya que permite optimizar el trabajo y mejorar el desenvolvimiento práctico de los estudiantes en un futuro desarrollo de sus vidas laborales, principalmente en la industria.

### **PALABRAS CLAVE:**

- MANUFACTURA
- CONTROL DE CALIDAD
- METROLOGÍA MECÁNICA
- SOFTWARE LIBRE

## ABSTRACT

The quality control techniques in industrial processes are all mechanisms, actions and tools that can be used to detect the presence of some sort of error. Quality control exists for specifications established during product development and provide assistance in the manufacturing process for the production reaches certain specifications or characteristics, therefore involves the collection and analysis of large amounts of data that will to control the quality of a product and thus initiate appropriate corrective action. By using different elements and technological tools it has developed a station quality control, creating a design of a whole cell of flexible manufacturing random order with quality control in a specialized design software, the same that has all the handling facilities for users, containing buttons and simple routing to recognize, thus allowing the laboratory is versatile, providing products with high efficiency and support for students, as it allows to optimize work and improve the practical development of students in the future development of their working lives, mainly in industry.

### KEYWORDS:

- MANUFACTURE
- QUALITY CONTROL
- MECHANICAL METROLOGY
- FREE SOFTWARE

## PRESENTACIÓN

En el presente proyecto se desarrolla el diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y en línea con control de calidad para prácticas de FMS en el laboratorio de CNC.

En el Capítulo I se recopila toda la información relevante sobre sistemas flexibles de manufactura, así también se puede ver la información a cerca de sistemas de palpación.

En el Capítulo II se describe los parámetros necesarios para la realización del proyecto, así como también la selección de los distintos elementos mecánicos, eléctrico, electrónicos y softwares, necesarios para lograr componer una estación de control de calidad.

En el Capítulo III se detalla la implementación de todos los componentes mecánicos y eléctricos, además de la unión con los softwares de control y funcionalidad del prototipo.

En el Capítulo IV se muestra las pruebas realizadas a la estación tanto en su parte eléctrico, mecánico y control de calidad.

En el Capítulo V se presenta las conclusiones y recomendaciones recopiladas durante todo el desarrollo de este proyecto, las mismas que son de gran importancia para futuras investigaciones relacionadas con el mismo.

Finalmente se puntualiza las referencias bibliográficas empleadas a lo largo del proceso de diseño de este proyecto y los anexos necesarios para profundizar en el tema

## CAPÍTULO I

### ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Introducción

Un sistema de Manufactura Flexible, que en inglés se conoce como Flexible Manufacturing System (FMS), es una celda de maquinado con tecnología de grupos altamente automatizada que consiste en un grupo de estaciones de procesamiento, que generalmente son máquinas herramienta CNC, interconectadas entre sí mediante un sistema automatizado de manejo, almacenamiento de materiales y control de calidad que a su vez son controlados por un sistema integrado de computadoras; un FMS es capaz de procesar una amplia familia de estilos de partes con similitudes, bajo un programa de control numérico en diferentes estaciones de trabajo (Castillo, 2010).

Dentro de un FMS una de las estaciones de trabajo importantes es la de control de calidad del producto elaborado, donde el control de calidad permite verificar que un elemento terminado reúna las condiciones necesarias para satisfacer las necesidades o deseos del cliente, es decir, que cumpla los requerimientos mínimos de calidad.

En el laboratorio de FMS (Sistemas Flexibles de Manufactura) de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga se dispone de máquinas - herramientas para realizar maquinados del tipo CNC (Control Numérico por Computadora), para la correcta validación de una pieza mecanizada se requiere implementar una estación de Control de Calidad para la aprobación de las piezas que se fabriquen en las máquinas y verificar que se cumpla con las tareas que se le programaron en el computador y comprobar las tolerancias del producto fabricado, como el laboratorio es uno de los mejores del país de la Universidad de las Fuerzas Armadas se debe contar con herramientas y medidores que sigan con un protocolo de control de calidad con responsabilidad para entregar productos de precisión.

El control de calidad son todos los mecanismos, acciones y herramientas que se pueden realizar para poder detectar la presencia de algún tipo de error.

La función del control de calidad existe para conocer las especificaciones establecidas por la elaboración del producto y aportar asistencia en el proceso de fabricación, para que la producción alcance ciertas especificaciones o características, por lo tanto consiste en la recolección y análisis de grandes cantidades de datos que servirán para poder controlar la calidad de un producto y de esta manera iniciar una acción correctiva adecuada.

Todo producto que no cumpla las características mínimas para poder decir que es correcto, debe ser necesariamente descartado o eliminado, sin poderse corregir los posibles defectos de fabricación que podrían evitar esos costos añadidos y desperdicios de material.

Para obtener el control de la calidad de un producto se realizan inspecciones o pruebas de muestreo para verificar que las características del mismo sean óptimas. El gran y único inconveniente de este control, es el gasto que conlleva el control de cada producto fabricado, ya sea en recursos o en tiempos, ya que se eliminan los defectuosos, sin posibilidad de reutilizarlo.

A continuación se describen algunos trabajos relacionados al control de calidad que posteriormente servirán de análisis para la selección de un diseño adecuado.

- **Gallo. V & Saá. F. “Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L”. Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga**

Este documento presenta el diseño y la implementación de una celda de manufactura como se muestra en la figura 1, que consta con varios elementos electromecánicos, eléctricos y de un sistema de visión artificial que permite realizar el control de calidad de piezas tratada por un centro de mecanizado y de esta manera determinando los parámetros de diseño en cuanto a la forma y al tamaño.



**Figura 1 Celda de manufactura configuración anillo**

**Fuente:** (Gallo. V & Saá. F)

Este proyecto cuenta principalmente con un brazo robótico KUKA KR16, bandas transportadoras planas, mini centro de mecanizado ExpertMill VMC-600 y un sistema embebido de visión NI EVS-1464RT como se muestra en la figura 2. Su funcionalidad cuenta con estación de distribución el cual expulsa la materia prima hacia una banda transportadora. Una estación de mecanizado en donde se encarga de mecanizar una pieza una vez que el brazo robótico colocó la materia prima en el tornillo de máquina. La estación de control de calidad, el cual captura la imagen superior y lateral, cuyas imágenes son procesadas en donde se determina la forma y la dimensión de la pieza y que esta cumpla las características requeridas. La estación de transporte, cuya función es de transportar materia prima y el producto mecanizado por las distintas bandas y finalmente una estación encargada de clasificar y almacenar la piezas mecanizadas, dependiendo de los resultados del control de calidad.



**Figura 2 Celda de manufactura implementada**

**Fuente:** (Gallo. V & Saá. F)

Al final de este proyecto se logró un resultado satisfactorio ya que se alcanzó un alto grado de automatización en donde todas sus estaciones realizaron las tareas predichas y tomando en cuenta que el control de calidad obtuvo unos resultados positivos en cuanto a la tolerancia de  $\pm 0.4\text{mm}$  obteniendo una eficiencia del 93%.

- **Quezada. A “Diseño y Construcción de un prototipo de sistema de visión artificial para la clasificación y control de calidad de la chapa de madera” Escuela Politécnica Nacional, Quito.**

El objetivo principal del proyecto es la identificación del color y posibles defectos en las diferentes chapas de madera comerciales en Ecuador y mediante el software Labview procesar imágenes de las chapas y asignar una categoría B o C verificando el tipo de venta de la misma.

El proyecto cuenta con una estructura de las dimensiones adecuadas para introducir las chapas de madera, un sistema de iluminación idóneo y cámara para la adquisición de la imagen y de un software para procesar dichas imágenes, véase figura 3.



a)



b)

**Figura 3 a) Estación de trabajo, b) HMI procesamiento de imágenes**

**Fuente:** (Quezada. A)

Al concluir el proyecto se determinó que el sistema desarrollado es apto para poder detectar posibles defectos en los distintos tipos de chapas de madera, presentado un error del 13% solo en la especie de Rose con Sapelly debido a problemas con la tonalidad. El control de calidad de las demás especies de chapas y sus defectos en general obtuvo un error del 5%.

Por lo tanto se pudo detectar, segmentar y reconocer los defectos y fallas de la chapa de madera, como son manchas, polillas, rotos y chapas sin defecto alguno para clasificarlas de acuerdo a la normativa INEN ecuatoriana vigente.

La gran mayoría de trabajos y proyectos, en nuestro medio, relacionados al control de calidad de un producto o elemento se encuentra basado en el procesamiento de imágenes, es decir, visión artificial, por lo cual un nuevo enfoque de obtener un control de calidad mediante mecanismos y herramientas distintas, tales como sondas de medición hace que sea factible la elaboración de una estación de control calidad obtenido por medios distintos a los convencionales de procesamiento de imágenes, los cuales contienen grandes desventajas en cuanto a la intensidad luminosa, contraste o defectos en la adquisición de la imagen.

## **1.2 Celdas de Manufactura en el País**

Un FMS es un sistema integrado por máquinas-herramientas enlazadas mediante un sistema de manejo de materiales automatizado, operados automáticamente con tecnología convencional o al menos por una CNC (control Numérico Computarizado). (Acuña, 2012).

El concepto de FMS es relativamente reciente, la utilización de métodos, herramientas, materiales, automatización de las operaciones, proporciona una gran disminución en los tiempos de producción, donde la flexibilidad permite que se pueda reaccionar muy fácilmente ante cambios a las especificaciones o características de un producto ya sea en su forma, material o condiciones de mecanizado.

En la actualidad el control de calidad es primordial en la carrera competitiva para la obtención de clientes en la oferta de productos elaborados con alto

estándar de prestaciones. “De manera somera calidad significa calidad del producto. Más específico, calidad es calidad del trabajo, calidad del servicio, calidad de la información, calidad de proceso, calidad de la gente, calidad del sistema, calidad de la compañía, calidad de objetivos, etc.” (Ishikawa, 2007) .

En resumen, podemos decir que calidad es: Cumplir con los requerimientos que necesita el cliente con un mínimo de errores y defectos.

A continuación se describen algunos trabajos relacionados a celdas de manufactura que posteriormente servirán de análisis para la selección de un diseño adecuado.

- **Proaño. M “Diseño de celdas de manufactura y propuesta de balanceo de línea en la empresa Trapitos”. Universidad del Azuay. Cuenca.**

En trabajo pretendió implementar una celda de manufactura en la elaboración de T-shirt clásica y Polos en la Compañía Trapitos, adicionalmente se realizó modelos de balanceo y disposición de máquinas partiendo de un análisis de los procesos implementados previamente por la Empresa.

Para el diseño de las distintas celdas de manufactura se tomó en cuenta el tiempo de elaboración de cada tipo de prenda de vestir, repartición de los tiempos de corte, la distribución de las maquinarias y la cantidad de personal necesario para llevar a cabo cada operación.

Al finalizar la investigación se obtuvo varios modelos de distribución y ordenamiento de las maquinarias así como las mejores opciones para la fabricación de las prendas de vestir.

- **Acosta. N & Caizalitin. E. “Diseño e implementación de una celda de manufactura robotizada, para la réplica de piezas 3D, mediante frezado en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L” Universidad de las Fuerzas Armadas. Latacunga.**

El objetivo principal del proyecto es el diseño e implementación de una celda de manufactura robotizada para la réplica de piezas 3D mediante

frezado con la utilización de un cabezal fresador, brazo robótico KUKA KR16, un sistema de sujeción para materiales, escáner 3D, Software CAD solidwork, software CAM Mastercam X7, variador de frecuencia jager y una mesa de trabajo como lo muestra la figura 4.

Algunas de las dificultades obtenidas fueron la precisión de la pieza escaneada, para lo cual si se desea una mejor precisión sería necesario obtener un escáner 3D apropiado, de la misma manera se debió tener un mayor cuidado en la iluminación del área de trabajo ya que es idóneo colocar la pieza fijamente mientras el escáner se mueve a su alrededor, así como la preferencia de que sea color claro y un fondo oscuro para obtener mejores resultados de escaneo.

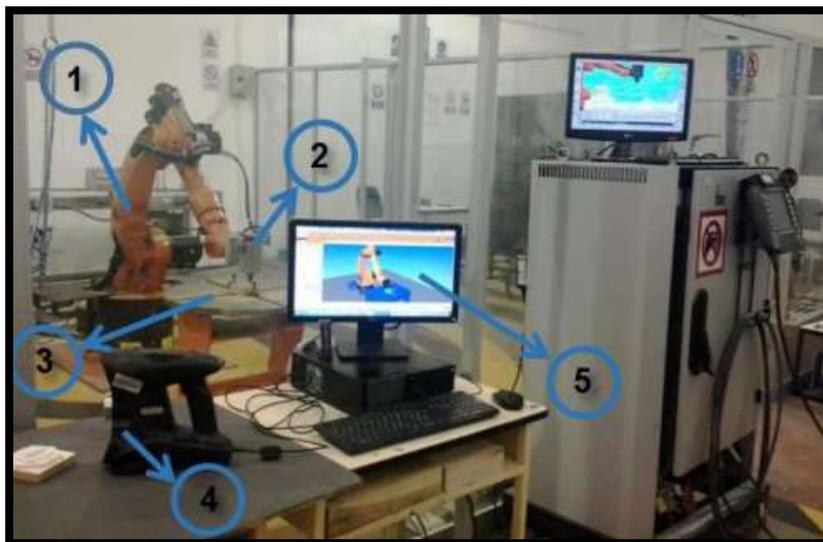
Para el correcto proceso de fresado en la celda de manufactura se debe conseguir una excelente fijación de las piezas en la mesa de trabajo, debido a que la sujeción depende del tamaño y la forma del material, en el cual las herramientas de sujeción utilizadas fueron tuercas en T, pernos, bridas escalonadas junto a las calzas escalonadas, estos accesorios están diseñados para obtener un óptimo soporte de carga.

Las dimensiones de la mesa de trabajo fueron establecidas de acuerdo al alcance del robot respecto a una base, de materia de acero estructural ASTM A36 de forma redonda que les permitió referenciar una posición de manera fácil y además puede evitar algún tipo de choque debido a movimiento de torsión complejos del manipulador con respecto a una mesa rectangular.

Este tipo de mesa de trabajo ofrece ventajas tales como: adecuada sujeción del material y evita que se produzca vibraciones durante el trabajo de mecanizado con el robot, ya que la mesa de trabajo cuenta con un peso de 95kg.

Se concluyó que el proyecto puede realizar la réplica de piezas con un error del 1.02% con respecto a la pieza original y se obtuvo una precisión de que varía entre los  $\pm 0.05\text{mm}$  con una profundidad de 0.6mm. La principal ventaja del mecanizado con brazo robótico industrial, es el de realizar diferentes

procesos de mecanizado dentro de una misma celda, sobre diferentes mesas de trabajo, a través de la configuración de las bases correspondientes



**Figura 4 Celda de manufactura robotizada. Brazo Robótico Industrial KUKA KR16 (1). Cabezal frezador Jager (2). Mesa de trabajo (3). Escáner 3D (4). PC (5)**

**Fuente:** (Acosta. N & Caizalítín. E.)

- Almeida .N “Diseño e implementación de una celda de manufactura para el sistema robótico CRS A255 del laboratorio de robótica de la Escuela Politécnica del Ejército”. Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí.

El proyecto trata del Diseño e Implementación de una Celda de Manufactura para el Sistema Robótico CRS A255, cuya arquitectura propuesta está destinada a simular un proceso de producción industrial llevado a cabo en varias etapas en diferentes estaciones. Para la integración de todos los elementos de la celda de manufactura fue necesario un controlador central, por lo que se ha utilizado un PLC y se ha construido un módulo de comunicaciones para el Controlador C500 del robot con la finalidad de interactuar con señales externas que intervienen a lo largo del proceso utilizando el puerto de entradas y salidas de propósito general GPIO, como muestra la figura 5.

El trabajo principal a realizarse dentro de la celda es la simulación del procesamiento de materia prima para lo cual se cuenta con las siguientes

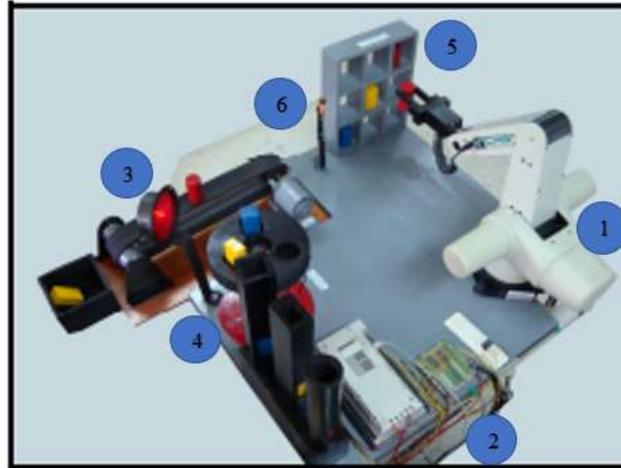
estaciones: Distribución, Proceso, Control de Calidad, Almacenamiento y Desecho, de tal manera que se cumplan los principios básicos del concepto de celda de manufactura que son: Flexibilidad, Reconfigurabilidad y Tolerancia a Fallas.

El proceso tiene como elemento manipulador a un brazo robótico que interactúa en todas las estaciones y que procesa datos por medio de su controlador, todo el proceso debe ser asistido por un PLC que se encarga de intercambiar señales con el sistema robótico para poder llevar a cabo el proceso de manufactura con eficiencia.

Con los recursos que tiene la celda de manufactura se pueden realizar variantes al proceso logrando obtener varias aplicaciones con un mismo equipo, ejecutando y proponiendo prácticas para que sean desarrolladas por los usuarios de la celda.

Para poder desarrollar la estación de control de calidad se utilizó un sensor inductivo y dos alarmas, una sonora y otra visual, por lo cual esta etapa trabaja con una sola pieza a la vez, dicho sensor se ubicó perpendicular al plano de trabajo en donde el brazo robótico coloca una pieza sobre el sensor simulando el proceso de control calidad, indistintamente algunas piezas contiene en su parte inferior placas de metal que permite realizar el proceso, haciendo que se distribuya las piezas de acuerdo al procesamiento de cada una de los elementos y ubicarlos en su correspondiente lugar.

Se concluyó con el logro de poder implementar un proceso en la celda que alcanza tres niveles de automatización, siendo el primer nivel alcanzado el de Entradas y Salidas donde se encuentran los sensores y actuadores (motores y alarmas), el segundo nivel es el de Campo y Procesamiento donde se encuentra el PLC y el Módulo de E/S GPIO y finalmente el tercer nivel de Control donde se tienen las PCs que manejan los softwares de programación y el Controlador C500 que maneja al brazo robótico.



**Figura 5 Partes constitutivas de la celda de manufactura, Robot CRS A255 (1). Módulo de I/O del puerto GPIO (2). Estación de transporte (Banda transportadora) (3), Mesa Centrífuga y distribución de piezas (4). Matriz de almacenamiento (5). Estación de AS/RS**

**Fuente:** (Almeida .N)

### 1.2.1 Componentes

Los componentes de un FMS (Sistema Flexible de Manufactura) para mecanizado son los siguientes: Estaciones de trabajo, Manipulación, Transporte, almacenamiento, Control de Calidad, Sistema Computarizado y RRHH.

#### A. Estaciones de trabajo

Las estaciones de trabajo de un sistema de Manufactura Flexible de acuerdo a Jaramillo (2011, p 29) se pueden agrupar en:

- a) Estaciones de carga y descarga
- b) Estaciones de maquinado
- c) Estaciones de procesamiento adicionales
- d) Ensamble
- e) Otras estaciones de servicio.

#### a) Estaciones de carga y descarga

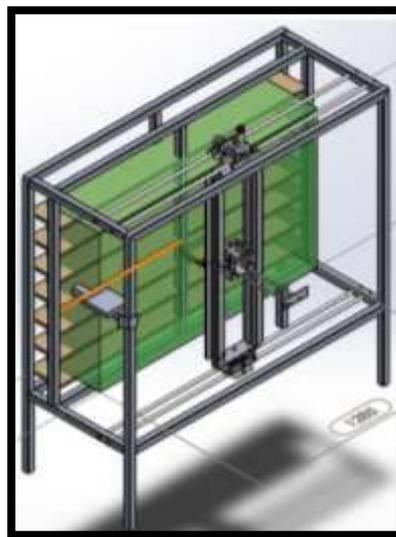
La estación de carga y descarga es el nexo de unión entre el FMS (Sistema flexible de Manufactura) y el resto de la fábrica.

Por medio de esta estación de trabajo la materia prima entra en el proceso y sale transformada en un producto elaborado, el método de carga más habitual es el manual aunque también puede ser automático.

Si el material es de elevado peso hay sistemas auxiliares para los operarios, como grúas mecánicas y otros tipos de dispositivos, adicionalmente la estación suele incluir una unidad de registro de entrada de piezas y comunicación monitorizada entre el sistema informático y el operador.

Las instrucciones deben ser dadas al operador, teniendo en cuenta qué productos deben ser cargados en los pallets con el fin de cumplir las demandas específicas.

Por lo general se encuentra compuesta por actuadores que son los encargados de trasladar los productos procesados hacia su lugar de almacenamiento, donde se los ubica de acuerdo a su identificación, forma geométrica, entre otros. Mediante el uso de AS/RS véase figura 6, constituye una excelente manera para poder reducir costos de mano de obra, energía y otros costos de operación, para aumentar los niveles de servicio a los clientes.



**Figura 6 Sistema Automatizado de AS/RS**

Fuente: (Capilla. C. N & Pulliquinga. J)

### **b) Estaciones de maquinado**

Las estaciones de maquinado son las aplicaciones más común de un FMS.

Una operación de mecanizado es toda acción que se realiza sobre un material y éste sufre transformaciones, por lo que las maquinarias más utilizadas en esta estación son los Centros de Mecanizado CNC, éstos pueden almacenar las herramientas para sus operaciones de maquinado, todas estas acciones se realizan de forma automática.

Los Centros de Mecanizado normalmente se utilizan con piezas de tipo prismático, en cambio para piezas rotativas, si lo necesitan, se usan los Centros de Torneado CNC, los cuales disponen de herramientas motorizadas por lo que puede realizar tanto tareas de torneado como operaciones con herramienta rotativa (fresado, taladrado, etc.).

### **c) Otras estaciones y equipo**

Otras estaciones y equipos tales como de inspección pueden incorporarse a un sistema flexible de manufactura, así como una estación de control de calidad. Estas estaciones de inspección pueden ser Máquinas de Medición por Coordenadas (MMC), Máquinas de Visión Artificial, estación de medición de parámetros específicos al proceso (pH, dureza, rendimiento, funcionalidad, entre otros).

También pueden incluirse estaciones adicionales complementarios a un FMS que contribuyen en forma secundaria para limpiar partes o pallets, estaciones de enfriamiento, de remoción de rebabas, etc.

Una estación de control de calidad, es la encargada de inspeccionar el correcto maquinado de una pieza indistinta de acuerdo a determinadas características dimensionales o especificaciones para poder comprobar, confirmar y satisfacer las necesidades del cliente.

### **B. Manipulación de materiales (Transfers)**

Es un sistema que permite realizar varias funciones, donde la actividad principal es de mover piezas mecanizadas de un lugar a otro (Véase figura 7), con altas prestaciones tanto en el reconocimiento y traslación de partes o piezas procesadas.



**Figura 7 Transferencia de piezas por parte de un brazo robótico**

### **C. Transporte (Conveyors)**

El sistema de transporte es el encargado de llevar piezas o partes de una estación de trabajo a otra por medio de bandas, rodillos, AGVs (Vehículo guiado automáticamente), entre otros, siendo útiles en aplicaciones que implican el transporte de materiales pesados o voluminosos, permitiendo una transferencia rápida y eficiente para una amplia variedad de materiales o piezas.



**Figura 8 Transportador de rodillos para el transporte de cartón en la industria del vestido**

### **D. Control computarizado**

Es un sistema informático distribuido al cual se encuentra conectado las distintas estaciones de trabajo (Manipulación, Transporte, almacenamiento, y demás componentes) como lo muestra la figura 8, por lo cual se utiliza

principalmente para coordinar las actividades de las estaciones de procesamiento y manejo de materiales.



**Figura 9 Sistema de Control por Computador**

Algunas de las actividades del control computarizado son: Control de la estación de trabajo, Distribución de las instrucciones, Control de Producción, Control de Tráfico, Control de Lanzadera, Monitorización de piezas, Control de Herramientas, Control de Vida de las Herramientas, Informes y Control de Rendimiento, Diagnósticos.

### **E. Recurso humano**

Es el conjunto de profesionales, los cuales son especializados en manufactura computarizada que se encargan de monitorear, programar y administrar los sistemas.

Las actividades típicas desarrolladas son:

- Carga de materias primas al sistema.
- Descarga de piezas terminadas.
- Cambio y ajuste de herramientas.
- Mantenimiento y reparación de maquinaria y herramientas.
- Programar los sistemas de maquinado y computadoras.
- Administrar el sistema en general.

### **1.2.2 Clasificación de los FMS**

Los sistemas flexibles de manufactura se los pueden clasificar esencialmente de dos maneras: Por el Número de Máquinas (Celda de una

única máquina SMC, Celda de Fabricación Flexible FMC y Sistema de Fabricación Flexible FMS) y por su Nivel de Flexibilidad (FMS Dedicados o Sistemas de Fabricación Especial, y FMS de Orden Aleatorio).

En esta clasificación no indica una línea de división clara entre el sistema flexible de manufactura FMS y una celda de manufactura, por lo que puede conllevar algún tipo de confusión entre estas categorizaciones.

Como lo señala Jiménez (2010, p 38) "La celda se utiliza para referirse a un grupo de máquinas (agrupamiento) que consiste en máquinas accionadas manual o automáticamente o una combinación de las dos. La celda puede o no incluir manejo automatizado de materiales o máquinas controladas por computadora. Por lo general, el término "sistema flexible de manufactura" se refiere a uno automatizado que consiste en estaciones automatizadas de trabajo, manejo de materiales, equipo automatizado controlado por computadora. El término "celda de manufactura" se utiliza ampliamente para designar un grupo de tres o cuatro máquinas que constituyen un sistema de manufactura".

De acuerdo a la descripción anterior se puede decir que el proyecto se trata de una sistema de manufactura flexible, ya que consiste de cuatro estaciones de procesamiento (Centros de maquinado), de un sistema de manejo de piezas, la cual se conecta con una estación de carga y descarga de material y una estación de control de calidad de las piezas procesadas, todas estas conectadas mecánicamente por un mismo sistema de manejo y de forma electromecánicamente por un sistema computacional íntegramente distribuido.

Otra forma de poder clasificar un FMS (Sistema flexible de manufactura) es por medio de su flexibilidad, por lo tanto el poder contar con una amplia familia de partes, tales como son diferentes centros de mecanizado, estación de control de calidad, estación de almacenamiento y recuperación AS/RS, se consiguiera introducir nuevos y distintos modelos de diseños insertados al sistema y posibles cambios ingenieriles en las piezas, lo cual no nos limitará a figuras estándares y rígidos a lo largo de un proceso de manufactura, sino

que permitiría tener una variedad de posibilidades de maquinado inherentes a la capacidad del o los operadores.

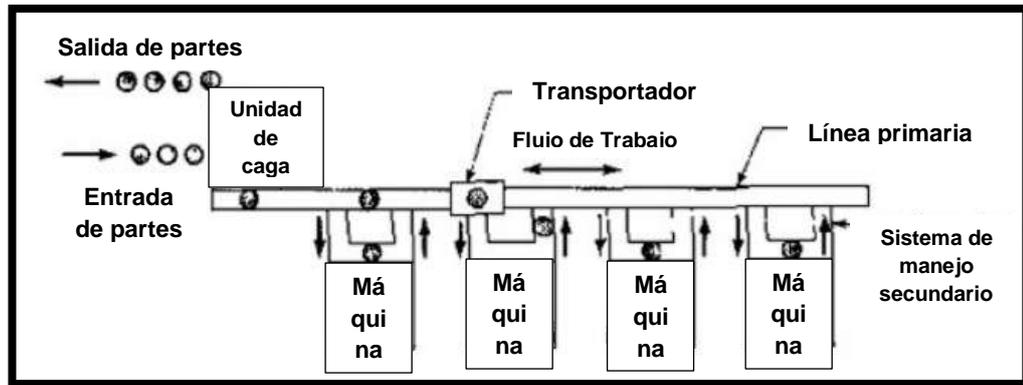
### **1.2.3 Configuración de Layouts**

La mayoría de las configuraciones de un FMS de acuerdo a Velásquez (2012a, p 40) se pueden agrupar en:

- a) Layout de tipo en línea
- b) Layout de lazo
- c) Layout de escalera
- d) Layout de campo abierto, y
- e) Celda centrada en un robot

En el caso de este trabajo se hace referencia al Layout de tipo en línea como afirma Velásquez (2012b, p 41) “Las máquinas y el sistema de manejo de materiales están arreglados en una línea recta. Las partes se mueven de una estación de trabajo a la otra en una secuencia bien definida, con trabajo siempre moviéndose en una dirección con o sin flujo de regreso”, véase figura 10.

Este tipo de layout permite una mejor movilidad y distribución para un manipulador robótico en el área de trabajo disponible en el laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, permitiendo un aprovechamiento total de acuerdo al dimensionamiento de las distintas estaciones de trabajo. Acorde al proyecto de Gallo. V & Saá. F. “Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L”. Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, la distribución anillo de la celda de manufactura dificulta en parte la movilidad del manipulador robótico debido a restricciones de espacio y dimensiones del brazo, por lo que una distribución en línea hace que sea idónea para el presente proyecto.



**Figura 10 Layout en línea**

### 1.3 Sondas de medición

#### 1.3.1 Introducción

El término sonda puede referirse a diferentes clases de instrumentos y herramientas, donde estos dispositivos se vinculan al verbo sondar: realizar una investigación o un rastreo de algo. (Scarpenti, 2012, p 38)

Generalmente, la inspección se asocia a las sondas de contacto (véase figura 11) para la medición dimensional (metrología) en máquinas de medición de coordenadas (MMC).



**Figura 11 Sonda por contacto**

La primera la sonda de contacto se empleó originalmente para la resolución de complejos problemas dimensionales de control de calidad en las turbinas Rolls Royce Olympus utilizadas en el Concorde. (Renishaw, 2013)

Una sonda es un complejo dispositivo diseñado para activarse al hacer contacto con una superficie y enviar una señal eléctrica ya sea esta en voltaje o corriente, proporcionando datos geométricos precisos y repetibles una vez

siendo procesada dicha señal, donde estos datos son significativos durante el proceso de fabricación ya que se garantiza que los componentes se encuentren dentro de los límites de tolerancia.

Una sonda de contacto se usa típicamente con fresadoras para encontrar referencias precisas o para medir objetos.

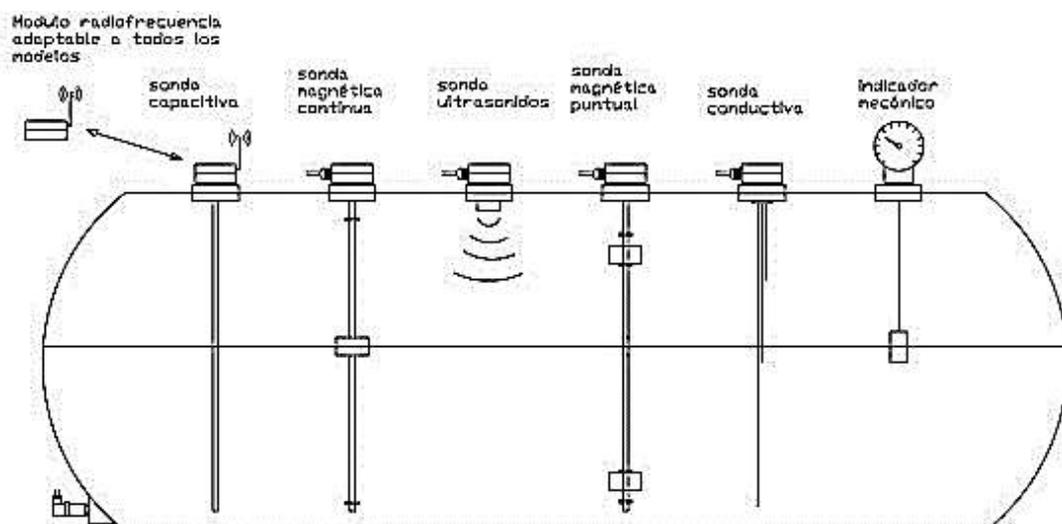
Se utilizan para encontrar las ubicaciones de los orificios y el tamaño de los planos de referencia, también se utiliza para escanear un objeto, medir punto por punto la superficie y obtener la construcción de un archivo de datos que se puede importar en un programa de diseño CAD para continuar con el modelado 3D.

### 1.3.2 Tipos de sondas

Depende del proceso y el uso que se va a dar con la sonda para poder elegir el tipo de instrumento adecuado.

Según el tipo de medición, se puede encontrar sondas que ofrecen solo información todo/nada, mientras que por la tecnología de fabricación se puede encontrar sondas por ultrasonidos, magnéticas, capacitivas y conductivas como indica la figura 12, cada una de ellas con distintas características que las convierten en más indicadas según la necesidad de los procesos.

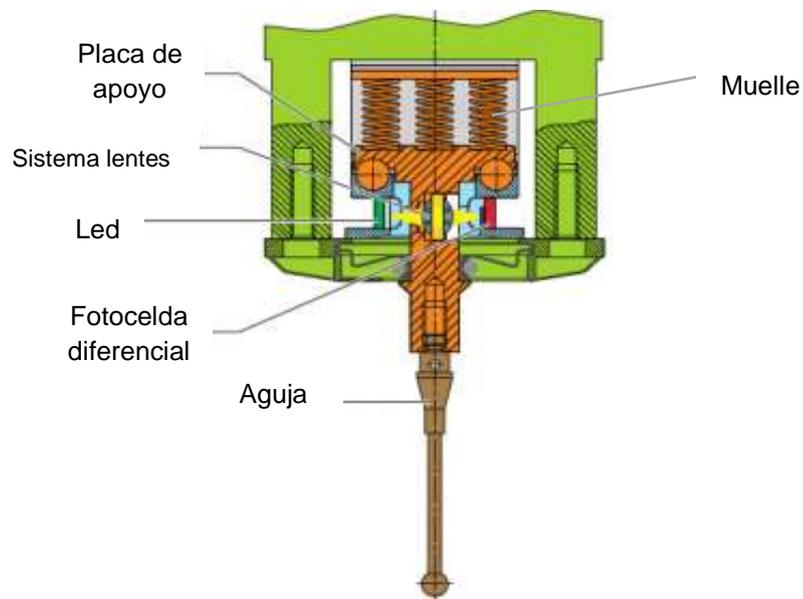
Por su señal, pueden mostrar los datos mediante bucle de corriente, generalmente 4-20 mA o por variaciones en la tensión de 0-5 V.



**Figura 12 Tipos de sondas**

### 1.3.3 Componentes

La inspección hace necesarios los reajustes, los altos costos de utillajes y de correcciones, los cuales se puede disminuirlos mediante la utilización de sondas que se instalan en la línea de manufactura, dicho dispositivo de medición consta con los siguientes componentes:



**Figura 13 Componentes de una sonda**

Una sonda incorpora un sistema de montaje cinemático de muelles, con rodamientos y bolas que colocan el soporte del palpador en su posición proporcionando una repetibilidad excelente.

Un circuito eléctrico proporciona la variación de resistencia, a medida que aumenta la fuerza en el palpador, también aumenta la resistencia, hasta alcanzar el punto específico en el que se genera la señal de disparo.



**Figura 14 Componentes de una sonda (Muelle)**

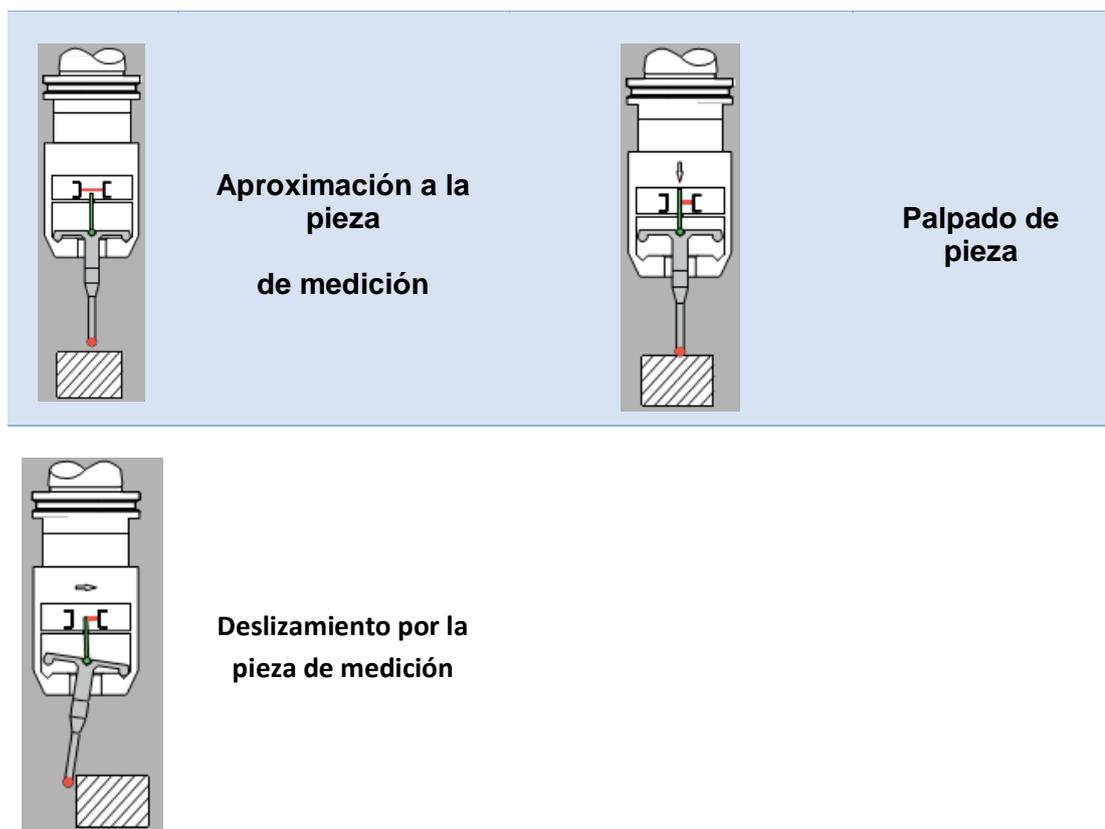
### 1.3.4 Controlador

El posicionamiento de la sonda en relación con la pieza se realiza en forma manual o bajo el control de una computadora, donde los métodos para operar una estación de control se clasifican como: 1) control manual, 2) manual asistido por computadora, 3) motorizado asistido por computadora y 4) control directo por computadora. (Groover, 2007 p 178).

De la clasificación anterior para la realización de un control de calidad óptimo y que cumpla con las características de medición y verificar las tolerancias requeridas por el usuario y las piezas mecanizadas, en la tabla 1 se muestra como la sonda todavía flota libremente para permitir que el operador la ponga en contacto y después un desplazamiento sobre la superficie de la piezas.

**Tabla 1**  
**Posicionamiento del palpador**

#### MOVIMIENTOS DE LA SONDA



## **CAPÍTULO II**

# **DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES PARA LA CELDA DE MANUFACTURA CON CONTROL DE CALIDAD**

### **2.1 Introducción**

En la actualidad se puede encontrar en el mercado vario prototipos destinados al control de calidad especializados dentro de los procesos de manufactura, por tanto se iniciará un prototipo que incorpore un sistema automático de posicionamiento, el mismo que permitirá el desplazamiento de una sonda de medición que tomará mediciones de una pieza maquinado, datos que se los procesará en una interfaz HMI diseñado para este fin.

### **2.2 Diseño por calidad**

La estación de control de calidad dentro de la celda de manufactura se desarrolla mediante la utilización de una sonda de palpación con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento de los centros de mecanizado y saber en qué punto de la pieza existe un error y disminuir el desperdicio de material.

La estación se diseñará e implementará la parte mecánica, eléctrica, además se utilizará un software que se encargara de interpretar los movimientos de esta y también la medición de piezas mecanizas.

#### **2.2.1 Casa de la calidad**

Según (Vásquez López, 2005), la casa de la calidad o despliegue de la función de la calidad es una representación gráfica, que permite identificar y transmitir los atributos o requisitos del diseño de calidad que el cliente demanda, al mismo tiempo que transforma y asegura que la voz del cliente sea transmitida en requerimientos técnicos de diseño para asegurar que las necesidades del cliente sean satisfechas.

### 2.2.2 Requisitos del cliente

Los requerimientos o la voz del cliente es el primer paso y considerado el más importante para el diseño el momento de realizar el despliegue de la función de la calidad, los requerimientos que se detallan a continuación son en base al desarrollo de prácticas de sistemas flexibles de manufactura dentro de la celda de manufactura con control de calidad, y verificar la funcionalidad del sistema:

- La exactitud sea menor a 0.5 mm.
- La operación de la estación sea de fácil utilización. .
- La medición de las piezas sea la correcta y ayude a identificar errores.
- La estación de control sea independiente de la celda de manufactura.
- Permita integrar procesos en línea.
- Sea de un costo bajo.
- Fácil mantenimiento.
- Posea una interfaz amigable y entendible con el operador.
- No exista riesgos con el operador.

### 2.2.3 Requisitos técnicos

Luego que se obtienen y se analizan los requerimientos y necesidades del cliente, estos son traducirlos en requerimientos técnicos que a continuación son detallados:

- Robustez de la estación.
- Dimensiones de las piezas.
- Montaje y desmontaje de piezas.
- Tiempo de medición.
- Dimensión.
- Control de calidad.
- Reconocimiento de errores.
- Software
- Fiabilidad de la sonda de medición.
- Montaje y desmontaje de la sonda.

#### 2.2.4 Conclusión de la casa de la calidad

Una vez que se encuentren analizados los requerimientos técnicos, a continuación se detalla las principales características y componentes que deberá tener la estación de control.

- Robustez de la estación: La estación de control debe tener la capacidad de realizar la medición de las piezas considerando que se encuentra en una línea de manufactura y observar los cambios que exista de temperatura sobre las piezas mecanizadas.
- Dimensiones de las piezas: La dimensión de las piezas deben estar dentro de los límites de medición de la sonda de palpación.
- Montaje y desmontaje de piezas: La sujeción de la pieza debe de ser lo más firme posible y cuando la estación entre en funcionamiento no se altere en la medición.
- Tiempo de medición: El tiempo tiene que estar dentro de los parámetros de funcionamiento de una estación que se encuentra en línea y no detener otras operaciones en la celda de manufactura.
- Dimensiones: La dimensión de la maquina depende del alcance que posee el manipulador para colocar las piezas en la estación.
- Control de calidad: El control tiene que ser cumpliendo los requerimientos del operador basándose en normas internacionales ISO de medición.
- Reconocimiento de errores: La estación tiene la capacidad de detecta en qué punto se encuentra presente un error de mecanizado.
- Software: La utilización de software de acceso libre y sin el uso de licencias.
- Fiabilidad de la sonda de medición: La sonda de medición debe poseer una sensibilidad bien alta y requerir de una fuerza mínima para su activación.
- Montaje y desmontaje de la sonda: La sujeción de la sonda se tiene que realizar mediante la utilización de un soporte que acople la estructura de la misma.

Los aspectos y características descritos con anterioridad se encuentran íntimamente relacionados y son muy importantes para el correcto funcionamiento de la estación de control, como indica la figura 15.

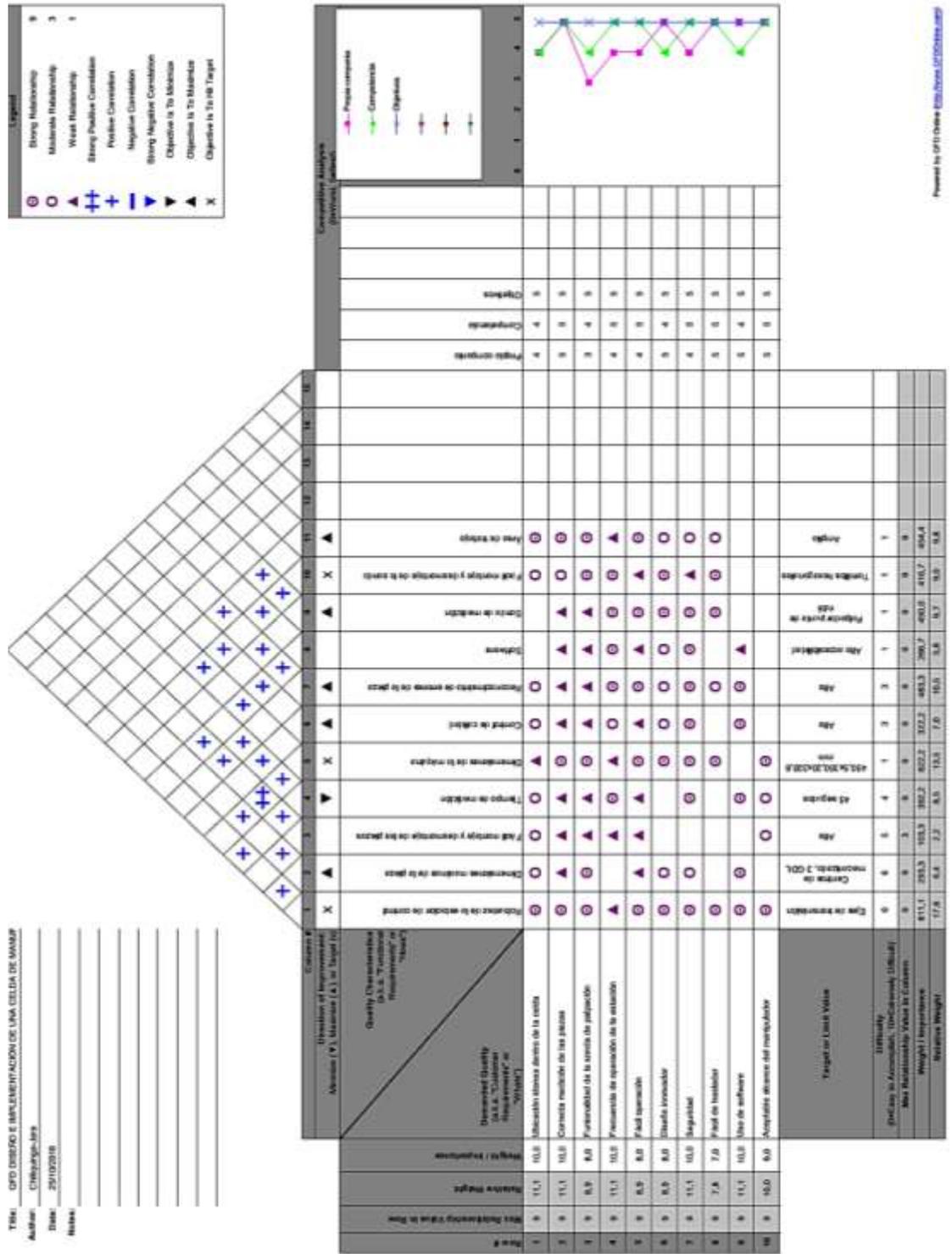


Figura 15 Casa de la Calidad

### 2.3 Factores y requerimientos para el diseño de la estación de control de calidad

Para el diseño de una estación de control de calidad hay que considerar los siguientes factores y requerimientos:

- Disposición para la ubicación idónea de la estación de control de calidad dentro de la celda de manufactura.
- Determinación de los elementos activos y pasivos para la estación de control de calidad, de la celda de manufactura.
- **Elementos activos:** Sonda de palpado, unidad de control.
- **Elementos pasivos:** Almacenamiento y recuperación de piezas.
- Las dimensiones máximas de la pieza a medir debe ser de 140 mm de largo, 120 mm de ancho y 50 mm de altura, siendo este un factor que depende principalmente del área de trabajo de la mesa de posicionamiento que se seleccionará posteriormente.
- La frecuencia de operación de la estación de control de calidad para realizar la medición de las piezas mecanizadas, dependiendo de la forma de la pieza y el tiempo que lleve realizar su medición.
- Tener las precauciones y seguridades respectivas para la estación de control de calidad.
- No se deberá permitir a un operador interrumpa una tarea programada de control, por lo que puede comprometer la integridad de la pieza y de la estación.
- Exactitud: se espera inicialmente una exactitud de al menos 0,5 mm, esto se define por el tipo de transmisión de movimiento usado entre los motores y los correspondientes ejes de trabajo X, Y, Z.
- Programación amigable para poner en marcha los sistemas que controlan la estación al realizar la medición, debe ser en un lenguaje claro y ampliamente conocido, el lenguaje usado en las máquinas CNC.

### 2.4 Requerimientos para la selección de la estación de control de calidad

- Selección de los componentes para la construcción de la estación de control de calidad.

- Elementos de sencillo control y manejo para su implementación en la estación de control de calidad.
- Componentes de fácil adquisición en el cual se utilice la mayor cantidad posible de elementos que se puedan conseguir en el mercado local; sin embargo, no se descarta la obtención de piezas en el exterior.

## **2.5 Sistema de palpación**

Una de las soluciones de mediciones de piezas contemporáneas se encuentra en los sistemas de sondeo por medio de palpación, en la cual dicha acción trata de examinar un cuerpo por medio del tacto y precisión.

Dentro de las especificaciones con las que debe contar un sistema de palpación podemos encontrar las siguientes:

- Fuerza de palpación axial 0.6 N y radial 0.2 N.
- Velocidad de palpado de 30 mm/min a 66 mm/min.
- Sentido de 5 direcciones  $\pm X$ ,  $\pm Y$ ,  $-Z$ .
- Desviación del elemento de palpación no mayor a 5 mm.
- Peso recomendable aproximado excluyendo mango y cable 128 g.
- Gama del palpador M3.
- Temperatura de trabajo 10 °C a 40 °C.
- Protección IP 67.

### **2.5.1 Selección de la sonda de medición**

Una sonda de medición se refiere a un instrumento o herramienta que se utiliza para realizar una investigación, toma de medidas o un rastreo de algo.

Se requiere para la selección de la sonda se cumpla con ciertos parámetros que se describen a continuación:

- Fácil montaje.
- Facilidad para el control.
- Bajo costo.
- Número de ejes para la medición.
- Duración de uso.

## 2.5.2 Alternativas de solución para la sonda de medición

Una sonda con palpador permite realizar mediciones geométricas en un área de trabajo especificada, actuando como un interruptor de alta precisión, que se activa cuando existe el palpado con otro objeto, se utiliza para mejorar la calidad de las piezas, la productividad y reducir el tiempo de preparación de piezas mecanizadas.

### a. Sonda motorizada

El sistema motorizado es un cabezal de sonda de medición dinámica que triplica la producción de medición manteniendo una alta precisión del sistema.

Al contrario que los métodos de medición de disparo por contacto tradicionales, que dependen de la aceleración de los 3 ejes de una máquina de medición para explorar, el sistema utiliza el movimiento del cabezal para reducir al mínimo los errores dinámicos a velocidades de medición más altas.

El cabezal incorpora la sonda de disparo por contacto, y permite una amplia selección de fuerzas de disparo, opciones de detección direccional y extensiones para adaptarse a los requisitos de la aplicación, en la figura 16 se muestra una sonda motorizada.



**Figura 16 sonda Motorizada**

#### **Características:**

- Diseño compacto lo que permite tener facilidad para el montaje en máquinas de medición.

- Para el control de la sonda motorizada es necesario complementarlo con el controlador en conjunto con el software especializado de la misma marca.
- El cabezal dispone de una servodirección de dos ejes, lo que permite la configuración en cualquier ángulo, capacidad de medir en cualquier dirección.
- El cabezal se controla directamente desde una tarjeta de interfaz electrónica.
- El cabezal está protegido por una unidad de protección de sobre recorrido interna que detiene la máquina en caso de colisión lo cual permite un alto grado de utilización que supera las 100.000 horas de trabajo.
- Elevado costo debido a la forma de posicionar la sonda sobre la pieza de medición.
- Los ejes del cabezal se bloquean para obtener mediciones precisas, capacidad de medición en 5 ejes X, Y, Z, A, B.

#### **b. Sonda de inspección**

La sonda de inspección es capaz de obtener varios cientos de puntos de la superficie por segundo, lo que permite medir su forma y tamaño, también se utilizan para obtener puntos diferenciados de forma similar a las sondas de disparo por contacto.

La sonda de inspección permite capturar datos de formas y perfiles a alta velocidad en piezas prismáticas y componentes complejos, en la figura 17 se indica este tipo de sonda.



**Figura 17 Sonda de inspección**

**Características:**

- Para el montaje se necesita un soporte para su sujeción.
- Facilidad de cambio de palpadores.
- Ciclo de calibrado de la sonda rápido y sencillo.
- Para el control de la sonda de inspección es necesario complementarlo con la adquisición del controlador en conjunto con el software especializado de la misma marca.
- Dos sensores en uno: activación por contacto y medición en continuo, proporciona un rendimiento óptimo con una amplia gama de longitudes de accesorios de palpadores de hasta 400 mm.
- Escaneo a alta velocidad, hasta 300 mm/s, medición rápida de puntos y alta respuesta de frecuencia.
- Diseño robusto, resistente a colisiones moderadas.
- Costo medio y una duración sobresaliente que supera las 50.000 horas de uso.
- Sonda que permite realizar mediciones en 3 ejes X, Y, Z.
- El sistema asegura un rendimiento dinámico debido a su baja masa, su gran rigidez estructural y la ausencia de fricciones.
- Idóneo para medición de perfiles.
- Medición rápida de puntos y alta respuesta de frecuencia.

**c. Sonda de disparo por contacto**

La sonda de disparo por contacto se utiliza para medir puntos diferenciados, es perfecta para la inspección de piezas geométricas en 3 dimensiones, en la figura 18 se muestra el tipo de sonda.



**Figura 18 Sonda de inspección**

### Características:

- Sin errores en palpaciones continuas.
- Capacidad de medición en 3 ejes X, Y, Z.
- Es adaptable a cualquier software CNC, sin la necesidad de adquirir un controlador o un software especializado para su control.
- Diseño de bajo costo, fácil adquisición y capacidad de utilización en varias aplicaciones afines.
- Proporciona una precisión y repetibilidad excelente.
- Duración >10 millones de disparos.
- La utilización de galgas de esfuerzo proporciona un sistema mejorado de medición.
- La sonda tiene la finalidad de adaptarse a las tareas de medición por su facilidad de cambio de palpadores y utilizar extensiones de hasta 100mm.

### 2.5.3 Selección de sonda de medición

Con el propósito de seleccionar la mejor opción, se utilizó el método de criterio de evaluación, donde 10 es la puntuación más alta y 1 es la más baja, en la tabla 2, se puede observar los criterios de evaluación para escoger la sonda de medición.

**Tabla 2**

#### Selección de la sonda de medición

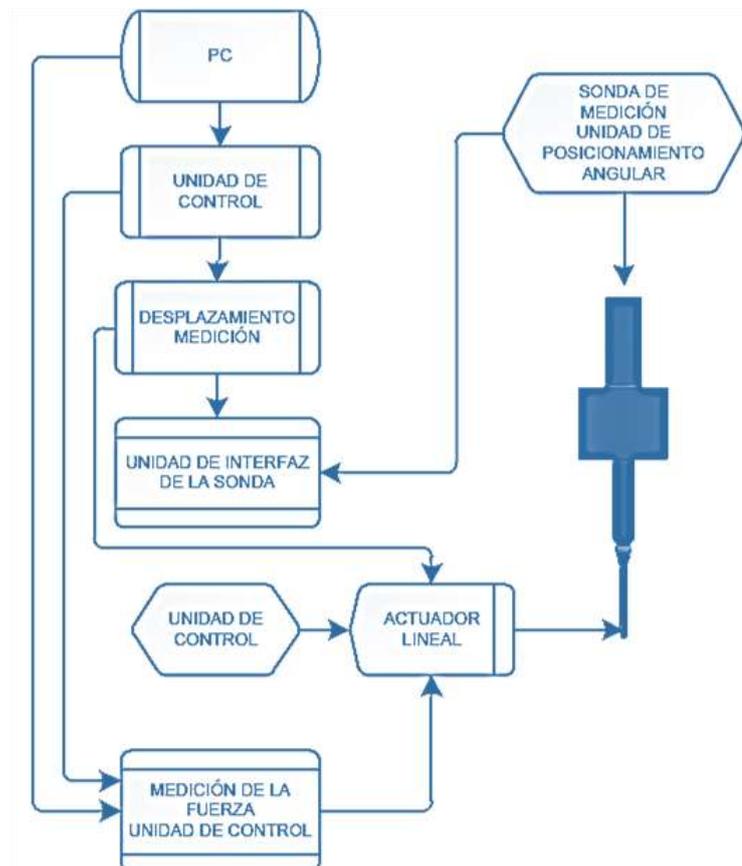
Factores	Alternativas de sondas de medición		
	Motorizada	Inspección	Contacto
Facilidad para el montaje	4	6	8
Facilidad para el control	4	6	9
Bajo costo	2	6	7
Número de ejes para la medición	10	8	4
Duración de uso	8	8	9
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>37</b>

La solución que se utilizara para realizar la medición es la sonda por contacto como se concluye en la tabla 2 de comparación, ya que tiene un costo bajo para la adquisición aunque se tenga la necesidad de importar, una

durabilidad mayor a los 10 millones de disparos, facilidad de controlarlo, capacidad para tres ejes primordiales, la utilización de un soporte para la sujeción de la sonda, con esta selección podemos realizar las tareas de medición de piezas mecanizadas.

#### 2.5.4 Esquema de conexión de la sonda de medición

Dentro de las conexiones eléctricas necesarias para el funcionamiento de la sonda, se utiliza el siguiente diagrama de flujo, el cual indica el procedimiento a seguir para su correcta instalación y configuración en la estación de control, como se muestra en la figura 19.



**Figura 19 Diagrama de flujo del funcionamiento de la sonda**

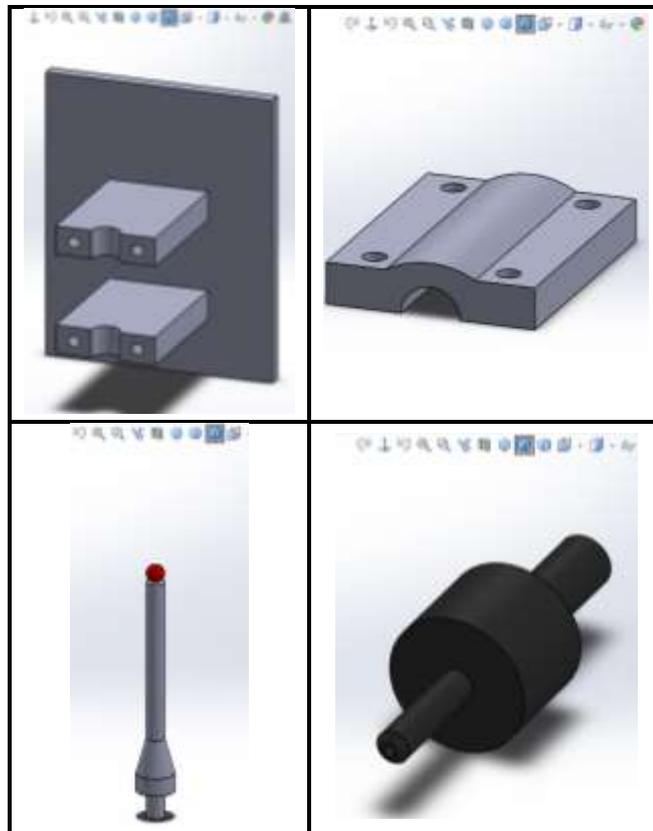
#### 2.6 Diseño del soporte para sonda de medición

A continuación se detalla el diseño de un soporte para la sujeción de una sonda de medición.

### 2.6.1 Desarrollo de piezas de sujeción

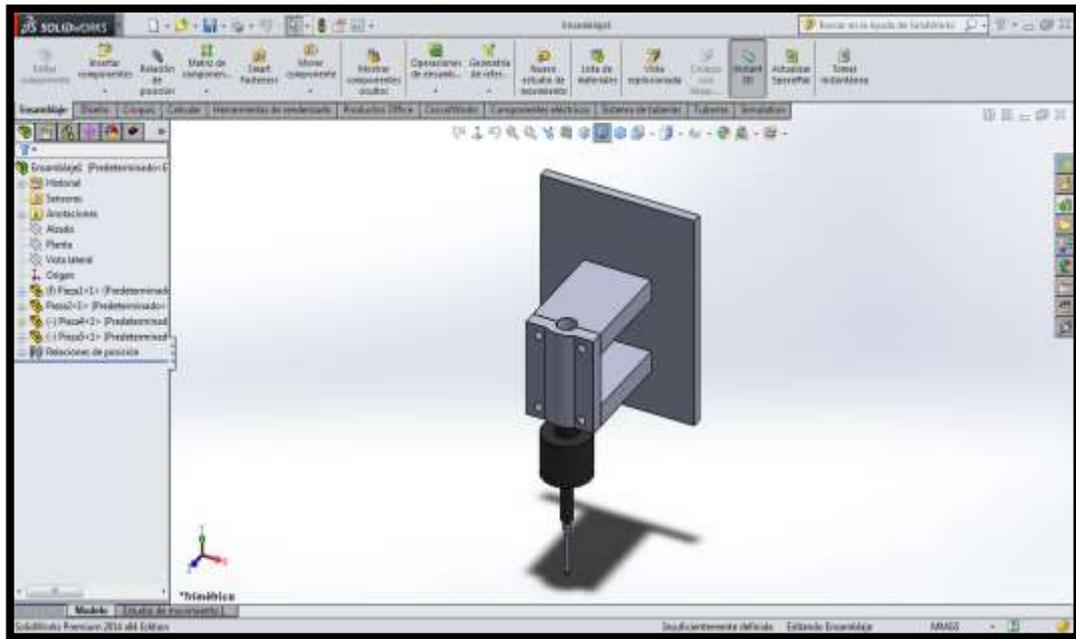
Para el diseño de la pieza de sujeción de la sonda de medición se utiliza el software SolidWorks 2014 para el modelamiento y una posterior fabricación en una impresora 3D en material ABS y tener el producto listo para su implementación en la estación de control de calidad.

Al ser la sonda de palpación un elemento de poco peso, no amerita realizar un análisis estructural ni un diseño especializado para soportar cargas altas por lo que se diseña un soporte amigable y de fácil manipulación para el usuario, elaborándose tal como se muestra en la figura 20.



**Figura 20** Diseño en Solidworks 2014 del soporte para la sonda

Este sistema de sujeción permite ser de fácil reemplazo de la sonda de una manera muy rápida y segura, asegurando que el componente de medición permanezca fijo para el control de calidad, tal como se indica en la figura 21, soporte con la base plana para la sujeción y flexibilidad de adaptación al sistema de movimiento y sujeción del instrumento de medición.



**Figura 21 Soporte de sujeción para la sonda**

Este tipo de sujeción permite que sea modular y pueden ampliarse a medida de sus necesidades, además de facilitar una diversidad de ubicación en el eje z para un óptimo establecimiento dentro del proceso de control de calidad, y de esta manera poder proporcionar una solución de fijación completa para cualquier pieza, independientemente de su tamaño, forma o material.

## 2.7 Selección del sistema de posicionamiento

Se requiere para la selección del sistema de posicionamiento cumpla con los parámetros que se establecen a continuación:

- Ser de bajo costo.
- Facilidad para la adquisición.
- Facilidad para el montaje.
- Número de ejes.
- Precisión.
- Facilidad de programación.
- Adaptación al uso de software libre o privado.

### 2.7.1 Alternativas de solución para el sistema de posicionamiento automático

Un sistema de posicionamiento automático permite ubicar la posición de un objeto y obtener información acerca de él y combinarlo con cualquier tipo de máquinas de trabajo que realiza tareas como medición, maquinado, soldadura, ensamblaje, etc.

#### a. Mesa de posicionamiento

La mesa de posicionamiento es una configuración de dos ejes montados perpendicularmente uno sobre otro, que permiten el movimiento de un carro a lo largo de un recorrido útil, siendo este formado por motores eléctricos acoplados a un sistema tornillo-tuerca, un sistema de guías para el carro y soportes para sostener el tornillo en sus extremos, tal como se muestra en la figura 22.

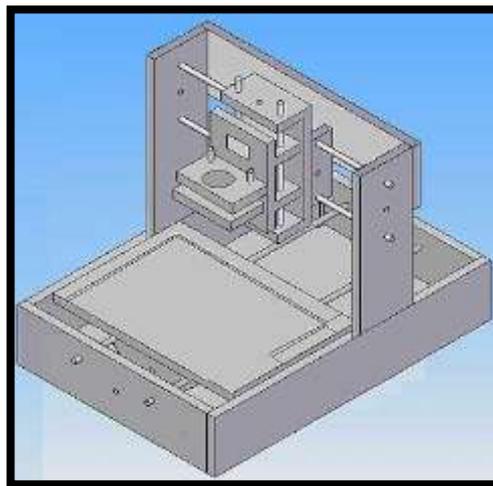


Figura 22 Mesa de posicionamiento

#### Características:

- Costo medio y de fácil adquisición, disponible en una gran variedad de modelos y aplicaciones.
- La mejor relación precio-rendimiento.
- Su reducido espacio de montaje hace que sea fácil de instalar en espacios estrechos.
- Escala de alta resolución.
- Configuraciones de escaneo punto a punto y opcionales.

- Realiza movimientos en el plano cartesiano, lo cual ayuda a posicionar la sonda de medición y la programación del sistema es sencillo.
- El sistema del eje Z permite realizar una toma de datos con la sonda con distintas extensiones y palpadores.
- Acceso transitable al área de trabajo desde todos los lados.
- Utilización de software libre para la programación de la máquina.
- Todo el conjunto está diseñada para soportar esfuerzos estáticos y dinámicos.

#### **b. Posicionamiento mediante un brazo articulado de medición**

Mediante este sistema se puede realizar una digitalización 3D de alta definición capaz de obtener una nube de puntos escaneado de un objeto real, su diseño compacto hace que se vuelva un sistema portable, versátil y fácil de transportar pudiendo adaptar el entorno de trabajo a cualquier situación, véase figura 23.



**Figura 23 Brazo articulado de medición**

#### **Características:**

- Alto costo y difícil adquisición en el mercado.
- Sistema de escaneo automático, portátil y compacto.
- La sonda se encuentra flotante lo cual proporciona una medición más precisa.
- Alcance extendido que ofrece una medición de hasta 900 mm.
- Pistola con botones completamente integrado para la activación de la sonda.

- Con una empuñadura estándar de la pistola que permite una operación ergonómica y cómoda.
- Alta resolución.
- Sistema de compensación automática de la temperatura.
- Facilidad para su funcionamiento ya que no requiere de una programación para realizar la medición, pero para la interpretación de los puntos requiere de un software con licencia para asegurar que una inspección completa se lleva a cabo de manera eficiente.
- Número de grados de libertad 6.
- Herramienta sencilla de usar, potente y extremadamente adaptable para captura y análisis de nubes de puntos de alta calidad.

### c. Posicionamiento mediante un sistema paralelo

Esta máquina se presenta como un robot paralelo que en el extremo final está unido a la base por más de una cadena cinemática independiente, entre sus aplicaciones están simuladores de vuelo, maquinado de piezas, transferencia de piezas a alta velocidad, medición de piezas, siendo una máquina con una velocidad de funcionamiento alto y su uso puede destinarse a medición por contacto, como se indica en la figura 24.

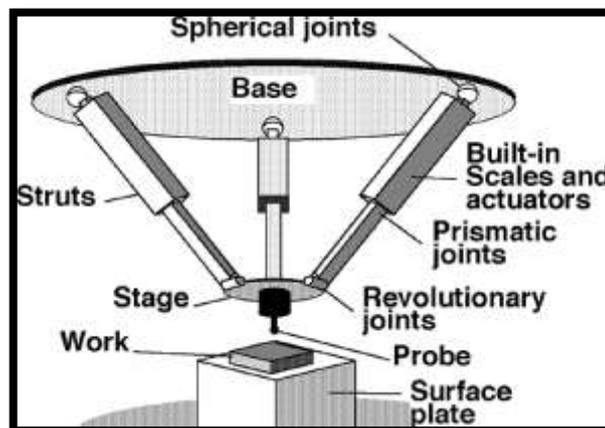


Figura 24 Máquina de medición con mecanismo paralelo

### Características

- Elevado precio debido a su alta velocidad de funcionamiento
- Diseño para el montaje para techo.
- Diseño compacto y robusto.

- Área de trabajo disponible como plantillas con orificios, ranura en U, ranura en T u otro mecanizado especial.
- Repetibilidad de 0.1 mm.
- Varios alcances para los ejes X, Y y Z.
- Los ejes se deslizan libremente con un mayor grado de facilidad de acceso de 6 ejes libres.
- La dificultad de desarrollar un programa que cumpla con las tareas y la adaptación al medio ya que se utiliza software de licencia libre.

### 2.7.2 Selección del sistema de posicionamiento

Con el propósito de seleccionar la mejor opción, se utilizó el método de criterio de la sección 2.5.3.

**Tabla 3**

#### Selección del sistema de posicionamiento

Factores	Alternativas de Sistema de posición		
	Mesa de Posición	Brazo Articulado	Sistema Paralelo
Bajo costo	8	2	6
Facilidad para la adquisición	6	1	6
Facilidad para el montaje	9	8	8
Número de ejes	8	10	9
Precisión	8	10	8
Facilidad en la programación	9	8	6
Tipo de software (libre o privado)	7	2	6
<b>Total</b>	<b>55</b>	<b>41</b>	<b>49</b>

La solución que se utilizara para realizar el sistema de posicionamiento es la mesa de posición como se concluye en la tabla de comparación 3.

Mediante este mecanismo se tiene una facilidad de ubicación dentro de una celda de manufactura, maniobrabilidad de la sonda de medición la cual se acopla a los mecanismos de movimiento sin alterar la integridad del elemento medidor, facilidad de integración con un software libre de control, de fácil programación y ofrece una excelente precisión, ventajoso para el control de calidad.

Con esta selección que es la más óptima podemos acoplar los distintos elementos para la implementación de la estación y ofrecer una adecuada forma de medir las piezas de trabajo y mejorar los productos de la celda de manufactura.

Se presentó la posibilidad de poder disponer de una mesa de posicionamiento perteneciente al laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPEL, el cual no se encontraba operativa y estaba formado por los siguientes elementos:

- Estructura de madera correspondiente a una mesa de posicionamiento.
- Sistema de transmisión (Varillas roscadas de acero de 8 mm de diámetro y 1.25 mm de paso).
- Motores paso a paso bipolar SST43D2121 tamaño NEMA 17, con ángulo de paso de 1.8° (200 pasos por vuelta) y bobinados de 1.5 A a 12 VDC, capaz de cargar con 5.5 kg/cm (0.54 N/m).
- Tarjeta controladora de motores paso a paso CNC TB6560.
- Cableado para conexiones.
- Fuente de alimentación GRELCO 1307A.

### 2.7.3 Características del sistema de posicionamiento del laboratorio de CNC de la institución

Este sistema utilizaba el software Mach 3 para el mecanismo de movimiento y control, en la tabla 4 se detalla sus características principales:

**Tabla 4**

#### **Características de la mesa de posicionamiento disponible**

Recorrido efectivo 180 (X) mm * 180 (Y) mm * 60 (Z) mm
Dimensión de la forma 625 * 510 * 410 mm
Tamaño de la mesa 520 * 320 mm
Stepping tipo de motor de dos fases (1.5 A por fase), SST43D2121 tamaño NEMA 17
Entorno de software de Windows XP / Windows 7
Velocidad de desplazamiento hasta 300 mm/min
Conexión de la computadora a bordo de un puerto paralelo
Software acceptable MACH3, EMC2 CNC

Se determinó establecer un nuevo sistema de control para la mesa de posicionamiento, utilizando únicamente la estructura de madera, el sistema de transmisión de movimiento y los tres motores paso a paso Nema 17, debido a las siguientes argumentos:

- La tarjeta controladora TB6560 ofrece solo comunicación por puerto paralelo, siendo obsoleto con la tecnología contemporánea.
- Interacción exclusiva con el software Mach 3 y EMC2 CNC.
- Baja resolución de micro pasos (1/16).
- Baja corriente máxima admisible de 3.5 A de la tarjeta TB6560.
- Dificultad de comunicación entre dispositivos electrónicos y la tarjeta TB6560.
- Difícil adquisición y reemplazo de la tarjeta controladora.
- La fuente de alimentación aporta como máximo 10 A y un voltaje de 13 VDC constantes, habiendo la necesidad de voltajes variables de 3.3 VDC, 5 VDC y 12 VDC.

Siendo estos precedentes la motivación para inclinarse a un nuevo sistema de control, cuyo diseño y selección se detallan a continuación.

## 2.8 Arquitectura global del sistema electrónico

Para la arquitectura global del sistema eléctrico existe una multitud de soluciones, sin embargo estas medidas en general deben cumplir con la estructura que se muestre en el diagrama de flujo de la figura 25.



**Figura 25 Arquitectura global del sistema eléctrico**

A continuación se procedió a seleccionar los componentes pertinentes para el funcionamiento y control de la mesa de posicionamiento que llegará a conformar la estación de control de calidad.

## **2.9 Selección del hardware de interpretación**

La interfaz electrónica es el circuito eléctrico o hardware, que se encarga de establecer la comunicación entre la computadora y el controlador de los movimientos de los motores, así como la adquisición y tratamiento de la señal de la sonda de medición.

El dispositivo responsable de interpretar adecuadamente los comandos enviados por un software CNC ejecutado en la computadora debe tener los siguientes factores:

- Bajo costo.
- Fácil reemplazo o reparación en caso de daños.
- Factible adquisición en el mercado local.
- Fácil programación.
- Compatible con cualquier software CNC.
- Alta capacidad de memoria.
- Suficientemente potente para llevar a cabo las operaciones de control de forma adecuada.

### **2.9.1 Alternativas de solución para el hardware de interpretación**

Teniendo en cuenta una revisión de tecnologías contemporáneas podemos mencionar como posibles alternativas para su implementación: Arduino Uno Rev 3, Raspberry Pi y microcontroladores PIC, donde se pretende elegir la mejor de estas opciones.

#### **a. Arduino Uno Rev3**

Arduino es una plataforma de programación abierta o libre, idónea para la creación de prototipos basada en software y hardware flexible y fácil de usar,

es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328P, véase figura 26.

**Tabla 5**

**Características técnicas de la placa Arduino Uno Rev3**

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de operación	5V
Tensión de entrada	7-12V
Límite tensión de entrada	6-20V
Salidas de voltaje	5V, 3.3V
Pines digitales E/S	14 (6 PWM)
Pines analógicos entrada	6
Corriente pin E/S	40mA
Corriente pin 3.3V	50mA
Memoria flash	32 KB (0.5KB bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad o Frecuencia de reloj	16 MHz

**Características generales:**

- Es una placa electrónica de fácil adquisición.
- Muy bajo precio.
- Compatible con cualquier software que admita programación en java y programación intuitiva.
- Funciona a bajos voltajes ofreciendo un bajo consumo de energía.
- Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un convertor analógico/digital de 10 bits.
- Comunicación serial RX, TX, para señales TTL.
- Ofrece 6 salidas de señales PWM
- Memoria flash de 32 KB.



**Figura 26 Arduino Uno Rev3**

## b. Raspberry Pi

Es una placa de computadora desarrollada en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi con la finalidad de estimular la enseñanza de informática básica en las escuelas, véase figura 27, entre sus principales características técnicas tenemos:

**Tabla 6**

### Características Técnicas de la placa Raspberry Pi A+

Microcontrolador	ARM Broadcom BCM2835 @ 700 MHz
Memoria RAM (MB)	256
Ranura de Tarjeta micro SD	Si
Puertos USB 2.0	1
Puerto Ethernet	0
Puerto de Video compuesto	Si
Conector GPIO 40 pines	Si
Potencia Requerida (mA)	200mA
Sistema Operativo	Linux, Fedora, Arch Linux
Salida de Audio	Jack 3.5 mm
Alimentación	5V
Velocidad o Frecuencia de reloj	700 MHz



**Figura 27 Raspberry Pi A+**

### Características generales:

- Su valor en el mercado es medio y de adquisición fácil.
- Posee su propio sistema operativo: Raspbian, Arch Linux, RaspBMC, Pidora u OpenELEC e incluso, se dispone de Windows 10 según la página web de Microsoft.
- Es una placa de un tamaño minúsculo cercano al de una tarjeta de crédito.

- Memoria de 256 MB.
- Contiene todo lo necesario para poder ejecutar programas básicos, navegar por internet y programar.
- Sólo debe conectarse a la corriente eléctrica.
- Cuenta con hasta 4 puertos USB para conectar teclado y mouse, un conector HDMI con capacidad de reproducir vídeo en 1080p y hasta una conexión Ethernet para poder tener internet vía cable.

### c. Microcontrolador PIC 16F887A

Es un circuito integrado que en su interior contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada, salida y periféricos, sus características técnicas principales son las siguientes:

**Tabla 7**

#### **Características de Microcontrolador PIC 16F877A**

Frecuencia máxima	DX-20MHz
Memoria de programa flash	8KB
Puertos E/S	A,B,C,D,E
Número de pines	40
Interrupciones	14
Timers	3
Módulos CCP	2
Comunicaciones Serie	MSSP, USART
Comunicaciones paralelo	PSP
Líneas de entrada de CAD de 10 bits	8
Juego de instrucciones	35 Instrucciones
Longitud de la instrucción	14 bits
Arquitectura	Harvard
CPU	Risc
Canales PWM	2

#### **Características generales:**

- Bajo costo y fácil adquisición en el mercado.
- Soporta modo de comunicación serial, posee dos pines para ello.
- Memoria reprogramable: La memoria en este PIC es la que se denomina FLASH; este tipo de memoria se puede borrar electrónicamente (esto corresponde a la "F" en el modelo).

- Amplia memoria para datos y programa, memoria flash de 8 KB.
- 256 bytes de memoria EEPROM, los datos se pueden grabar más de 1.000.000 veces
- 368 bytes de memoria RAM.
- Set de instrucciones reducidas (tipo RISC), pero con las instrucciones necesarias para facilitar su manejo.

### 2.9.2 Selección del hardware de interpretación

Con el propósito de seleccionar la mejor opción, se utilizó el método de criterio de la sección 2.5.3.

**Tabla 8**

#### Selección del hardware de interpretación

Factores	Alternativas de Hardware de interpretación		
	Arduino Uno	Raspberry Pi	Microcontrolador Pic 16F877A
Bajo costo	8	4	6
Facilidad reemplazo	8	4	6
Facilidad adquisición	9	8	10
Compatible software CNC	8	10	2
Capacidad de Memoria	6	10	2
Facilidad en la programación	8	4	8
Operaciones de Control	7	10	2
<b>Total</b>	<b>54</b>	<b>50</b>	<b>36</b>

La mejor alternativa se encuentra en una placa Arduino Uno Rev3 como el sistema encargado del control del interfaz eléctrico tal como se concluye en la tabla 8 de comparación, debido principalmente a sus características que se acoplan a este proyecto y a la familiaridad de haber trabajado en proyectos anteriores como la placa electrónica.

### 2.10 Selección del hardware controlador de motores PAP Nema 17

El hardware controlador de motores PAP (Paso a paso) es el encargado de recibir las señales eléctricas que provienen de la interfaz electrónica (Arduino Uno Rev3) y ejecutarlas de tal forma que se produzca un movimiento en los

motores, en la dirección adecuada y de tener la capacidad de suministrar la tensión y corrientes necesarias para cada motor.

El dispositivo encargado de controlar el movimiento de los motores debe tener los siguientes factores:

- Bajo costo.
- Fácil adquisición en el mercado.
- Capacidad de manejo de los motores paso a paso.
- Resolución alta.
- Compatibilidad con señales de control de la interfaz eléctrica.
- Alta capacidad de memoria.
- Protección en caso de problemas eléctricos o cortocircuitos.
- Capaz de ejecutar adecuadamente las señales de control que reciba.

### **2.10.1 Alternativas de solución para el hardware controlador de motores PAP Nema 17**

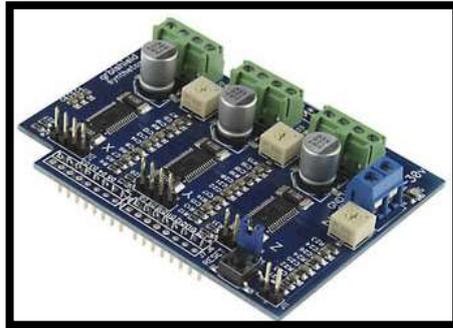
Podemos encontrar en el mercado una gran variedad de dispositivos que tienen la finalidad de controlar motores PAP (Paso a paso), de entre las principales podemos mencionar a GRBL Shield, Gecko Drive GM215 y Controlador Arduino CNC Shield, donde se selecciona una de estas opciones.

#### **a. GRBL Shield**

La placa GRBL Shield es un dispositivo compatible con Arduino Uno y su microprocesador ATM328P, especializado para el manejo de una máquina CNC de 3 ejes, véase figura 28, sus características principales son las siguientes:

- Placa electrónica de bajo costo y de difícil adquisición local.
- Compatibilidad exclusivamente con el software GRBL Universal Gcode Sender.
- Control de tres motores paso a paso X, Y y Z.

- Resolución de micro pasos de 8.
- 2,5 A por arrollamiento (motores paso a paso bipolares).
- Voltaje del motor 12v-30v.
- Control de corriente independiente para cada eje.
- Conectores del motor compatible con RepRap y electrónica makerbot.
- Utiliza exclusivamente los controladores de motores paso a paso TI DRV8818.



**Figura 28 GRBL Shield**

#### **b. Gecko Driver Gm215**

El dispositivo Gm215 es un controlador de movimientos de motores PAP (Paso a paso) y compatible con el software Gecko Motion, el cual ejecuta comando en formato ASCII enviados desde una PC, véase figura 29, entre sus características principales tenemos:

- Costo mediano y difícil adquisición en el mercado local.
- Resolución nativa de 10 micro pasos.
- El control del movimiento lo realiza mediante comandos en formato ASCII enviados desde la pc.
- Interface de comunicación RS485.
- Control de la velocidad y aceleración.
- Memoria Flash de 16 bits.
- Capacidad de manejo de 4 motores.
- Baja Velocidad de resonancia
- Protección contra corto circuitos, además protegido para polaridad invertida y para sobretensiones.
- Velocidad de comunicación con el computador de 115200 baudios.

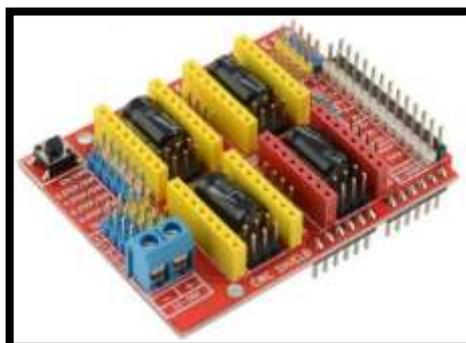


**Figura 29 Placa Grecko GM215**

### **c. CNC Shield Arduino v3.0**

CNC Shield v3.0 es una tarjeta de expansión CNC para Arduino Uno, donde el módulo se utiliza para interconectar una placa sencilla de Arduino para el manejo de 4 motores PAP, véase figura 30, sus características principales son:

- Bajo costo y de fácil adquisición en el mercado local.
- Control de cuatro ejes (X, Y, Z, A).
- Compatibilidad con el software GRBL Universal Gcode Sender (Versiones Firmware 0.8c y 0.9i) y plataformas de Arduino.
- Resolución de 1/16 de paso.
- Adaptación directa con Arduino Uno V3.0 y otras placas compatibles.
- Soporta de 12 - 36 V de alimentación para motores.
- Parte lógica de tensión de alimentación de 5V.
- Interfaces de comunicación UART, I2C.
- Compatible de controladores de motores paso a paso A4988 y DRV88, contando con 4 zócalos adaptables a los drivers.



**Figura 30 CNC Shield Arduino v3.0**

### 2.10.2 Selección del hardware controlador de motores PAP Nema 17

Con el propósito de seleccionar la mejor opción, se utilizó el método de criterio de la sección 2.5.3.

**Tabla 9**

#### Selección para hardware controlador de motores PAP Nema 17

Factores	Alternativas de Hardware Controlador de Motores PAP Nema 17		
	Grbl Shield	Grecko GM215	CNC Shield Arduino v3.0
Bajo costo	8	6	10
Fácil Adquisición	5	4	8
Manejo de Motores PAP	8	10	10
Compatible con las señales de Control	10	4	10
Resolución	7	6	8
Capacidad de Memoria	6	8	4
Protección contra fallos o cortocircuitos	8	4	8
Ejecutar adecuadamente las señales de control	10	8	10
<b>Total</b>	<b>62</b>	<b>50</b>	<b>68</b>

La mejor alternativa se encuentra en adoptar el controlador Arduino CNC Shield v3.0, tal como se deduce en la tabla 8 de comparación, la cual es totalmente compatible con Arduino Uno Rev3, el cual cumple con los requerimientos necesarios para el manejo de motores paso a paso.

### 2.11 Selección de driver para motores PAP Nema 17

Existe una gran disponibilidad de controladores de motores paso a paso disponibles en el mercado, pero debido a la arquitectura de la tarjeta CNC Shield v3.0 seleccionado anteriormente quedan descartadas muchos drivers excepto el controlador A4988 y DRV8825.

El dispositivo gestor de controlar adecuadamente las señales de control enviados desde la interfaz electrónica (Arduino) y de proporcionar todas las señales de accionamiento necesarias para la etapa de potencia debe tener las siguientes características.

- Bajo costo.
- Fácil reemplazo o reparación en caso de daños.
- Factible adquisición en el mercado.
- Suficientemente potente para suministrar las corrientes necesarias a los motores paso a paso (Corrientes mayores de 1.5 A).
- Alta resolución.
- Capaz de controlar correctamente los grados por paso (Cantidad de grados que girara el eje).
- Velocidad de respuesta menos de 1 ms.
- Compatibilidad con señales de control de la interfaz eléctrica.

### 2.11.1 Alternativas de solución de driver para motores PAP Nema 17

#### a. Driver Pololu A4988

El dispositivo A4988 está diseñado para controlar motores paso a paso bipolares, incorpora el chip de Allegro A4988 de la marca Pololu, la cual es una placa de fácil conexión y utilización, además cuenta con un potenciómetro que permite regular la intensidad de salida hasta los 2A por bobinado.

**Tabla 10**

#### Principales características del driver A4988

Costo y adquisición	Es una driver de muy bajo costo y de fácil adquisición en el mercado local, haciendo sencillo su rápido reemplazo
Control de corriente ajustable	Permite ajustar la salida de corriente máxima con un potenciómetro, que le permite utilizar tensiones superiores a la tensión nominal del motor paso a paso para lograr mayores tasas de paso
Cinco resoluciones diferentes	Paso completo, medio paso, un cuarto de paso, un octavo de paso, y un dieciseisavo de paso
Protección	Sobrecalentamiento térmico, cierre por baja tensión, y protección por sobre pico de corriente.
Tensión entrada motor	8-35 V
Tensión entrada lógica	3.3-5 V
Corriente de salida	1A (Hasta 2 A con disipador)
Resolución máxima	1/16

### b. Driver Pololu DRV8825

Esta es una placa controlador de motor paso a paso bipolar, cuenta con límite de corriente ajustable, protección contra sobre-corriente y sobre-temperatura, además con seis resoluciones micropasos (hasta 1/32 del paso). Opera desde 8,2 V a los 45 V y puede entregar hasta aprox. 1,5 A por fase sin disipador de calor o flujo de aire forzado (clasificado hasta 2,2 A por bobina con suficiente refrigeración adicional), entre sus características principales tenemos:

**Tabla 11**

#### Principales características del driver DRV8825

Costo y adquisición	Es una driver de bajo costo, pero de difícil adquisición en el mercado local.
Voltaje lógico	3.3V – 5V DC
Voltaje de potencia	8.2V – 45V DC
Interfaz de control	Step y Direction
Corriente	Entre en condiciones normales 1.5 A
6 Resoluciones	Full step, half step, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Funciona con sistemas	3.3 y 5V
Protección	Sobre temperaturas, sobre corriente, voltaje bajo, sobre temperatura y voltaje bajo

#### 2.11.2 Selección de driver para motores PAP Nema 17

Con el propósito de seleccionar la mejor opción, se utilizó el método de criterio de la sección 2.5.3.

**Tabla 12**

#### Selección para hardware controlador de motores PAP Nema 17

Factores	Alternativas de Driver Controlador de Motores PAP Nema 17	
	A4988	DRV8825
Bajo costo	10	8
Fácil Adquisición o reemplazo	10	8
Potente para suministrar las corrientes necesarias	9	10
Velocidad de respuesta	8	8
Resolución	8	10
Controlar los grados por paso	10	10
Compatible con interfaz	10	10
<b>Total</b>	<b>65</b>	<b>64</b>

De estos dos controladores de motores paso a paso se estableció como la mejor opción al dispositivo Pololu A4988, según lo indicado en la tabla 12 de comparación, véase figura 30, el cual es totalmente compatible con el manejo de cualquier motor PAP y adaptable en la tarjeta CNC Shield v3.0 y Arduino Uno con una buena capacidad de resolución de 1/16 y entrega la corriente necesaria a cada actuador.



**Figura 31 Driver Pololu A4988**

## 2.12 Sistema de alimentación eléctrica

Dentro del sistema de alimentación, para la selección de la fuente de poder se debe tomar en cuenta el consumo de potencia eléctrica de los motores PAP (Paso a Paso) Nema 17 del sistema de desplazamiento, siendo su voltaje de operación nominal de 12 VDC y tienen un consumo de corriente máximo de 1.5 amperios por fase.

Para lo cual se realiza el cálculo de la potencia requerida para su correcto funcionamiento:

$$P = V * I \quad (\text{Ecu. 1})$$

$$P = 12V * 3 A \quad (\text{Ecu. 2})$$

$$P = 36 \text{ Watts por motor} \quad (\text{Ecu. 3})$$

En el caso de que todos los motores funcionen a su máxima capacidad se requerirá una fuente de 12 voltios y 9 amperios de consumo, entonces la potencia de la fuente debe ser:

$$P = V * I \quad (\text{Ecu. 4})$$

$$P = 12V * 9A \quad (\text{Ecu. 5})$$

$$P = 108 \text{ Watts para el sistema} \quad (\text{Ecu. 6})$$

La placa de conexionado de la sonda de palpación requiere de 5 VDC para su funcionamiento y el consumo de corriente se lo considera despreciable, además se precisa que la fuente de alimentación suple con voltajes variables de 3.3 VDC, 5 VDC y 12 VDC, para los distintos elementos electrónicos del sistema de control de la estación, a continuación se analizan algunas alternativas de selección de la fuente del proyecto.

### **2.13 Selección de alimentación eléctrica del sistema**

La fuente de alimentación eléctrica del sistema debe contar con las siguientes características:

- Bajo costo.
- Fácil adquisición en el mercado.
- Voltaje de entrada de 110 VAC.
- Potencia igual o superior a 120 Watts.
- Suministro de corriente de 10 A o más.
- Voltaje variable de salida de 3.3V, 5V, 12V.
- Frecuencia de voltaje de entrada de 60 Hz.
- Protección contra sobretensiones y sobre-corriente.

#### **2.13.1 Alternativas de alimentación eléctrica del sistema**

##### **a. Fuente de alimentación AT**

AT (Tecnología avanzada) es un dispositivo que se ajusta en el gabinete de un computador y que se encarga de transformar la corriente alterna de la línea eléctrica en corriente directa, la cual es utilizada por los elementos electrónicos y eléctricos de un computador con un menor voltaje, entre sus funciones principales son las de suministrar la cantidad de corriente y voltaje que los dispositivos requieren así como protegerlos de problemas en el suministro eléctrico como subidas de voltaje, entre sus características principales tenemos:

- Bajo costo y difícil adquisidor en el mercado local.
- Voltaje de alimentación va de 100 – 135 VAC.

- Las fuentes AT comerciales manejan potencias eléctricas de 250 W, 300 W, 350 W y 400 W.
- Amperaje de salida máximo de 3.2 A.
- Salida de voltajes de 3.3 VDC, 5VDC, -5VCD, 12VCD, -12VCD.
- Frecuencia de 50/60 Hz.
- Para su encendido y apagado, cuenta con un interruptor mecánico.
- Ahorra electricidad, ya que no se queda en modo Stand by o en estado de espera.
- Es una fuente segura, ya que al oprimir el botón de encendido se interrumpe la electricidad dentro de los circuitos, aunque si el usuario manipula directamente el interruptor para realizar alguna modificación, corre el riesgo de choque eléctrico, ya que esa parte trabaja con 127 VCA directamente.

#### **b. Fuente de alimentación ATX**

ATX (Tecnología avanzada extendida), es la segunda generación de fuentes de alimentación introducidas al mercado destinadas para computadoras y al igual que la fuente AT se acopla internamente en el gabinete de un CPU, entre sus características principales tenemos:

- Es de fácil adquisición y costo bajo.
- Voltaje de alimentación va de 90 – 135 VAC.
- Las fuentes ATX comerciales manejan potencia eléctrica de 300 Watts (W), 350 W, 400 W, 480 W, 500 W, 630 W, 1200 W y hasta 1350 W.
- Amperaje de salida máximo de 12 A..
- Salida de voltajes de 3.3 VDC, 5VDC, -5VCD, 12VCD, -12VCD.
- Frecuencia de 50/60 Hz.
- Es de encendido digital, es decir, tiene un pulsador en lugar de un interruptor mecánico.
- Algunos modelos integran un interruptor mecánico trasero para evitar consumo innecesario de energía eléctrica, evitando el estado de reposo.
- Integración de los puertos E/S en la propia placa base.
- El apagado de este tipo de fuentes puede ser manipulado con software.

### c. Fuente de alimentación Grecol P10A

Esta fuente de alimentación está destinada específicamente para suministrar grandes cantidades de corriente en sus conectores de salida, por lo que es ideal para proyectos en los cuales es necesario abastecer energía a distintos motores, entre sus principales características tenemos:

- Costo medio y fácil adquisición en el mercado local.
- Voltaje de entrada de 100 ~ 240 V AC.
- Potencia: 12 W 24 W 36 W 60 W 120 W.
- Suministra 1.25 A, 2.1 A, 3 A, 5 A y 10 A.
- Salida constante de 12 VDC.
- Frecuencia de 50/60 Hz.
- Material de la estructura es de metal.
- Certificado por parte de CE ROHS.

#### 2.13.2 Selección de alternativas de fuentes de alimentación

Con el propósito de seleccionar la mejor opción, se utilizó el método de criterio de la sección 2.5.3.

**Tabla 13**

#### Selección para hardware controlador de motores PAP

Factores	Alternativas para selección de Fuente de Alimentación		
	AT	ATX	P10A
Bajo costo	8	8	7
Fácil adquisición en el mercado	7	9	8
Voltaje de entrada 110 V	10	10	10
Potencia igual o superior a 120 Watts	10	10	10
Suministro de corriente de 10 A o más	4	10	10
Voltaje variable de salida de 3.3 V, 5 V, 12 V	10	10	4
Frecuencia de voltaje de entrada de 60 Hz	10	10	10
Protección contra sobretensiones y sobre-corriente	8	8	10
<b>Total</b>	<b>67</b>	<b>75</b>	<b>69</b>

Según las características necesarias establecidas en la sección 2.13, las cuales debe poseer la fuente de alimentación para la estación de control de calidad, se encuentra en el mercado una fuente de poder ATX o fuente de poder de un computador, seleccionado en la tabla 13, la cual cuenta con todas los requerimientos necesarios para este proyecto, véase figura 32.



**Figura 32 Fuente de alimentación ATX**

#### 2.14 Arquitectura global final del sistema electrónico

La arquitectura global del sistema eléctrico se lo muestra en la figura 33, una vez elegidos los dispositivos que lo conforman, siendo estos controlados desde un computador, donde se realizan todos los procesos de control para posteriormente a ser interpretados por la tarjeta CNC Shield v3.0 acoplada directamente sobre la placa Arduino Uno, donde la energía requerida por los motores pap gobernados por los Pololu A4988, es suministrada por una fuente de alimentación ATX que provee la tensión y corriente necesario para mover los motores.



**Figura 33 Arquitectura final del sistema eléctrico**

## **2.15 Selección de software para la estación de control de calidad**

En el control y manejo de motores paso a paso Nema 17, se cuenta con la disponibilidad de una mesa de posicionamiento y los componentes seleccionados anteriormente, lo que hace necesario contar con un programa de computador que permita operar dicho mecanismo, por lo que este software a ser elegido debe tener como mínimo las siguientes características:

- Interpretación de códigos G.
- Capacidad del software.
- Compatibilidad con la plataforma arduino.
- Compatibilidad con CNC Shield V3.0
- Compatibilidad con el driver Pololu A4988.
- Facilidad de manejo.
- Software de licencia libre.

### **2.15.1 Alternativas de selección de software para la estación de control de calidad**

Para este propósito contamos con algunos softwares capaces de controlar una mesa de posicionamiento, en nuestro caso, estación de control de calidad, en la cual podemos mencionar a Mach 3, CirQ Wizard, GRBL Universal Gcode Sender, de entre las cuales se seleccionara la mejor opción.

#### **a. Software Mach 3**

Este software es muy rico en sus características y fácil de manipular, es un controlador completamente compatible con la mayoría de los sistemas CAD-CAM y maquinas en el mercado, además de tener la capacidad de soportar varios formatos de archivo que incluye DXF, BMP, JPG y HPGL, igualmente tiene la capacidad de admitir código G creado por Type3, Artcam, ProE, UG etc.

Este software corre idealmente en el sistema operativo de Windows XP o Windows 2000 preferentemente con un procesador de 1 GHZ, adicionalmente

los drivers de los motores de los ejes a controlar deben aceptar señales de pulso de paso y de dirección.

Una de las desventajas de Mach3, es que opera y se comunica por el puerto paralelo del ordenador, representando esto una dificultad en la parte de comunicación con distintos dispositivos controladores o drivers.

#### **b. Software CirQ Wizard**

CirQ Wizard es un software de código abierto y multiplataforma, diseñado para el control de máquinas de prototipado para PCB, tiene la capacidad de generar códigos G, trabaja con máquinas Cirqoid, pero al ser de código abierto puede adaptarse a cualquier máquina de manufactura, es un software descargable y compatible para sistemas operativos como son Mac OS X, Linux y Windows.

#### **c. GRBL BCNC (Universal Gcode Sender)**

Grbl BCNC es un software libre y multiplataforma (Windows, Linux, Mac) escrito en Python, soportado por GRBL (Código abierto, integrado, de alto rendimiento de códigos G, analizador y un controlador de fresado CNC, escrito en C que se ejecutará en una plataforma de arduino), ideal para trabajar con hardware de bajo poder como el raspberry Pi y Arduino Uno Rev3, además poseer las herramientas básicas para trabajar un sistema CNC y es fácil de usar, emisor de comandos, autor reguladores, editor de código G, con todas las funciones del remitente g-código.

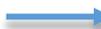
### **2.15.2 Selección de software para la estación de control de calidad**

Con el propósito de seleccionar la mejor opción, se utilizó el método de criterio de la sección 2.5.3.

**Tabla 14**

#### **Selección de software para la estación de control de calidad**

Factores	Alternativas para selección del software para la estación de control de calidad		
	Mach 3	CirqWizar	GRBL Universal Gcode sender BCNC
Lectura de archivos CNC	10	8	8

CONTINÚA 

Capacidad del software	10	8	8
Compatibilidad con Arduino	6	8	10
Compatibilidad con CNC Shield v3.0	6	6	10
Compatibilidad con driver A4988	6	4	10
Facilidad de Programación	8	10	10
Software Libre	6	10	10
<b>Total</b>	<b>52</b>	<b>54</b>	<b>66</b>

La solución a adoptarse en este proyecto establecido en la tabla 14, es el software GRBL Controller BCNC el cual es un software libre, gratuito, multiplataforma creado por Zapmaker.org ideal para trabajar con la plataforma de Arduino y compatibilidad con la tarjeta CNC Shield V3.0 y los drivers Pololu A4988 seleccionados anteriormente, siendo el programa fácilmente descargado gratuitamente desde la página de internet de GRBL, su interfaz se la observa en la figura 34.

Éste software se va a encargar de visualizar el movimiento de ejes X, Y, Z, configurar el cero pieza, los sensores de final de carrera, adquisición del valor de posición de la sonda de palpación entre otros.

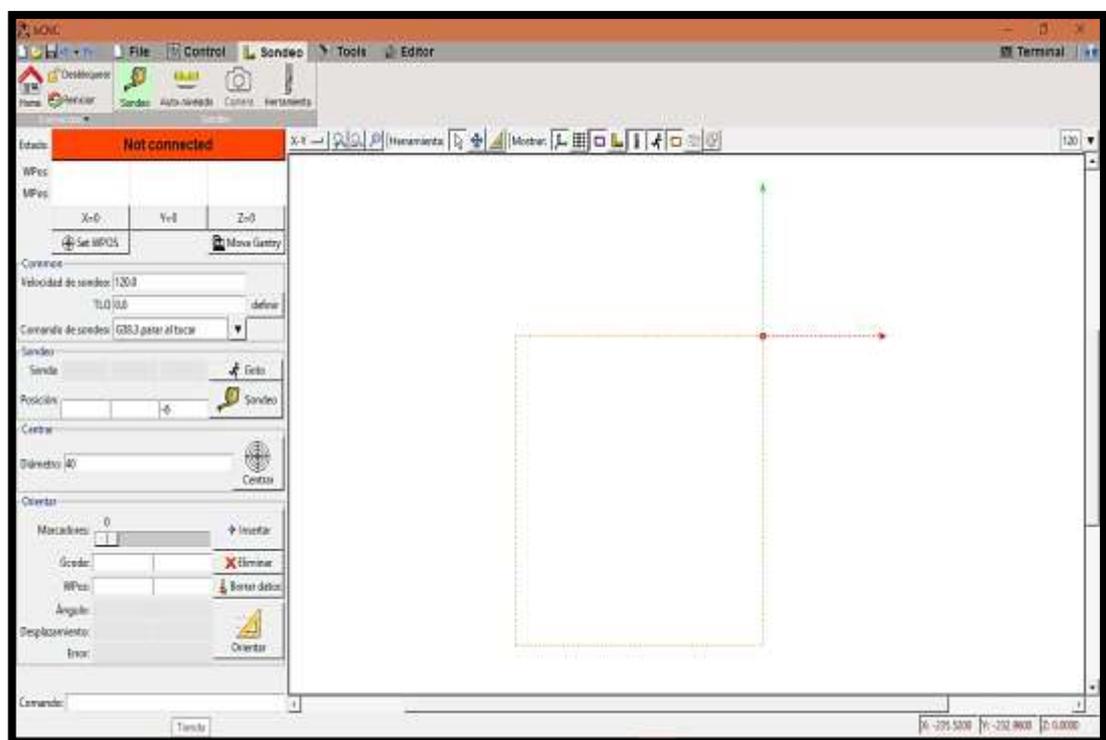
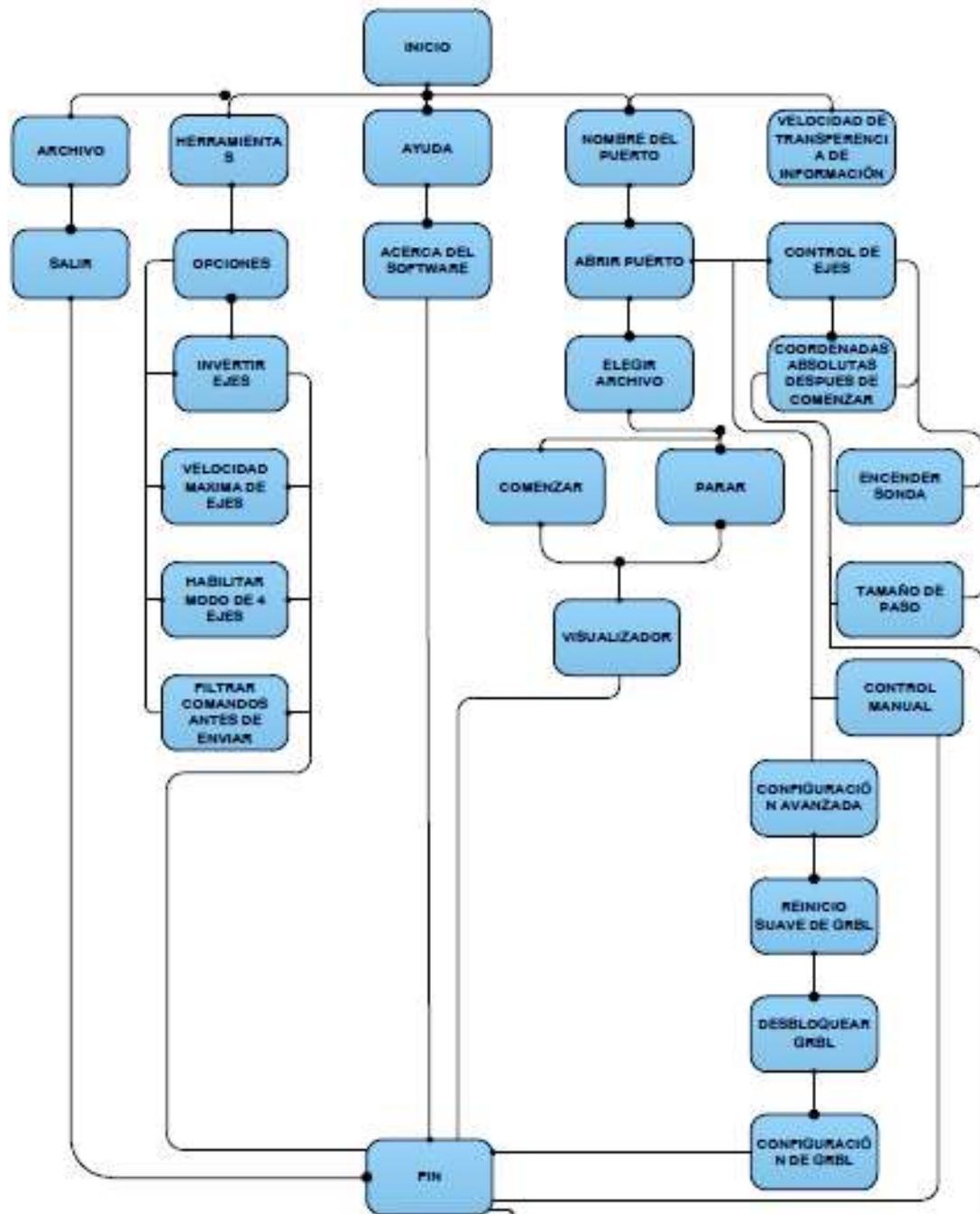


Figura 34 Interfaz GRBL BCNC

### 2.15.3 Diagrama de flujo del software GRBL BCNC

En la figura 35 podemos observar el diagrama de flujo representativo del funcionamiento del software GRBL BCNC, utilizado para el desplazamiento y activación de la sonda de medición en el control de calidad de piezas mecanizadas.



**Figura 35 Diagrama de flujo del software GRBL BCNC**

El diagrama de la figura 35 muestra distintas características que posee el software como parámetros de funcionamiento, requerimientos, etc. para el

manejo de información necesaria para la puesta en marcha de la estación y realizar la configuración de movimientos, velocidad, aceleración, medición, activación de la sonda de palpación, movimientos de seguridad y poseer una retroalimentación de las operaciones que realice la estación de control de calidad.

## **2.16 Selección de software para la interfaz HMI de la estación de control de calidad**

El HMI de la estación es la interfaz visual en donde se debe verificar el control de calidad de las piezas, la selección de piezas correctamente medidas, el rechazo de las no aprobadas y mostrar la información esencial dentro del proceso de control de calidad, por lo que este software a ser elegido debe tener como mínimo las siguientes características:

- Software de licencia libre.
- Facilidad de manejo.
- Compatibilidad con la plataforma Arduino.
- Manejo de gráficos y realización de cálculos matemáticos básicos.
- Soportar imágenes móviles.
- Facilidad de programación.
- Facilidad de comunicación.

### **2.16.1 Alternativas de selección de software para la Interfaz HMI de la estación de control de calidad**

Para este acometido contamos con la disponibilidad de algunos softwares capaces de proporcionar el controlar dentro del proceso de control de calidad, en la cual podemos mencionar a Labview 2012, Matlab y Processing, de entre las cuales se seleccionara la mejor opción.

#### **a. LabView 2012**

Este software es muy rico en sus características, especializado para el diseño de sistemas, cuenta con un lenguaje de programación visual gráfico,

recomendado para sistemas de control, pruebas y diseño de simulación en tiempo real y embebido.

Cuenta con la disponibilidad de comunicación para puerto serie, paralelo, GPIO, PXI, VXI, TPC/IP, Irda, Bluetooth, USB, OPC entre otros, teniendo la capacidad de poder interactuar con otros lenguajes de programación como DLL, NET, ActiveX, Multisim, Simulink, autocad, solidwork.

Es un software ideal para el tratamiento digital de imágenes, control de movimiento, sincronización entre dispositivos, adquisición y manejo de gráficas, programación FPGAS para control y sincronización entre dispositivos.

### **b. Matlab**

Es un software especialidad para las herramientas matemáticas, operaciones de vectores, matrices, etc., que ofrece un entorno de desarrollo integrado, soportable en sistemas operativos como Unix, Windows, Mac OS, Linux.

El lenguaje de programación es uno propio de extensión “\*.m”, posee visualización de graficas en 2Dy 3D y su módulo Simulink permite simulaciones dinámicas a través de una interfaz en bloques poseyendo 35 toolboxes para el simulador.

Matlab puede llamar funciones y subrutinas escritas en lenguaje de programación en C y como desventaja del software es que es un programa propietario por lo que funciones de archivos de biblioteca como .NET o Java no pueden ser utilizados a menos que se trabaje con licencia o en un equipo MCR (Matlab Component Runtime).

### **c. Processing 3**

Es un lenguaje de programación y entorno de desarrollo integrado IDE de código abierto basado en Java, de fácil utilización, y que sirve como medio para la enseñanza y producción de proyectos multimedia e interactivos de diseño digital, arte gráfico, animaciones y aplicaciones gráficas de toda índole.

Es un software libre y liviano, descargable desde la web, de programación similar a Arduino, dedicado para la comunidad de programadores en java, genera aplicaciones lista para funcionar en Mac OS, Windows Linux e inclusive en internet (como una aplicación de Java), permite tres tipos de programación, básica, estructurada y orientada a objetos

Admite la conexión de todo tipo de dispositivos, prototipos y aparatos móviles, ideal para proyectos elaborados con Arduino facilitando su comunicación y desarrollo.

### 2.16.2 Selección de software para la interfaz HMI de la estación de control de calidad

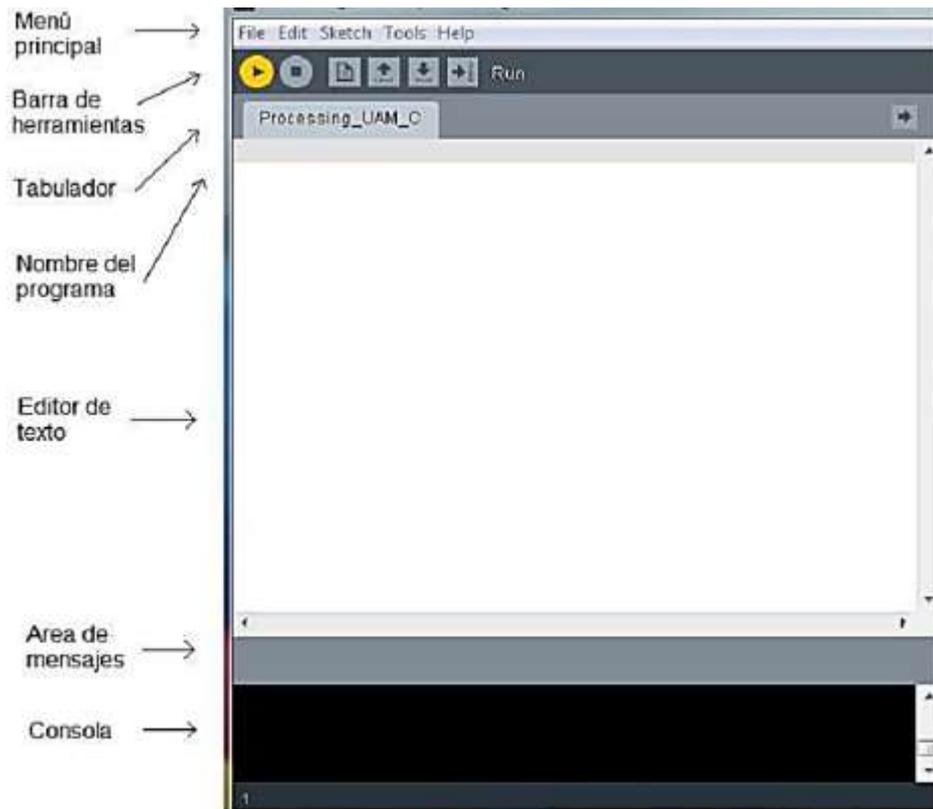
Con el propósito de seleccionar la mejor opción, se utilizó el método de criterio de la sección 2.5.3.

**Tabla 15**

#### Selección de software para la Interfaz HMI del proyecto

Factores	Alternativas para selección del software para la Interfaz HMI		
	LabView 2012	MatLab	Processing 3
Software Libre	8	8	10
Facilidad de manejo	7	7	10
Compatibilidad con la plataforma Arduino	8	2	10
Manejo de Gráficos y Cálculos matemáticos	10	10	8
Soporta imagines móviles	8	6	10
Facilidad de programación	7	7	8
Facilidad de comunicación	8	2	8
<b>Total</b>	<b>56</b>	<b>41</b>	<b>64</b>

La solución a admitir en este proyecto, determinado en la tabla 15, es el software Processing 3 el cual es un software libre, gratuito, multiplataforma ideal para trabajar con la plataforma de Arduino, de fácil programación y comunicación el cual permite realizar cálculos matemáticos básicos y siendo fácilmente descargable gratuitamente desde la página de internet de Processing, su interfaz se la observa en la figura 36.



**Figura 36 Interfaz de Processing 3**

### **2.16.3 Etapa de diseño de la interfaz Hombre - Máquina**

En esta sección se diseña una interfaz HMI que permite introducirse e interactuar con la celda de manufactura con control de calidad, cuyo diseño se especifica a continuación.

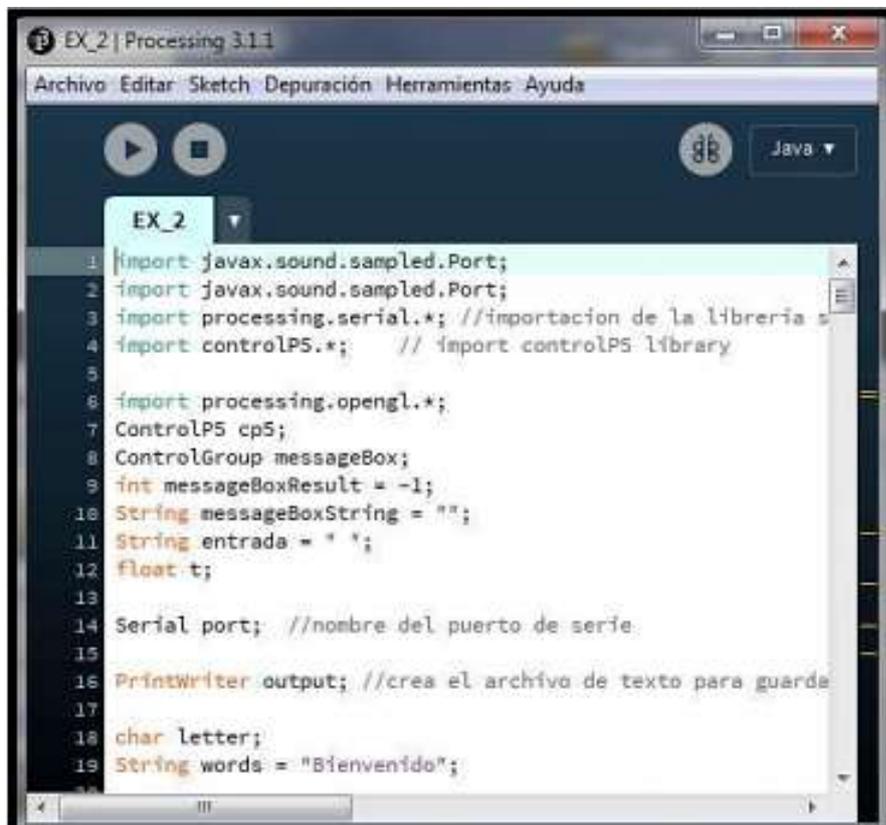
### **2.16.4 Diseño de una interfaz HMI para la conexión y acoplamiento a la celda de manufactura**

Para la creación de un interfaz amigable que pueda cumplir con los requerimientos de evaluación de la medición que va a tener la estación de control de calidad, utilizando los algoritmos de programación necesarios para poder interpretar los resultados que se obtengan de la medición de las piezas mecanizadas y realizar el cálculo del error, se hace uso del software seleccionado en la sección 2.16.2.

Processing cuenta con una interfaz simple de manera contraria a otros entornos de desarrollo, además permite concentrarse exclusivamente en el

conjunto de instrucciones y en la observación de resultados visuales de manera rápida.

Se elaboró una interfaz para la estación de control de calidad comunicada con la estación de distribución de piezas mecanizadas en las situaciones de que si la pieza mecanizada está lista para proceder con la medición, introducción de valores medidos en GRBL BCNC, cálculo del error y señal de distribución tanto como pieza aprobada como para pieza desechada y para ello se programó en lenguaje java en el entorno de Processing 3 de código abierto como lo muestra la figura 36, la programación completa se encuentra en anexo C.



```

EX_2 | Processing 3.11
Archivo Editar Sketch Depuración Herramientas Ayuda
EX_2
1 import javax.sound.sampled.Port;
2 import javax.sound.sampled.Port;
3 import processing.serial.*; //importación de la librería s
4 import controlPS.*; // import controlPS library
5
6 import processing.opengl.*;
7 ControlPS cpS;
8 ControlGroup messageBox;
9 int messageBoxResult = -1;
10 String messageBoxString = "";
11 String entrada = " ";
12 float t;
13
14 Serial port; //nombre del puerto de serie.
15
16 PrintWriter output; //crea el archivo de texto para guarda
17
18 char letter;
19 String words = "Bienvenido";

```

**Figura 37 Esquema de programación para la Interfaz HMI**

Con la programación para obtener la interfaz, haciendo uso de librerías de comunicación serial ControlP5, procesamiento de imágenes y animaciones, descargable de la página web de Processing y se obtuvo un resultado como se muestra en la figura 38.



Figura 38 HMI para la estación de control de calidad

## 2.17 Diseño de la placa PCB de conexiones de motores pap Nema 17 y resistencia Pull-Up para la sonda de medición

Para esta placa de circuito electrónico se elaboró el diseño en el software PCBWizard, en donde se realiza el diseño de las pistas para la inter conexión de los tres motores pap Nema 17 hacia la tarjeta Shield CNC v3.0 y de una resistencia de 100 Ohm en Pull-Up para la señal de activación de la sonda de medición, tal como se muestra en la figura 39.

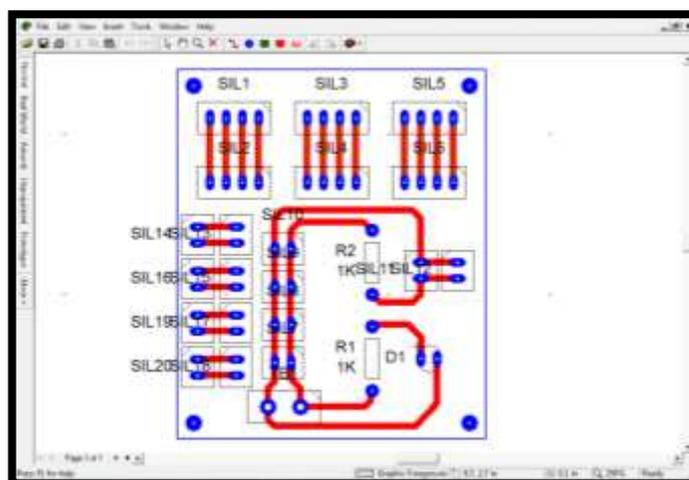
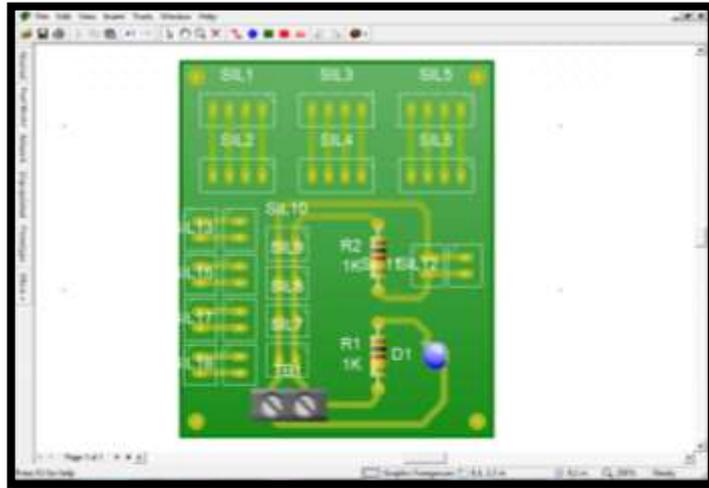


Figura 39 Diseño de pistas de la placa de interfaz

A continuación se ubica los elementos sobre la placa con las medidas de los elementos a tamaño real proporcionados por el software como se muestra en la figura 40.



**Figura 40** Diseño de pistas de la placa de interfaz

## CAPÍTULO 3

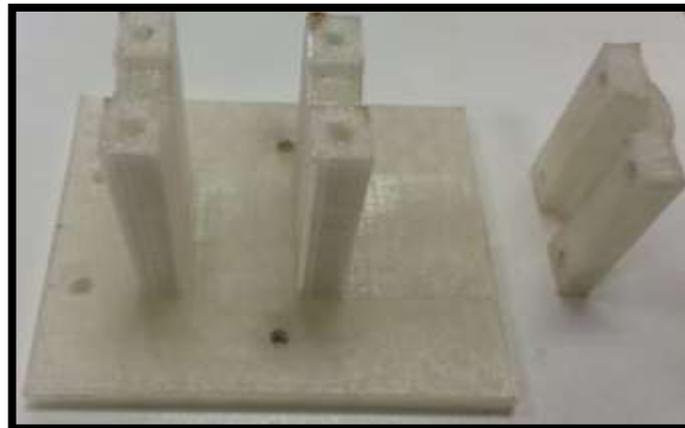
### IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD

#### 3.1 Implantación del módulo

La implementación de la estación de control de calidad, se describe en forma detallada, una vez adquirida lo elementos mencionados en la sección anteriores y tras la elaboración de las piezas diseñadas se procede a montar en conjunto al sistema de posicionamiento, los equipos seleccionados, establecimiento de las conexiones eléctricas y su comunicación con los softwares especificados previamente.

##### 3.1.1 Elaboración del soporte de la sonda de medición en impresión 3D

Para la fabricación de este sistema de sujeción se utilizó una impresora 3D con material ABS, el cual permite emplearlo en aplicaciones industriales ya que se pueden realizar tareas de pulido, lijado, limado, agujerado, etc., en la figura 41 se muestra la piezas ya elaboradas.

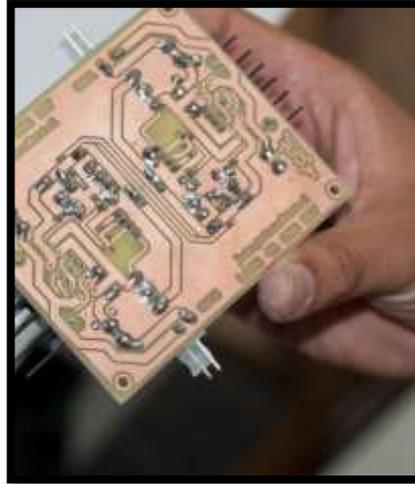


**Figura 41 Soporte de sujeción impreso en 3D**

##### 3.1.2 Elaboración de la placa PCB de conexiones para motores PAP Nema 17 y resistencia Pull-Up para la sonda de medición

La placa diseñada en la sección 2.17 se lo elaboró para su posterior utilización y de esta manera facilitar la interconectividad de los cableados de

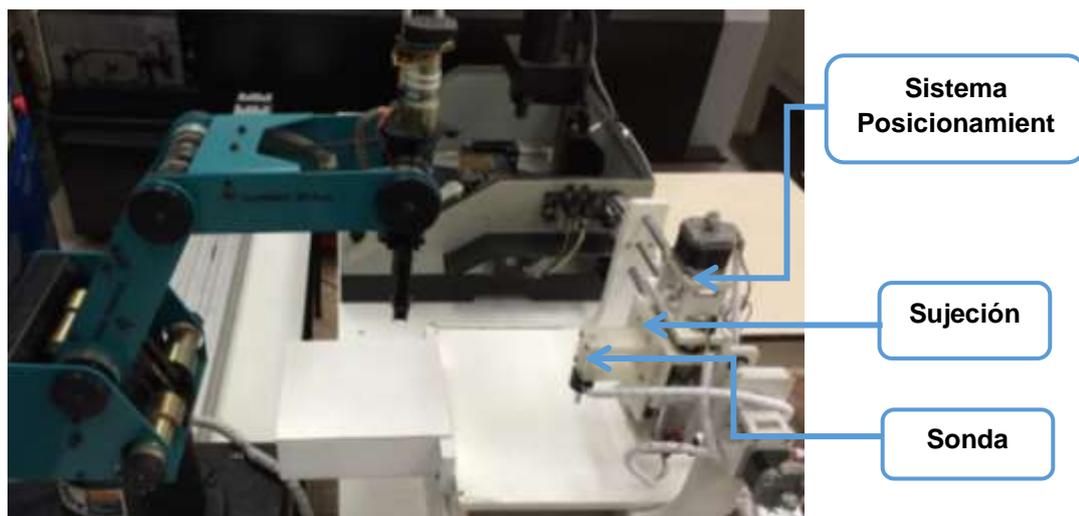
los motores pap Nema 17 de cada uno de los ejes con su respectivo driver Pololu A4988 ubicados en la placa Shield CNC v3.0, además de dar la facilidad de poder conectar la sonda de medición mediante pines directos a la alimentación y a la resistencia para poder de esta manera obtener la señal de activación.



**Figura 42 Placa con elementos soldados**

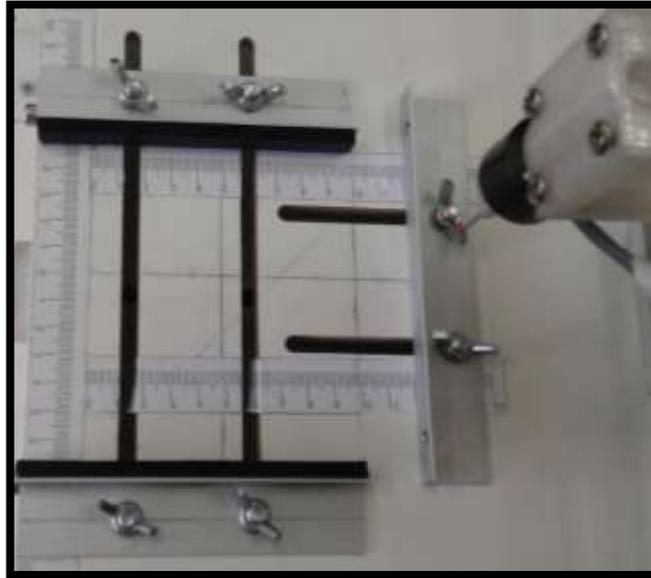
### 3.1.3 Implementación del sistema de posicionamiento con la sonda

Para la implementación del sistema de posicionamiento que va a efectuar la medición de las piezas mecanizadas, se colocó el soporte de sujeción en el eje Z en conjunto con la sonda y palpador como se muestra en la figura 43.



**Figura 43 Sistema de posicionamiento y sonda de medición**

En el área de trabajo se utiliza placas de fijación, las cuales llevan un patrón de rejilla alfanumérico indicando la ubicación correcta en la que se debe colocar las piezas, siendo sujeciones de fácil manipulación ubicados en el área de trabajo, que admite posicionarse en el lugar idóneo para facilitar una trayectoria de sonda sin obstáculos que permite inspeccionar cada detalle de las piezas, como se muestra en la figura 44.



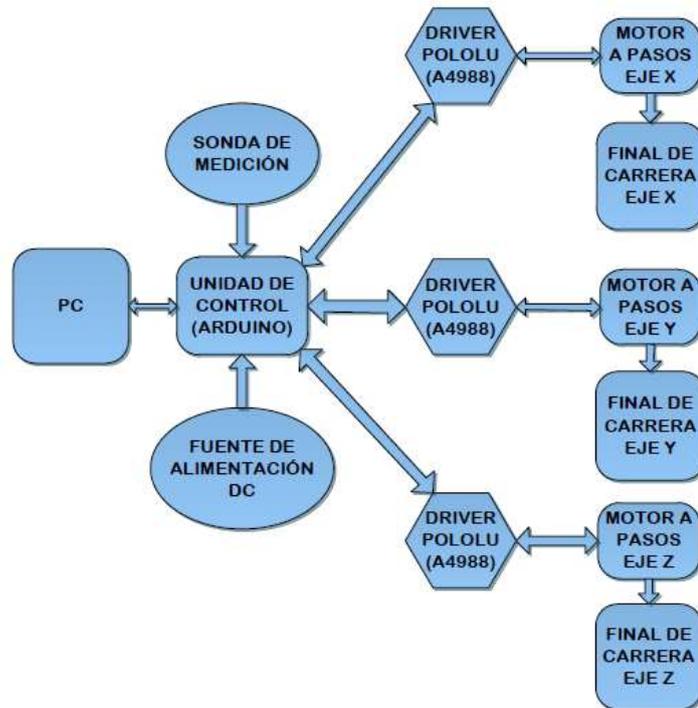
**Figura 44 Área de sujeción de piezas**

### **3.2 Etapa electrónico y de potencia**

Se realizó las conexiones y cableados para el funcionamiento de la estación y que tenga una correlación adecuada del sistema mecánico con el de control (Software).

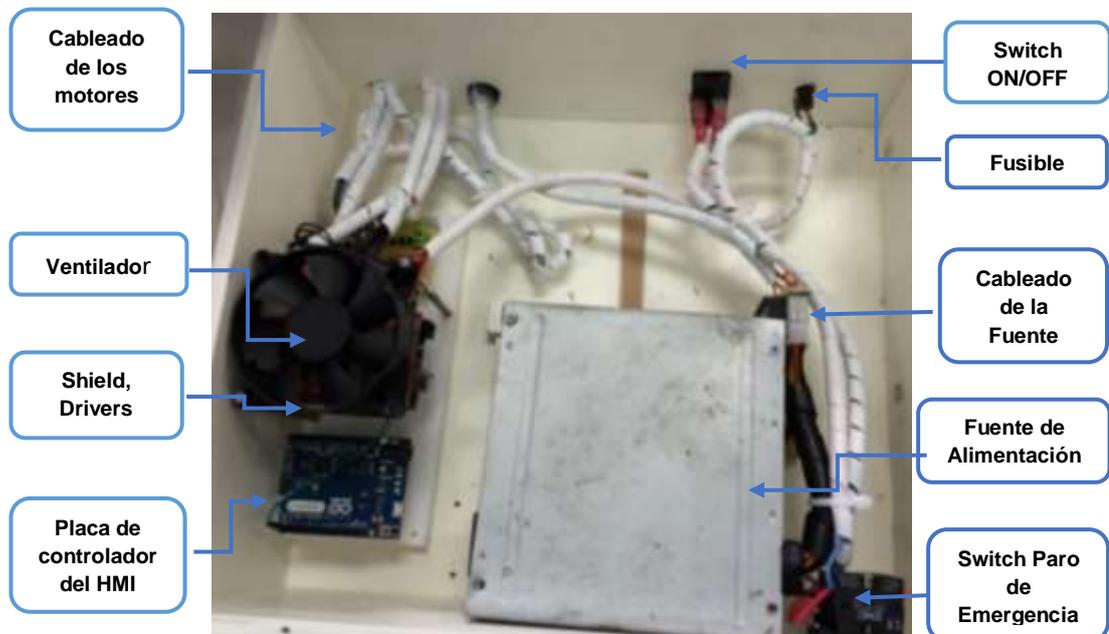
#### **3.2.1 Plano de conexiones eléctricas**

En el plano de las conexiones eléctricas se muestra el cableado que interconecta el hardware y software a utilizarse para la conformación del sistema de desplazamiento de la estación de control de calidad, tal como se muestra en la figura 45, para mayor detalle verificar anexo A6.



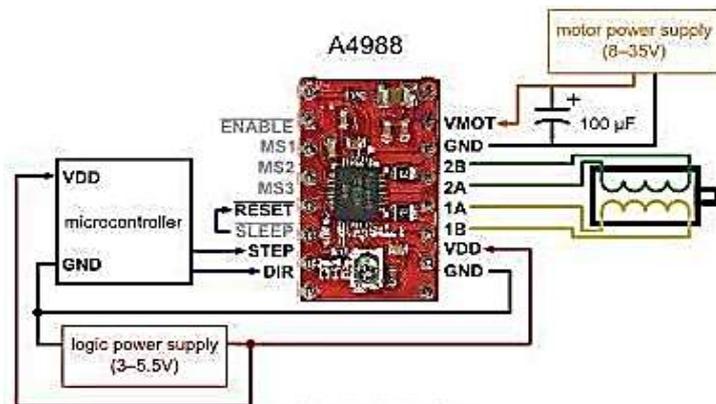
**Figura 45 Plano de conexiones eléctricas**

Se implementa el cableado eléctrico como se lo indico en el anexo A6 el cual sirve de guía para establecer las correctas conexiones eléctricas de los componentes que conformar la estación, resultándonos las conexiones reales de la figura 46.



**Figura 46 Conexiones Eléctricas en el Gabinete de Control**

En esta imagen podemos observar gran información ya que se visualiza la conectividad de la fuente de alimentación a la tarjeta CNC Shield Arduino v3.0 de 12 VDC para los motores paso a paso, la placa PCB que facilita la conectividad de los tres motores a cada uno de los drivers (Donde dicha conectividad se la puede apreciar de mejor manera en la figura 47) y la resistencia Pull-Up para la sonda de medición, un ventilador enfriador de los drivers Pololu A4988.



**Figura 47 Conexión del Driver Pololu A4988**

Todo este conjunto se encuentra soportado por una placa de acrílico de 5 mm de grosor color blanco otorgándole una robustez y mejor ubicación del ventilador, tal como se observa en la figura 48.

También hay que observar la conectividad de elementos electrónicos adicionales tales como es un fusible, paro de emergencia, led indicadores color rojo y verde y un interruptor eléctrico de encendido/apagado.



**Figura 48 Bloque de ubicación del Arduino Uno Rev 3.0, CNC Shield, Driver A4988 y Ventilador**

### 3.2.2 Conexión eléctrica para la sonda de palpación

La sonda es un dispositivo simplificado que se comporta como un evidente interruptor normalmente cerrado (NC), donde la sonda está provista de un cable que se tendrá que conectarse al controlador y para lo cual las conexiones que necesita se muestra en la figura 49, haciendo necesario hacer uso de una placa PCB diseñada en la sección 2.17.

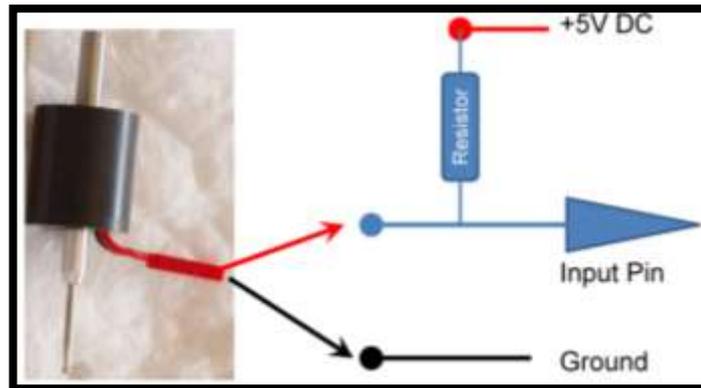


Figura 49 Esquema de conexión de la sonda

### 3.2.3 Configuración de la resolución de los motores pap nema 17

Los motores paso a paso nema 17 tienen una especificación de tamaño de paso (Resolución), en donde el driver Pololu A4988 permite tener resoluciones más altas admitiendo pasos intermedios haciendo que la activación de los bobinados sean con niveles de corriente intermedios obteniendo desplazamientos más precisos.

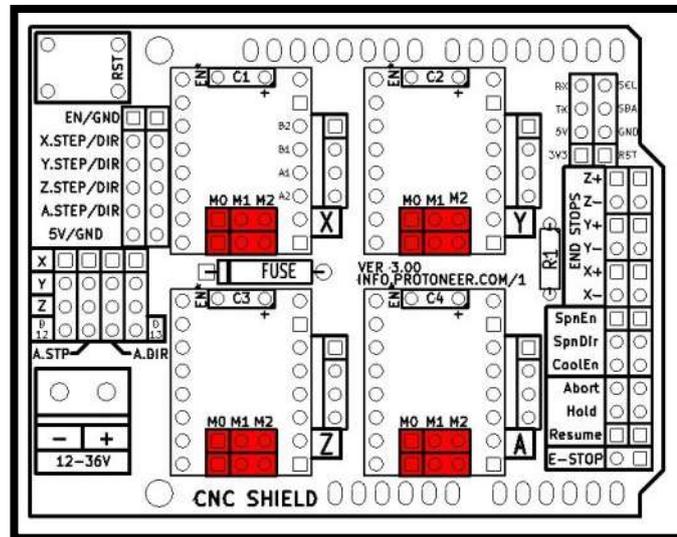
Se realizó la configuración de la resolución a la que funciona idóneamente la máquina y para poder modificar la resolución existen distintos valores como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16

#### Resolución del driver A4988 POLOLU

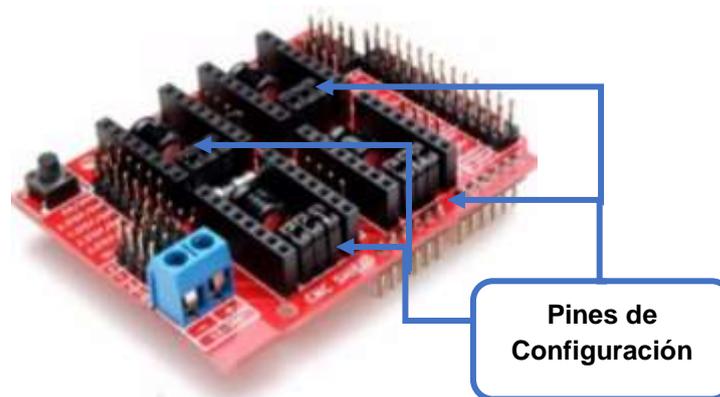
MS0	MS1	MS2	MICROPASOS	RESOLUCIÓN
Low	Low	Low	Full step	1
High	Low	Low	Half step	2
Low	High	Low	Quarter step	4
High	High	Low	Eighth step	8
High	High	High	Sixteenth step	16

Se escogió una resolución de 1 debido a que con un valor más alto se disminuye el torque de los motores lo que no se desea y para cambiar el valor de la resolución se ubica en la tarjeta CNC Shield los pines correspondientes y se cambia la configuración como se muestra en la figura 49.



**Figura 50 Pines de Configuración de Resolución**

Para realizar el cambio de la resolución de la máquina se efectúa mediante el cambio de pines en la placa CNC Shield Arduino v3.0 como se indica en la figura 51 y dependiendo de la configuración que se requiera se puentea los pines tal como lo indica en la tabla 16.



**Figura 51 Pines de resolución de la tarjeta CNC Shield Arduino v3.0**

### 3.3 Etapa del sistema de control

Para la implementación del control de la estación para que pueda realizar los movimientos requeridos para la medición, se emplea el hardware seleccionado en el apartado 2.9.2, siendo la placa principal Arduino Uno Rev

3 en el cual se carga un archivo hexadecimal de programación llamado `grbl_0.9i_x_Carve_500mm_ACME.hex` disponible en la red para su descarga gratuita.

En la parte del control, el software se encarga de establecer la comunicación entre la computadora y la estación de control de calidad, mostrar información sobre el estado de la máquina en una pantalla, así como una comunicación bidireccional entre ambos, el controlador de la etapa de movimiento de los motores y adquisición del señal de la sonda de palpado.

La solución optada en este proyecto es el software GRBL Controller 3.0 el cual es un software libre, ideal para trabajar con la plataforma de Arduino Uno Rev 3, siendo este programa donde se va a programar, visualizar el movimiento de ejes X, Y, Z, configurar el cero de la máquina, los sensores de final de carrera, adquisición del valor de posición de la sonda de palpación entre otros.

### **3.3.1 Funcionamiento y preparación de GRBL BCNC**

El programa es insertado a la placa Arduino Uno Rev 3.0 a través de un cable USB que actúa como puerto serial y para ello, se requiere del IDE que se puede descargar gratuitamente desde la página oficial de Arduino y a su vez, este IDE contiene los drivers de la placa, por lo que la configuración es muy sencilla.

El programa de GRBL que va a correr sobre Arduino, el cual consiste en un sketch que se carga sobre el ATmega328 y permite a la placa Arduino interpretar el código G y enviar las señales de control a los drivers.

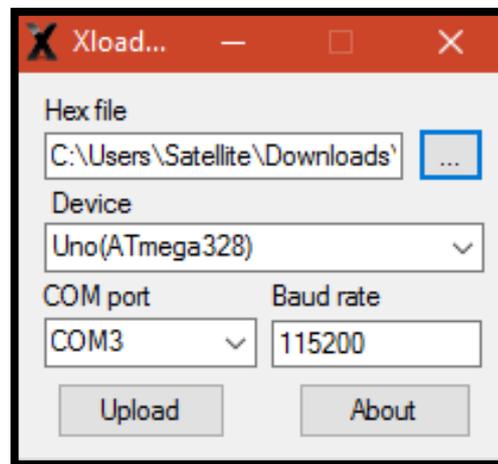
Está especialmente diseñado para trabajar sobre la placa Arduino Uno, aunque también se puede adaptar sobre otras que dispongan del microprocesador ATmega328.

GRBL no es autónomo, es decir, requiere de un software adicional que envíe a Arduino el código G, del que más adelante se hablará, debido a la limitada memoria de Arduino UNO, GRBL permite interpretar la mayoría de operaciones que generan los programas CAM, pero sin embargo, no es

sumamente bueno interpretando código realizado por los operarios ya que no soporta estructuras de control, variables ni funciones, además no permite instalar un display por lo que la comunicación se realiza únicamente mediante comandos de Códigos G.

El programa o sketch de GRBL se encuentra dentro de un fichero hexadecimal, por lo que no se puede introducir directamente desde el IDE de Arduino al microcontrolador, para realizarlo correctamente, se debe de utilizar un programa específico para flashear sobre el microcontrolador el firmware, en este proyecto, se ha empleado XLoader v1.00, véase la figura 52.

Hay que tener presente que antes de flashear Arduino, los drivers de Arduino UNO tienen que estar instalados.



**Figura 52 Presentación de XLoader**

- **Hex file:** Es el directorio donde se encuentra el archivo de código fuente de GRBL en hexadecimal.
- **Device:** GRBL solamente es compatible con el microcontrolador ATmega 328. Se recomienda flashear únicamente Arduino Uno, que obviamente dispone de este microcontrolador.
- **COM port:** puerto donde está conectada la tarjeta de Arduino.
- **Baud rate:** Se recomienda una velocidad de 115200, de forma que la transferencia sea lo más rápida posible.

Una vez realizado los pasos mencionados, se hace click en "Upload" y si el puerto está correctamente seleccionado GRBL comenzará a volcarse en la tarjeta y comenzará a parpadear y posteriormente una vez finalizado este

proceso, XLoader no volverá a hacer falta realizar este procedimiento en otra ocasión.

Es importante destacar que si la placa Shield CNC V3.0 de GRBL se encuentra conectado a la tarjeta Arduino Uno Rev 3.0 este proceso no va llevar a cabo, ya que los pines 0 y 1 (Tx y Rx) se deben de encontrar libres cuando se programa la tarjeta desde el ordenador, por lo que se recomienda flashear la tarjeta Arduino Uno sin el módulo de Shield CNC V3.0.

### 3.3.2 Introducción al funcionamiento del programa GRBL BCNC

Este software posee una gran variedad de características que permiten de una manera sencilla y básica configurarlo y manipularlo, siendo un programa especializado en proyectos de fresado, impresoras 3D, cortadoras láser, manufactura automático para circuitos impresos, entre otros,

Las características y funciones que tiene se describen de forma detallada para su comprensión

### 3.3.3 Configuración de GRBL v0.9i para la estación de control

Grbl tiene un sistema de comandos '\$' para ajustar la configuración y las instrucciones de tiempo de ejecución para la puesta en marcha, véase figura 53, una vez que se conecte, ver pasos de conectividad en la sección 4.1.4, se hace clic \$ en la pestaña "terminal" y se pulsa enter donde GRBL responderá con los valores de configuración global establecidos en el software:

```
$$ (view Grbl settings)
 $# (view # parameters)
 $G (view parser state)
 $I (view build info)
 $N (view startup blocks)
 $x=value (save Grbl setting)
 $Nx=line (save startup block)
 $C (check gcode mode)
 $X (kill alarm lock)
 $H (run homing cycle)
 ~ (cycle start)
 ! (feed hold)
 ? (current status)
 ctrl-x (reset Grbl)
```

**Figura 53 Configuración global de GRBL**

De estos comandos, sólo cuatro de ellos se utilizan para configurar Grbl [\$\$, \$x=value, \$N, \$Nx=line] mientras que el resto son comandos de tiempo de ejecución que informan del estado actual en Grbl o modifican su comportamiento.

#### A. Comandos de configuración: “\$\$”, \$X=val, \$N y \$Nx=line

Cuando se conecte a Grbl en la pestaña de comandos escriba \$\$ y presione enter, Grbl responde con una lista de valores actuales del sistema, como se muestra en la siguiente lista, figura 54, donde todos estos ajustes son persistentes y se mantiene en la EEPROM, aunque se apaga el equipo.

```

$0=10 (step pulse, usec)
$1=25 (step idle delay, msec)
$2=0 (step port invert mask:00000000)
$3=6 (dir port invert mask:00000110)
$4=0 (step enable invert, bool)
$5=0 (limit pins invert, bool)
$6=1 (probe pin invert, bool)
$10=3 (status report mask:00000011)
$11=0.020 (junction deviation, mm)
$12=0.002 (arc tolerance, mm)
$13=0 (report inches, bool)
$20=0 (soft limits, bool)
$21=1 (hard limits, bool)
$22=0 (homing cycle, bool)
$23=0 (homing dir invert mask:00000000)
$24=50.000 (homing feed, mm/min)
$25=310.000 (homing seek, mm/min)
$26=250 (homing debounce, msec)
$27=1.000 (homing pull-off, mm)
$100=160.000 (x, step/mm)
$101=160.000 (y, step/mm)
$102=160.000 (z, step/mm)
$110=310.000 (x max rate, mm/min)
$111=310.000 (y max rate, mm/min)
$112=310.000 (z max rate, mm/min)
$120=30.000 (x accel, mm/sec^2)
$121=30.000 (y accel, mm/sec^2)
$122=30.000 (z accel, mm/sec^2)
$130=180.000 (x max travel, mm)
$131=185.000 (y max travel, mm)
$132=60.000 (z max travel, mm)
ok

```

Figura 54 Lista de configuración de GRBL

## **B. \$N (Ver los bloques de inicio) y \$Nx=line (Guardar bloque de inicio)**

\$NX son los bloques de inicialización que Grbl ejecuta cada vez que se enciende Grbl o se resetea Grbl, en otras palabras, es una línea de "código g" que puede correr en Grbl automáticamente al iniciarse el software.

## **C. Configuración y su significado de \$X=VAL**

Para cambiar la configuración en alguno de los apartados se debe escribir en la pestaña de comandos el numeral a modificar de la manera "\$100=160" y dar enter, seguidamente ingresar "\$\$" y enter y así se guardará un nuevo dato ingresado, \$\$ (*Ver la configuración Grbl*) y \$x = val (*Guardar configuración Grbl*), a continuación se detallan cada uno de los apartados y su significado:

- **\$0 (Pulsos de paso, microsegundos)**

Los drivers de motores paso a paso están especificados para una determinada longitud de pulsos de paso mínima, si los pulsos son demasiado largos podría encontrarse con problemas para ejecutar el sistema a altas velocidades de avance, generalmente algo entre 5 y 50 microsegundos funciona bien.

- **\$1 Paso de retraso de inactividad (mseg)**

Cada vez que los motores completan un movimiento y se paran, Grbl retrasará la desactivación de los mismo por el valor establecido y se puede mantener los ejes habilitados (alimentados con el fin de mantener la posición) estableciendo un de valor 255 milisegundos, donde el tiempo de bloqueo de inactividad es el tiempo de duración que Grbl mantendrá los motores bloqueados antes de inhabilitar.

- **\$2 Paso de puerto invertido**

Este ajuste invierte la señal de impulso de paso, de manera predeterminada, una señal de paso comienza en bajo y se va en lo alto en un

evento de impulso de paso, esta configuración de máscara invertida es un valor que almacena los ejes para invertir como indicadores de bits como se muestra en la tabla 17.

Si se desea invertir los ejes X y Z, que le envía “\$2=5” (step port invert mask:00000101).

**Tabla 17**

**Inversión de sentido de los ejes**

Fijando el valor	Máscara	Invertir X	Invertir Y	Invertir Z
0	00000000	norte	norte	norte
1	00000001	Y	norte	norte
2	00000010	norte	Y	norte
3	00000011	Y	Y	norte
4	00000100	norte	norte	Y
5	00000101	Y	norte	Y
6	00000110	norte	Y	Y
7	00000111	Y	Y	Y

- **\$3 Dirección de puerto**

Este ajuste invierte la señal de dirección de cada eje, de forma predeterminada, Grbl supone que los ejes se mueven en una dirección positiva cuando la señal de activación es bajo, y una dirección negativa cuando es alto.

- **\$4 Paso invertido**

Por defecto, el paso de los motores se encuentra con el pin en alto lo que lo deshabilita y con señal en bajo para permitir o habilitar, si la configuración requiere lo contrario, simplemente hay que invertir mediante “\$4=1” y para desactivar “\$4=0”.

- **\$5 Pines de límite invertido**

Los límites se llevan a cabo normalmente con una resistencia en pull-up interna del Arduino Uno Rev 3.0, cuando un pin de límite (Final de carrera) es bajo, Grbl interpreta esto como un disparo de accionamiento y para el

comportamiento opuesto, simplemente hay que invertir escribiendo “\$5=1” y para desactivar “\$5=0”.

- **\$6 - Pin de sonda invertido**

De manera predeterminada en el software, la sonda se conecta a una resistencia pull-up interna de la Arduino Uno Rev 3.0, cuando la sonda da una señal en bajo, Grbl interpreta esto como disparado y para un comportamiento opuesto, simplemente hay que invertir la señal de la sonda escribiendo “\$6=1”y desactivarlo con “\$6=0”.

En este proyecto la sonda se encuentra conectado a una resistencia en pull-up externo, de manera que da una señal en bajo para lo cual se necesita que se dispare y de una señal en alto por lo que se debe mantener en el valor establecido de “6=1”.

- **\$10 - Informe de estado binario**

Esta configuración determina qué datos en tiempo real Grbl informa al usuario de forma predeterminada, Grbl dará posición de la máquina, y la posición de trabajo.

Tres características adicionales de presentación de informes están disponibles que son útiles para las interfaces del usuario, para fijarlos, se utiliza la tabla 18, por ejemplo, si necesita posiciones de la máquina y de trabajo, añadir los valores 1 y 2 y establecer en Grbl “\$10=3” o si es necesario solo la posición de la máquina y el estado del pin límite (Final de carrera), hay que ingresar los valores 1 y 16 colocar en Grbl \$10=17.

**Tabla 18**  
**Informes disponibles en GRBL**

Tipo de informe	Valor
Posición de la máquina	1
Posición de trabajo	2
Planificador de Buffer	4
RX Buffer	8
Final de Carreras	16

- **\$11 Desviación de curvas**

La desviación de unión de curvas es utilizada por el manager de aceleración para determinar la rapidez con que puede moverse a través de un camino curvo.

- **\$12 Tolerancia de Arco (mm/segmento)**

GRBL renderiza círculos y arcos mediante la subdivisión de ellos en líneas muy pequeñas, los valores más bajos dan una mayor precisión, pero puede dar lugar a problemas de rendimiento.

Para que sea posible hacer arcos G02/03 en Grbl, el software aproxima la ubicación del siguiente segmento de arco con una pequeña aproximación de ángulo y la corrección de n-ésimo arco es el número de segmentos de arco aproximados realizados antes de que Grbl calcule un segmento de arco exacto para corregir el valor de error de aproximación.

- **\$13 Informe en pulgadas, milímetros**

GRBL v0.9i tiene una función de informe de posicionamiento en tiempo real para proporcionar a los usuarios una retroalimentación sobre donde se encuentra exactamente la máquina en ese momento para ello este comando establece que los valores sean tomados en pulgadas o en milímetros.

- **\$20 Límites suaves**

Es una característica de seguridad para ayudar a prevenir que la máquina se recorra demasiado y más allá de los límites de desplazamiento, su acción consiste en conocer los límites máximos de recorrido de cada eje y donde Grbl encuentra en las coordenadas de la máquina.

Los límites suaves requiere un home para estar habilitado y la configuración máximas de recorrido de eje precisa, porque Grbl necesita saber dónde está, "\$20=1" para habilitar y "\$20=0" para deshabilitar.

- **\$21 Límites duros**

El trabajo de estos límites es similar al de límites suaves, pero con el uso de conmutadores físicos en lugar de pulsadores y básicamente interruptores (mecánicos, magnéticos, ópticos), cuando el interruptor se dispara, se detendrá inmediatamente todo movimiento, y entra en el modo de alarma, lo que le obliga a comprobar la máquina y restablecer todo.

- **\$22 Ciclo de búsqueda de home**

El ciclo de Home se utiliza para localizar con exactitud y precisión la posición cero en la máquina (también conocido como cero de máquina) cada vez que arranque su Grbl entre sesiones.

Para configurar el ciclo de home de Grbl, es necesario tener fines de carrera en una posición fija que no va a ser golpeada o movida, o bien su punto de referencia sea erróneo.

- **\$23 Home invertido**

De forma predeterminada, Grbl asume que sus finales de carrera son posición de referencia de home en la dirección positiva, en primer lugar mueve el eje z positivo, entonces mueve los ejes x e y en dirección positiva antes de tratar de localizar exactamente el cero de máquina yendo y viniendo lentamente alrededor del switch.

Si la máquina tiene un interruptor de límite en la dirección negativa, la máscara de dirección home puede invertir el sentido de los ejes.

- **\$24 Alimentación de Home (mm/min)**

Después de que encuentra el home, la máquina se mueve a una velocidad de avance más lento para una ubicación precisa del origen de la misma, la velocidad de alimentación se toma de referencia a la velocidad de alimentación más lento.

- **\$25 Velocidad de búsqueda de Home (mm/min)**

El home se busca a la velocidad de búsqueda de objetivos o la velocidad a la que primero intenta encontrar los finales de carrera.

- **\$26 - Home sin rebote (ms)**

Cada vez que un interruptor se activa, puede tener ruido electro/mecánico que en realidad "rebotan" la señal en nivel alto y bajo durante unos milisegundos antes de asentarse, para lo cual, es necesario evitar este rebote de la señal, ya sea por hardware con algún tipo de acondicionador de señal o por software con un pequeño retraso para que acabe el rebote de la señal.

Grbl realiza una breve demora sólo en home cuando localiza el cero de máquina y establece un valor de retardo para evitar una repetición del ciclo de home, en la mayoría de los casos se utiliza 5 a 25 milisegundos.

- **\$27 - Home Pull-Off (mm)**

Ayuda a prevenir la activación accidental del límite duro después de un ciclo de búsqueda del home.

- **\$100, \$101 y \$102 - [X, Y, Z] (pasos/mm)**

Para calcular los pasos/mm para cada eje se necesita saber:

1. Los mm por revolución del tornillo de avance.
2. Los pasos completos por revolución de los motores paso a paso (normalmente 200).
3. Los micro-pasos por paso del driver Pololu A4988 (normalmente 1, 2, 4, 8 o 16).

Los pasos/mm se calculan de la siguiente manera así:

$$\text{pasos por mm} = \frac{\text{pasos por revolución} \cdot \text{micropasos}}{\text{mm por revolución}} \quad (\text{Ecu. 7})$$

Hay que calcular este valor para cada eje y escribir estos valores en la configuración de Grbl numeral 100, 101 y 102 de la figura 54.

- **\$110, \$ 111 y \$ 112 - [X, Y, Z] Velocidad máxima (mm/min)**

Establece la velocidad máxima que cada eje puede moverse, siempre que Grbl planea un movimiento, se comprueba si el movimiento que hace cualquiera de estos ejes individuales superar su velocidad máxima, haciendo ralentizar el movimiento para asegurar que ninguno de los ejes excede a los límites de la frecuencia máxima.

Esto significa que cada eje tiene independientemente su propia velocidad, que es extremadamente útil para limitar el eje Z típicamente más lento y la forma más sencilla de determinar estos valores es probar cada eje una a la vez aumentando lentamente su velocidad y moverla, se sabrá que se ha alcanzado el umbral máximo de velocidad cuando los motores paso a paso se estancan y hacen un poco de ruido, un valor adecuado es aproximadamente un 10-20% por debajo de este valor.

- **\$120, \$121, \$ 22 - [X, Y, Z] Aceleración (mm/s<sup>2</sup>)**

Esto establece los parámetros de aceleración, un valor bajo hace que Grbl alivie y haga lento los movimiento, mientras que un valor más alto produce movimientos más estrictos, duros y alcanza las velocidades de avance deseados mucho más rápido y al igual que el ajuste de la velocidad máxima, cada eje tiene su propio valor de aceleración y son independientes entre sí.

- **\$130, \$131, \$132 - [X, Y, Z] Límites máximos (mm)**

Aquí se establece el recorrido máximo real de punta a punta para cada uno de los ejes medido en mm.

#### **D. Comandos internos de Grbl \$G, \$#, ?.**

Grbl proporciona tres comandos para informar de su estado actual y dónde se encuentra, de estos tres, uno de ellos está en tiempo real, respondiendo

con la posición actual, en cuanto los otros dos no lo son, sino que responden a los bloques entrantes que serán procesados en función de los seteos de estado seleccionados por código g, configuraciones, o switches.

- **\$G (Visualizador del analizador de códigos G)**

Este comando imprime todos los modos de código G activos que el analizador interpretará de cualquier comando entrante, estos modos incluyen los modos de pulgadas/mm G20/G21, los sistema de coordenadas de trabajo activo G54-G59, los modos de movimiento activo G0/G1/G2/G3, la selección de plano activo G17/G18/G19, los de modos absoluto G90/G91, los de modo de feed rate inversos G93/G94, los de modo de medición G38/G939, los de flujo del programa M0/M1/M2, y los de feed rate activo F, también cuando se llama, Grbl devolverá una línea como esta:

```
[G0 G54 G17 G21 G90 G94 M0 M5 M9 T0 F500 0,000]
```

- **\$# (Visualización de parámetros de código G)**

Los parámetros en código G por lo general almacenan los offsets de coordenadas de trabajo G54-G59 y las posiciones iniciales G28/G30 que no debe confundirse con el cero de máquina, estas posiciones iniciales pueden ser seleccionadas en cualquier parte del espacio de la máquina por los comandos G28.1/G30.1, la mayoría de estos parámetros se escriben directamente en la memoria EEPROM en cualquier momento que se cambien y permanecen almacenados.

- **? (Estado actual)**

El comando "?" devuelve inmediatamente los estados activos de Grbl y la posición actual en tiempo real, tanto en coordenadas de máquina como en coordenadas de trabajo, esto puede ser enviado en cualquier momento y funciona de forma asíncrona con todos los demás procesos que Grbl está haciendo.

En la selección de seteo "\$13" de Grbl, determina si se declara en milímetros o en pulgadas cuando "?" es presionado, el software responderá inmediatamente la figura 55.



< Idle , MPO : 5.529 , 0.560 , 7.000 , WPOS : 1.529 , - 5.440 , - 0.000 >

**Figura 55 Estado actual en Grbl**

1. **Inicio (Idle):** Todos los sistemas están listos y preparados para cualquier operación.
2. **En cola (Queue):** Movimiento(s) que se ponen en cola en el planificador de buffer esperando por el ciclo de inicio de marcha.
3. **Corriendo (Run):** Indica que un ciclo está en marcha.
4. **(Hold):** Un feed hold se encuentra en proceso de ejecución o desacelerando hasta detenerse, después de que el hold se haya completado, Grbl entrará en un estado de cola, en espera de un ciclo de inicio para reanudar el programa.
5. **Home:** Un ciclo de home.
6. **Alarm:** indica que algo ha salido mal o Grbl no sabe su posición, en este estado se bloquean todos los comandos de códigos g.
7. **Check:** Grbl está en modo de chequeo de código g, se procesará y responderá a todos los comandos de códigos de g, pero no moverá o encenderá cualquier cosa.

### 3.3.4 Configuración de GRBL para la estación de control de calidad

A continuación se explicará y justificará la configuración realizada en el software GRBL mostrada en la figura 53, a partir de los comandos de configuración para trabajar y calibrar la estación, o siendo necesarios en nuestro caso modificar todos los comandos mencionados en las secciones anteriores.

### a. Pasos por milímetro para ejes X, Y y Z

Para el funcionamiento de los ejes X, Y y Z la transmisión del movimiento se realiza en base a varillas roscadas comúnmente llamados “tornillo sin fin”.

Para los ejes X, Y y Z la relación entre el número de pasos y la cantidad de milímetros recorridos se establece a partir del número de pasos que posee el motor, los micropasos que entregue el driver de motor y el paso de hilo de la varilla dentada (thread pitch) usada como eje sin fin.

Como los motores paso a paso utilizados en la estación entregan 200 pasos por vuelta y los drivers se encuentran configurados para trabajar en 1 micropaso, varilla roscada de 8 mm de diámetro y paso de 1.25, entonces el número de pasos que se necesita para avanzar 1 mm es:

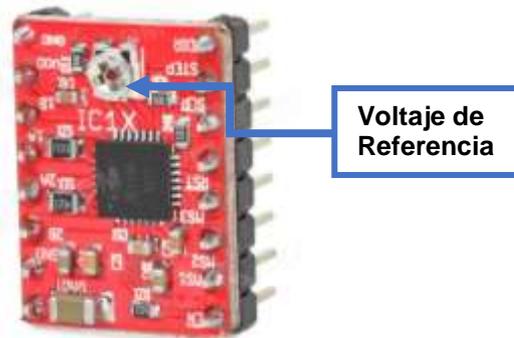
$$\text{pasos por mm} = \frac{\text{pasos por revolución} \cdot \text{micropasos}}{\text{mm por revolución}} = \frac{200 \cdot 1}{1.25} = 160 \quad (\text{Ecu. 8})$$

Este valor es el que debemos incorporar en GRBL para que la máquina establezca el número de pasos que debe generar para recorrer 1 mm de desplazamiento.

### 3.4 Regulación de voltaje de referenica VREF para los motores PAP

Los motores paso a paso tienen la característica de regularse por medio de la intensidad, ofreciéndonos el integrado Pololu A4988 un tornillo ajustable para variar e introducir la corriente justa y necesaria para los motores.

Con los motores desconectados, y el integrado alimentado en la CNC Shiedl Arduino v3.0 alimentado a 12 VDC, se procede a medir el voltaje con el multímetro en el agujerito (Vref), véase figura 56 que se encuentra en el driver, tomando GND de referencia se podrá obtener un voltaje el cual se lo debe variar siendo este un potenciómetro del chip.



**Figura 56 Voltaje de referencia en el driver Pololu A4988**

Para esto se debe hacer el cálculo, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Intensidad de Corriente} = 2.5 * X \quad (\text{Ecu. 9})$$

De la cual despejaremos X:

$$X = \frac{\text{Intensidad de Corriente}}{2.5} \quad (\text{Ecu. 10})$$

Los motores paso a paso con los que se cuenta en este proyecto son de la numeración SST43D2121, los cuales son bipolares de 200 pasos por revolución, torque de 5.5 kg/cm y corriente de 1.5 A por fase por lo que la ecuación anterior queda de la siguiente manera:

$$X = \frac{\text{Intensidad de Corriente}}{2.5} = \frac{1.5 A}{2.5} = 0.6 V \quad (\text{Ecu. 11})$$

Por lo que se concluye que el voltaje de referencia necesario para dichos motores paso a paso es de 0.6 V el cual mediante la ayuda de un voltímetro hay que establecerlo en los tres drivers Pololu A4988 controladores de los ejes X, Y, y Z, haciendo que este chip entregue 3 A a cada uno de los motores.

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

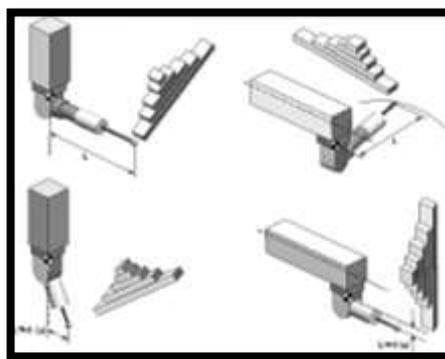
Una vez acoplado la estación de control de calidad, en este apartado se procede a comprobar el correcto funcionamiento de las partes eléctricas, electrónicas, mecánicas, programación y comunicación de los elementos que conforman el módulo dentro de la celda de manufactura.

#### 4.1 Pruebas Mecánicas

Dentro de la norma internacional ISO 10360-2009, se especifican distintas pruebas de aceptación, mediante las cuales se puede verificar el desempeño de una máquina dedicada al control de calidad.

Las pruebas de aceptación de la ISO 10360 son únicamente aplicables a máquinas de medición por coordenadas de tipo cartesiano que usa un sistema de palpación, tal como se encuentra implementada la estación de control de calidad de este proyecto.

Previamente se debe hacer mención a la longitud de compensación del palpador al eje del brazo porta-palpador (soporte de la sonda), en el cual "L" es la distancia entre la extremidad del palpador y un punto de referencia, véase figura 57.



**Figura 57 Longitudes de compensación**

##### 4.1.1 Error de medición de longitud

La prueba se la lleva a cabo según ISO 10360-2, teniendo una longitud de compensación de 60 mm, donde se deben tomar 105 muestras, obtenidos con 5 diferentes longitudes de prueba, las cuales deben ser medidas 3 veces en

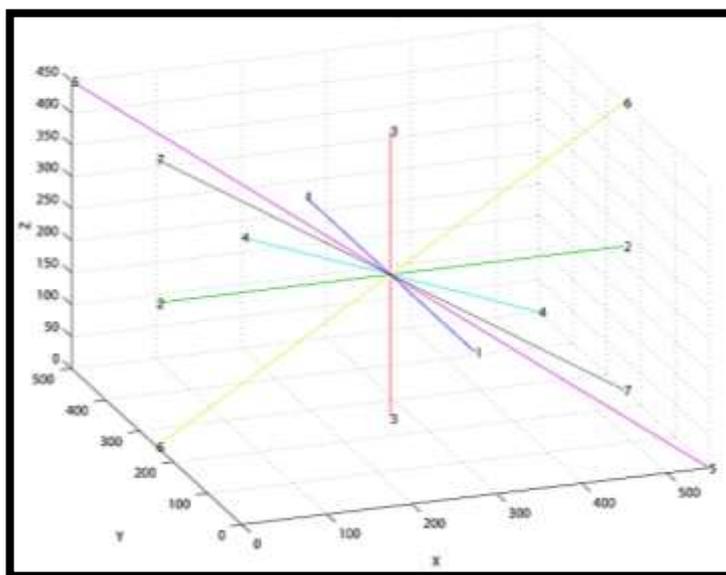
7 diferentes posiciones, véase figura 58, tanto en localizaciones como en orientaciones dentro del volumen de medición de la estación.

**Tabla 19**

**Puntos de orientación dentro del área de trabajo**

Número de posiciones	Orientación en dentro del volumen de medición	Requerida o por defecto
1	A lo largo de una diagonal en el espacio del punto (1,0,0) al (0,1,1).	Requerida
2	A lo largo de una diagonal en el espacio del punto (1,1,0) al (0,0,1).	Requerida
3	A lo largo de una diagonal en el espacio del punto (0,1,0) al (1,0,1)	Requerida
4	A lo largo de una diagonal en el espacio del punto (0,0,0) al (1,1,1).	Requerida
5	Paralelo a las escalas de la máquina del punto (0, ½, ½) al (1, ½, ½).	Si el usuario lo especifica
6	Paralelo a las escalas de la máquina del punto (½, 0, ½) al (½, 1, ½).	Si no se especifica
7	Paralelo a las escalas de la máquina del punto (½, ½, 0) al (½, ½, 1).	Nada

**Las esquinas del volumen de medición se asumen como (0,0,0) y (1,1,1) en las coordenadas X, Y, Z.**



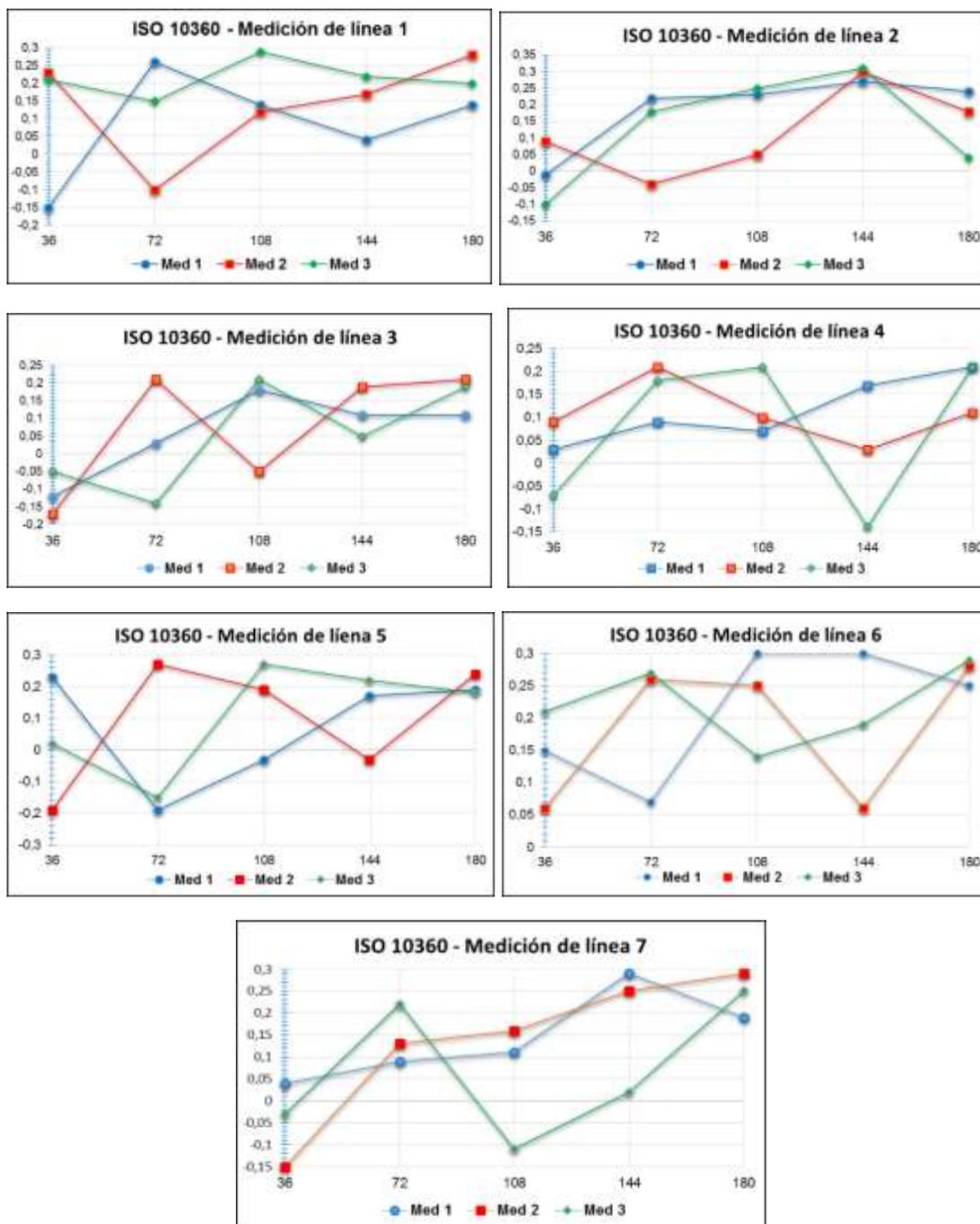
**Figura 58 Algunos ejemplos de líneas de medición**

En la tabla 20 se puede observar los 105 valores obtenidos de acuerdo a 7 líneas de desplazamiento en 5 longitudes en 3 tiempos distintos establecidas de acuerdo al volumen de medición de la estación de control de calidad, la cual es de 180 mm en el eje X, 185 mm en el eje Y y 60 mm en el eje Z, obteniendo un promedio de error en cada una de las mediciones.

Tabla 20

## Resultados de la prueba error de longitud de medición

Número de Posición	Longitudes	Valores obtenidos			Error de longitud			Promedio de errores
		Núm. 1	Núm. 2	Núm. 3	Núm. 1	Núm. 2	Núm. 3	
1	180	180,14	180,28	180,20	0,14	0,28	0,20	0,21
	144	144,04	144,17	144,22	0,04	0,17	0,22	0,14
	108	108,14	108,12	108,29	0,14	0,12	0,29	0,18
	72	72,26	71,90	72,15	0,26	-0,10	0,15	0,10
	36	35,85	36,23	36,21	-0,15	0,23	0,21	0,10
2	180	180,24	180,18	180,04	0,24	0,18	0,04	0,15
	144	144,27	144,30	144,31	0,27	0,30	0,31	0,29
	108	108,23	108,05	108,25	0,23	0,05	0,25	0,18
	72	72,22	71,96	72,18	0,22	-0,04	0,18	0,12
	36	35,99	36,09	35,90	-0,01	0,09	-0,10	-0,01
3	180	180,11	180,21	180,19	0,11	0,21	0,19	0,17
	144	144,11	144,19	144,05	0,11	0,19	0,05	0,12
	108	108,18	107,95	108,21	0,18	-0,05	0,21	0,11
	72	72,03	72,21	71,86	0,03	0,21	-0,14	0,03
	36	35,88	35,83	35,95	-0,12	-0,17	-0,05	-0,11
4	180	180,21	180,11	180,21	0,21	0,11	0,21	0,18
	144	144,17	144,03	143,86	0,17	0,03	-0,14	0,02
	108	108,07	108,10	108,21	0,07	0,10	0,21	0,13
	72	72,09	72,21	72,18	0,09	0,21	0,18	0,16
	36	36,03	36,09	35,93	0,03	0,09	-0,07	0,02
5	180	180,19	180,24	180,18	0,19	0,24	0,18	0,20
	144	144,17	143,97	144,22	0,17	-0,03	0,22	0,12
	108	107,97	108,19	108,27	-0,03	0,19	0,27	0,14
	72	71,81	72,27	71,85	-0,19	0,27	-0,15	-0,02
	36	36,23	35,81	36,02	0,23	-0,19	0,02	0,02
6	180	180,25	180,28	180,29	0,25	0,28	0,29	0,27
	144	144,30	144,06	144,19	0,30	0,06	0,19	0,18
	108	108,30	108,25	108,14	0,30	0,25	0,14	0,23
	72	72,07	72,26	72,27	0,07	0,26	0,27	0,20
	36	36,15	36,06	36,21	0,15	0,06	0,21	0,14
7	180	180,19	180,29	180,25	0,19	0,29	0,25	0,24
	144	144,29	144,25	144,02	0,29	0,25	0,02	0,19
	108	108,11	108,16	107,89	0,11	0,16	-0,11	0,05
	72	72,09	72,13	72,22	0,09	0,13	0,22	0,15
	36	36,04	35,85	35,97	0,04	-0,15	-0,03	-0,05



**Figura 59 Valores promedios de cada uno de las líneas 7 mediciones**

En la tabla del anexo B1 h. 1, se puede observar todos los datos relacionados a la obtención de la precisión y repetibilidad de la estación de control de calidad.

De los resultados obtenidos de las pruebas y como se detalla en el anexo B2, siguiendo la norma ISO 10360-2, se toma los valores promedios de los puntos que se evaluaron y se determina los valores de precisión y repetibilidad aplicando sus ecuaciones determinadas.

**A. Precisión de posicionamiento:** Es la diferencia entre la posición de un punto programado y la posición alcanzada.

**B. Repetibilidad de posición (RP):** Expresa la dispersión de las posiciones alcanzadas después de visitar n veces una posición programada en la misma dirección.

### C. Interpretación de resultados

Los valores de precisión se encuentran calculados en anexo B1 h. 1 y para la interpretación de los resultados se observa en la tabla 21 una sección de la misma representado el valor de precisión obtenida de la estación.

**Tabla 21**

#### Obtención de la precisión

Núm. de pos.	L	Valores obtenidos			Error de longitud			Prom. Error	Precisión
		Num. 1	Num. 2	Num. 3	Num. 1	Num. 2	Num. 3		
2	180	180,24	180,18	180,04	0,24	0,18	0,04	0,15	0,10
	144	144,27	144,30	144,31	0,27	0,30	0,31	0,29	<b>0,02</b>
	108	108,23	108,05	108,25	0,23	0,05	0,25	0,18	0,11
	72	72,22	71,96	72,18	0,22	0,04	0,18	0,15	0,09
	36	35,99	36,09	35,90	0,01	0,09	0,10	0,07	0,05

De acuerdo a los cálculos elaborados, el promedio de precisión de la estación de control de calidad es de **0.02 mm** por lo cual con este valor se concluye como aceptable tomando en comparación con la estación Cristal Plus M544 de la marca Mitutoyo la cual posee una precisión **0.005 mm**, poniendo en consideración que este proyecto es implementado en todas sus partes constitutivas con componentes y materiales adquiridos y donados por el laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

El error porcentual de las mediciones es de **0.1087%**, como se muestra en el anexo B1 h. 1, lo que refleja una proximidad muy cercana del resultado de la medición al valor real, es decir que en la estación de control de calidad se obtiene un **99.8913%** de exactitud en la cercanía de concordancia de una medición al valor verdadero del mesurando, concluyendo que el módulo emite una medición veraz y verídico en su labor de tomas de medidas.

El valor obtenido de repetibilidad es de **0,13017752 mm** evaluado en los diferentes puntos de prueba, donde se puede concluir que la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo las mismas condiciones de mediciones es regular y discreto frente al valor que presenta la máquina Cristal Plus M544 de **0.0034 mm**, indicándonos que el dispositivo comercial presenta mejores condiciones en este apartado, motivando a la introducción de posibles mejoras del proyecto en el futuro para obtener una mejor repetibilidad.

#### 4.1.2 Pruebas de medición en piezas mecanizadas

Para este fin se elaboró el mecanizado de una circunferencia de 40 mm de diámetro en el Centro de Mecanizado Vertical CNC de 5 ejes y en la ExpertMill VMC-0600 y la prueba consiste en tomar 12 muestras y analizar los datos en comparación con el valor real de diámetro.

**Tabla 22**

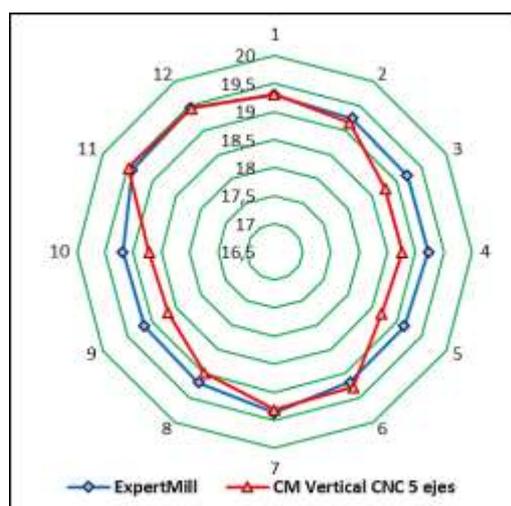
#### **Mediciones de la circunferencia mecanizada en el Centro de Mecanizado ExpertMill VMC-0600**

Punto	X (mm)	Y(mm)	Radio	Error relativo porcentual
1	-0,006	19,300	19,300001	3,50%
2	9,606	16,675	19,243982	3,78%
3	16,631	9,625	19,215379	3,92%
4	19,225	0,019	19,225009	3,87%
5	16,588	-9,563	19,147133	4,26%
6	9,594	-16,612	19,183414	4,08%
7	-0,006	-19,369	19,369001	3,15%
8	-9,606	-16,606	19,184225	4,08%
9	-16,600	-9,563	19,157530	4,21%
10	-19,181	0,019	19,181009	4,09%
11	-16,800	9,719	19,408734	2,96%
12	-9,731	16,862	19,468421	2,66%
<b>Promedio</b>			19,256987	
<b>Precisión (Desviación Estándar)</b>			0,08636838	
<b>Promedio error relativo porcentual</b>			3,72%	

Tabla 23

**Mediciones de la circunferencia elaborada en el Centro de Mecanizado Vertical CNC de 5 ejes**

Punto	X (mm)	Y(mm)	Radio	Error relativo porcentual
1	0,038	19,306	19,306037	3,47%
2	9,6	16,575	19,154389	4,23%
3	16,25	9,369	18,757416	6,21%
4	18,756	0,006	18,756001	6,22%
5	16,2	-9,325	18,692127	6,54%
6	9,669	-16,681	19,280698	3,60%
7	0,038	-19,313	19,313037	3,43%
8	-9,469	-16,463	18,991902	5,04%
9	-16,169	-9,35	18,677769	6,61%
10	-18,719	0,006	18,719001	6,40%
11	-16,954	9,606	19,486235	2,57%
12	-9,694	16,862	19,449953	2,75%
<b>Promedio</b>			19,048714	
<b>Precisión (Desviación Estándar)</b>			0,28301117	
<b>Promedio error relativo porcentual</b>			4,76%	



**Figura 60 Error de medición en centros de mecanizado**

Como se puede observar en los resultados de las mediciones de la tabla 22 correspondiente a la pieza mecanizada en el Centro de Mecanizado ExpertMill VMC-0600 se tiene una precisión de las mediciones de **0,08636838 mm** y un error relativo porcentual de medida del **3.72%**, de acuerdo a la precisión establecida por el fabricante de **0.012 mm**, siendo el valor experimental **7.2** veces mayor en comparación al dato de fábrica, mientras

tanto, los resultados de la tabla 23 del Centro de Mecanizado Vertical CNC de 5 ejes dan una precisión de las mediciones de **0,28301117 mm** y un error relativo porcentual de medida del **4.76%**, conforme los fabricantes cuenta con una precisión de **0.0425 mm**, siendo la estimación experimental **6.65** veces mayor en relación al de fábrica, reflejándonos todos estos valores una apreciación sobre la precisión de medición de la estación de control de calidad, la cual se muestra visiblemente estable.

Cabe destacar que la variación de precisión de medición entre los dos centros de mecanizado están sujetos a los valores establecidos por el fabricante de cada uno de ellos, ya que la estación de control de calidad presenta una precisión de medida sostenida.

#### 4.1.3 Pruebas de disparo Sonda de Palpación

Se comprueba el correcto funcionamiento de la sonda de palpación mediante el uso de un osciloscopio cuya conexión se muestra en la figura 49, en el cual al ser accionado por medio de un contacto se evidencia un pico de variación de voltaje y su gráfica representativa capturada como lo indica la figura 61.



**Figura 61 Señal de Accionamiento de la Sonda de Medición**

#### 4.1.4 Pruebas de programación y palpación

Las pruebas están basadas en la comprobación de la operación de palpado y su programación a partir del software GRBL Universal Gcode, principal

acción que deberá desempeñar la estación en el evento de control de calidad, ver figura 62.

En primer lugar hay que establecer una comunicación serial entre el software y la tarjeta de control para ellos se debe seleccionar el puerto Com al que se encuentra conectado, colocar una velocidad de 115200 baudios y hacer uso del botón “abrir”; seguidamente debemos comprobar que el recorrido de los ejes de la estación no contengan obstáculos algunos y resetear el cero de la máquina, véase figura 66, a continuación en la pestaña “modo archivo” cargar un archivo en bloc de notas el cual contenga la siguientes líneas de programación:

```
G17 G21 G40 G54 G80 G90 G94
G00 X-50 Y-70 Z-35
G38.2 X-70 F75
G01 X-40 F270
Z-10
G01 X0 Y0 Z0 F270
M30
```

En estas líneas de instrucción cabe destacar la acción del código G38, el cual es el comando para que el software Grbl sepa que va a realizar la acción de palpado y para ellos existe diferentes modos de trabajo, los cuales se expresan a continuación:

**Tabla 24**  
**Acciones del Código “G38”**

<b>Código G</b>	<b>Nombre</b>	<b>Acción</b>	<b>Versión de Grbl</b>
G38.1	Ciclo de Palpación	Ve el estado de la sonda	V0.9 o posterior
G38.2	Sonda Recta	La sonda se va mover hacia el área de trabajo, se para al hacer contacto y muestra una señal de error	V0.9h o posterior
G38.3	Sonda	La sonda se va mover hacia el área de trabajo, únicamente se para al hacer contacto	V0.9i o posterior
G38.4	Sonda	La sonda se va mover fuera del área de trabajo de la pieza, se para al dejar de hacer contacto y muestra una señal de error.	V0.9i o posterior
G38.5	Sonda	La sonda se va mover fuera del área de trabajo de la pieza, únicamente se para al dejar de hacer contacto	V0.9i o posterior

La instrucción G38.3 manifestada previamente, realiza la acción de palpado la cual debemos comprobarlo haciendo un roce del mismo con un objeto, tal como lo muestra la figura 62, mostrándonos en la consola la ubicación en los tres ejes y la correcta activación del mismo.



**Figura 62 Operación de palpado**

Podemos observar que la sonda de palpación en integración con el software funciona adecuadamente arrojándonos los valores de posición en el instante en que se ejecutó la palpación con respecto a las coordenadas de máquina, para lo cual se puede efectuar distintas pruebas en los diferentes ejes, tomando en cuenta disminuir la velocidad de avance para poder evitar alguna colisión y dañar el palpador.

#### **4.2 Prueba de aceptación del sistema de palpación**

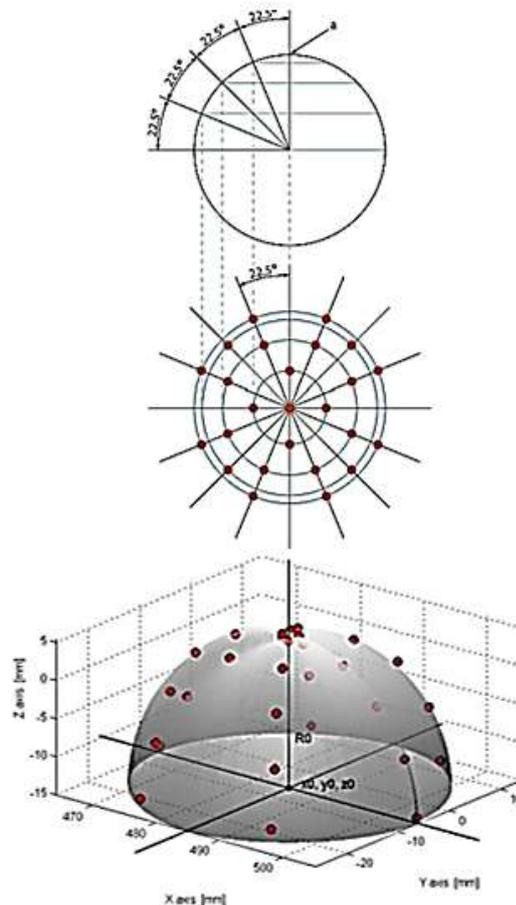
La prueba de aceptación de sondeo, establecido en la norma internacional ISO 10360-5: 2010, encargada de establecer si una máquina es capaz de realizar mediciones dentro del rango de error establecido por el fabricante de la máquina, siendo este el error dentro de los cuales se puede determinar la gama de radios de un material estándar.



**Figura 63 Esfera de prueba de aceptación del sistema de palpación**

La prueba se ejecuta con la ayuda de una esfera de 10 mm - 50 mm de diámetro, preferentemente de 30 mm como lo recomienda la norma ISO 10360-5: 2010, véase figura 64, y se procede ubicando el mismo en el centro de área de trabajo de la estación y tomar 25 muestras de valores de palpación, tal como se indica en la figura 64, donde estos puntos deben contener los siguientes especificaciones:

- ✓ Un punto en la parte superior (definido por la dirección del eje de la aguja) de la ubicación de la esfera.
- ✓ Cuatro puntos equidistantes a  $22,5^\circ$  por debajo del polo.
- ✓ Ocho puntos equidistantes a  $45^\circ$  por debajo del polo y girada  $22,5^\circ$  en relación con el grupo anterior.
- ✓ Cuatro puntos equidistantes a  $67,5^\circ$  por debajo de la polo y girado  $22,5^\circ$  en relación con el grupo anterior;
- ✓ Ocho puntos equidistantes a  $90^\circ$  por debajo del polo, es decir, en el ecuador y girado  $22,5^\circ$  con respecto al grupo anterior.



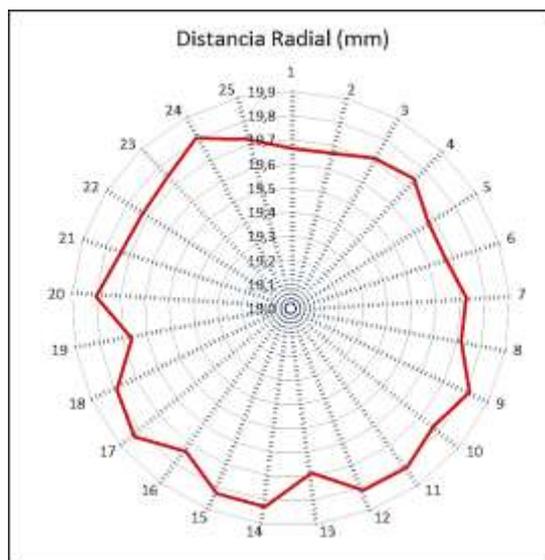
**Figura 64 Puntos recomendados por la norma ISO 10360-5:2010 para pruebas de palpado**

De acuerdo con la prueba de aceptación del sistema de palpación, en la tabla 25 se muestra los valores obtenidos durante el proceso de sondeo de una esfera de 39.65 mm de diámetro utilizada para realizar la misma.

**Tabla 25**

**Datos de la prueba de aceptación**

Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Distancia Radial (mm)
1	0,0000	0,0000	19,6640	<b>19,66400000</b>
2	12,7160	0,0000	15,0000	19,66460414
3	7,9740	-10,0000	15,0000	19,71255123
4	-1,0000	-12,7940	15,0000	19,74047710
5	-10,0000	-7,8690	15,0000	19,67031167
6	-12,6820	-1,0690	15,0000	19,67170265
7	-7,8380	10,1310	15,0000	19,72489303
8	1,0190	12,7560	15,0000	19,71684298
9	3,0020	4,7540	19,0000	19,81445230
10	2,0190	5,0640	19,0000	19,76665012
11	5,6250	0,0000	19,0000	19,81516149
12	-3,8370	-4,0940	19,0000	19,81119393
13	-16,4440	8,6560	6,5000	19,68708897
14	-6,1880	17,6820	6,5000	19,82913180
15	18,0370	5,0560	6,5000	19,82792236
16	4,5750	-18,0630	6,5000	19,73455330
17	-17,9440	-5,4060	6,5000	<b>19,83587588</b>
18	-15,1880	-12,6860	0,0000	19,78913692
19	-19,2560	3,9940	0,0000	19,66584786
20	-10,1560	17,0000	0,0000	19,80263457
21	5,1440	19,0560	0,0000	19,73808177
22	17,3310	9,4210	0,0000	19,72609444
23	19,3880	-3,7210	0,0000	19,74184351
24	10,1240	-17,0250	0,0000	19,80772579
25	-3,8690	-19,3440	0,0000	19,72712592
<b>Desviación de la redondez</b>				<b>0,17187588</b>



**Figura 65 Distancias radiales de las muestras tomadas en la tabla 23**

Se calcula la distancia radial de acuerdo a los tres puntos X, Y, Z, valores arrojados por GRBL, tomados en los 25 puntos de medición, de donde se obtiene el valor máximo y mínimo dándonos el valor de la desviación de la redondez de **0,17187588 mm**, resultando un valor de diámetro de **39,67175176 mm** en el punto de medición máximo.

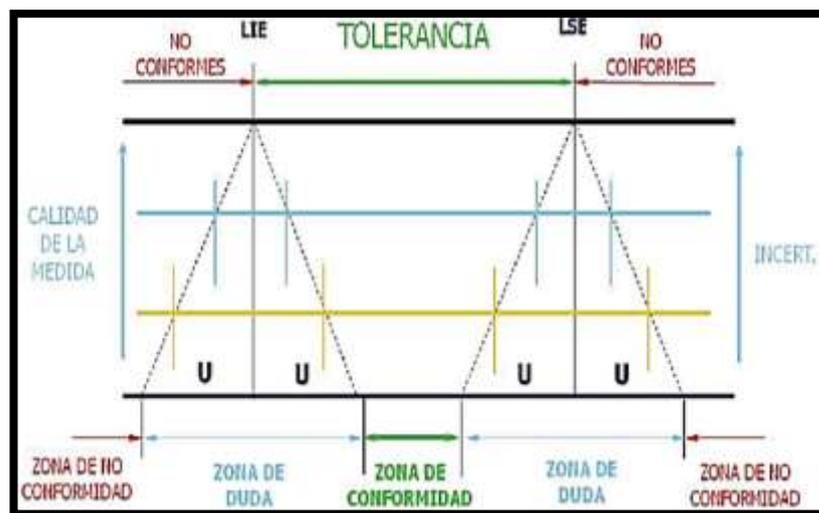


**Figura 66 Variación del error de palpado**

La desviación de la redondez es una línea circunferencial que debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia, es decir, entre dos círculos coplanares determinados por el valor de tolerancia de la esfera de prueba, siendo este de  **$\pm 0.6$  mm** por lo que el valor de error de la medición se encuentra dentro del rango y deducir de esta manera que el sistema de palpado se encuentra dentro del área de aceptación en su proceso de medición.

### 4.3 Pruebas control de calidad

En este punto se efectúan pruebas para estimar el valor de incertidumbre de medición en el proceso de control de calidad de la estación, obteniendo el intervalo de confianza en el cual se estima que se encuentra el valor real de medida y poder tomar el criterio de seguridad para establecer si la pieza se encuentra en la zona de conformidad o no, véase figura 67, para rechazar o aceptar la misma.

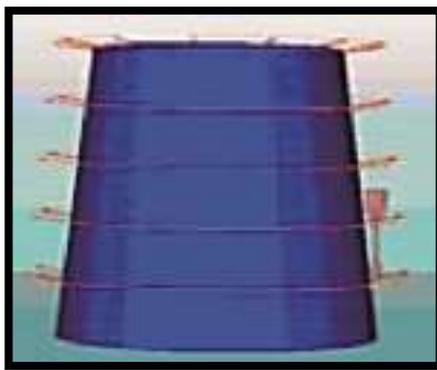


**Figura 67 Gráfica de aceptación o rechazo según la tolerancia**

De acuerdo a la norma internacional ISO 17025 acreditadora de los sistemas de calidad de medición para laboratorios especializados en mediciones, especifica que el valor de incertidumbre debe ser de 3 a 10 veces menor al semi – intervalo de tolerancia asignado a la pieza a medirse, siendo éste el criterio de toma decisión para aceptar o rechazar los elementos medidos.

#### 4.3.1 Prueba de obtención de la incertidumbre de medición

Dentro de la norma internacional ISO 10012 encargada de especificar los requerimientos genéricos y asesoramiento para los procesos de medición y conformación metrológica de los equipos de medición, se elabora la prueba de cálculo de error de conicidad y la obtención de la incertidumbre de dichas mediciones.



**Figura 68 Tomas de muestras**

La prueba consiste en tomar 72 muestras en 6 posiciones distintas de un cono, 12 veces tomadas en puntos indistintos, como lo muestra la figura 68, de donde se procederán a realizarse los cálculos de promedio, desviación estándar de las muestras, desviación estándar de la media y finalmente cálculo de la incertidumbre de medición.

En las tablas 26, 27, 28, 29, 30 y 32 de a continuación se puede observar los datos obtenidos en las mediciones de un cono de 32,58 mm de altura, 22.21 mm de radio mayor y 12.81 mm de radio menor, en cuanto a las 6 distintas muestras, obteniendo los valores de desviación estándar, distribución normal y el promedio de los valores obtenidos.

En las figuras 69, 70, 71, 72, 73 Y 74 se muestra la campana de Gauss en donde se puede asegurar que se encuentra el valor real de medición para una determinada posición y que se localiza dentro de la gráfica, dándonos el valor de incertidumbre de cada muestra y de esta manera poder determinar la capacidad de la estación de emitir un valor de medición cercana a la real.

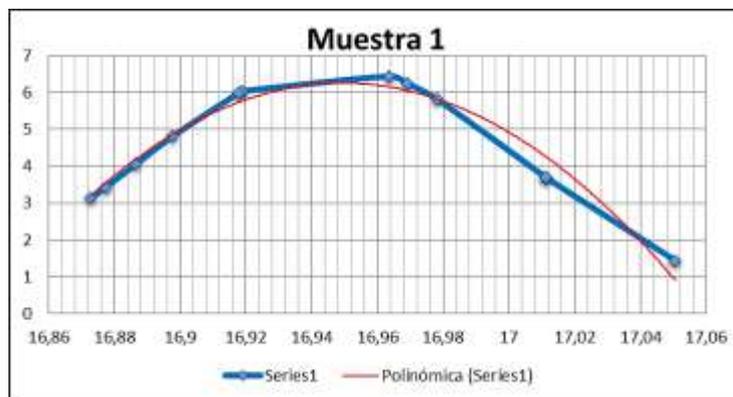
**Tabla 26**

**Mediciones de la posición 1 del cono de prueba**

Muestra 1						
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Dato	Orden mayor a menor	Distribución Normal
1	7,544	0	15,2	16,9691466	17,0506339	1,43607128
2	5,313	-5,194	15,2	16,9187944	17,0115666	3,67170273
3	2,313	-6,950	15,2	16,8728323	17,0111610	3,69926406
4	-0,688	-7,350	15,2	16,8978059	16,9782075	5,81235599
5	-2,688	-6,825	15,2	16,8773800	16,9691466	6,23576421
6	-4,688	-5,669	15,2	16,8865300	16,9635233	6,43815836

CONTINÚA

7	-6,588	-3,431	15,2	16,9178458	16,9187944	6,03318421
8	-7,519	-0,431	15,2	16,9635233	16,9178458	5,98800697
9	-7,194	2,569	15,2	17,0115666	16,8978059	4,81339542
10	-4,066	6,569	15,2	17,0506339	16,8865300	4,04921968
11	-0,819	7,594	15,2	17,0111610	16,8773800	3,42726743
12	3,181	6,863	15,2	16,9782075	16,8728323	3,12691394
<b>Promedio de datos</b>				<b>16,9462857</b>		
<b>Desviación Estándar</b>				<b>0,05941124</b>		

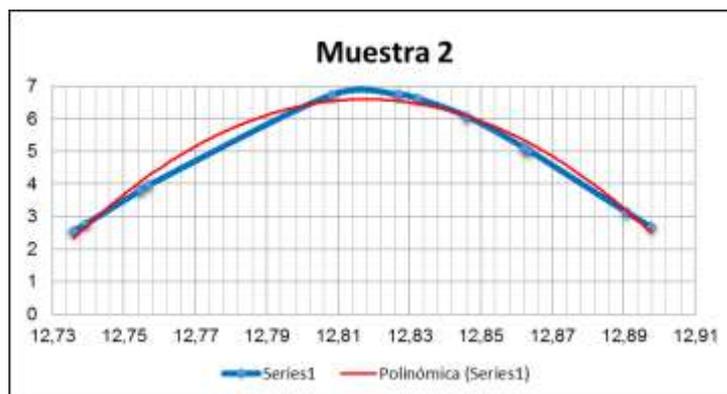


**Figura 69 Rango donde se encuentra el valor real de medición de la muestra 1**

**Tabla 27**

**Mediciones de la posición 2 del cono de prueba**

<b>Muestra 2</b>						
<b>Punto</b>	<b>X (mm)</b>	<b>Y (mm)</b>	<b>Z (mm)</b>	<b>Dato</b>	<b>Orden mayor a menor</b>	<b>Distribución Normal</b>
1	7,094	4,625	9,681	12,8622402	12,8978150	2,67752963
2	8,462	-0,375	9,681	12,8634299	12,8908111	3,13183235
3	7,188	-4,375	9,681	12,8269143	12,8634299	5,03568695
4	3,944	-7,281	9,681	12,7393037	12,8622402	5,11518229
5	0,944	-8,250	9,681	12,7544266	12,8461481	6,07004917
6	-4,056	-7,250	9,681	12,7567785	12,8322585	6,62044408
7	-6,575	-5,025	9,681	12,7358946	12,8269143	6,74308647
8	-8,138	-2,025	9,681	12,8081782	12,8081782	6,73186995
9	-8,444	-0,025	9,681	12,8461481	12,7567785	3,95428587
10	-7,975	2,975	9,681	12,8908111	12,7544266	3,78844977
11	-3,744	7,656	9,681	12,8978150	12,7393037	2,76711388
12	0,256	8,419	9,681	12,8322585	12,7358946	2,55420982
<b>Promedio de datos</b>				<b>12,8178499</b>		
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,05845614</b>		

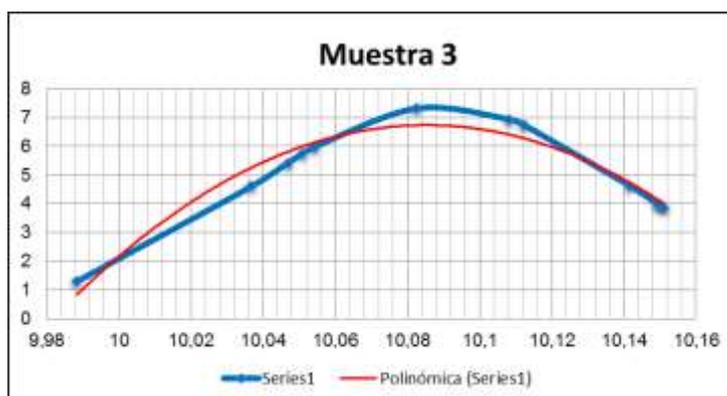


**Figura 70 Rango donde se encuentra el valor real de medición de la muestra 2**

**Tabla 28**

**Mediciones de la posición 3 del cono de prueba**

Muestra 3						
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Dato	Orden mayor a menor	Distribución Normal
1	0,256	9,212	4,163	10,1122228	10,1511226	3,84011334
2	4,256	8,169	4,163	10,1082474	10,1500628	3,92626172
3	7,119	5,919	4,163	10,1511226	10,1490636	4,00783803
4	8,775	2,919	4,163	10,1415854	10,1415854	4,62430983
5	9,019	-2,081	4,163	10,1490636	10,1122228	6,74182683
6	7,738	-5,081	4,163	10,1500628	10,1082474	6,93606389
7	4,500	-7,969	4,163	10,0541300	10,0824934	7,31525357
8	0,500	-9,119	4,163	10,0367689	10,054130	5,96786646
9	-2,500	-8,800	4,163	10,0508989	10,0508989	5,73026414
10	-6,500	-6,431	4,163	10,0468070	10,046807	5,41509531
11	-8,056	-4,188	4,163	9,98844577	10,0367689	4,60060100
12	-9,181	-0,188	4,163	10,0824934	9,98844577	1,29661788
<b>Promedio de datos</b>				10,0893207		
<b>Desviación estándar</b>				0,05410319		



**Figura 71 Rango donde se encuentra el valor real de medición de la muestra 3**

Tabla 29

## Mediciones de la posición 4 del cono de prueba

Muestra 4						
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Dato	Orden mayor a menor	Distribución Normal
1	-9,875	1,813	-1,356	10,1312058	10,1952132	3,1473493
2	-8,25	5,813	-1,356	10,182937	10,186648	3,73004446
3	-3,013	9,594	-1,356	10,1470065	10,182937	3,98855907
4	0,988	9,9	-1,356	10,0411593	10,1622183	5,38916546
5	4,988	8,7	-1,356	10,1197273	10,1470065	6,21123289
6	6,75	7,45	-1,356	10,1441479	10,1441479	6,33172304
7	9,462	3,45	-1,356	10,1622183	10,1312058	6,70598348
8	10,081	-0,55	-1,356	10,186648	10,1197273	6,7762148
9	8,444	-5,55	-1,356	10,1952132	10,0777349	5,08858366
10	5,206	-8,481	-1,356	10,0433328	10,0433328	2,75245776
11	1,206	-9,913	-1,356	10,0777349	10,0411593	2,61739865
12	-2,794	-9,544	-1,356	10,0365885	10,0365885	2,34413351
<b>Promedio de datos</b>				10,1223266		
<b>Desviación estándar</b>				0,05881645		

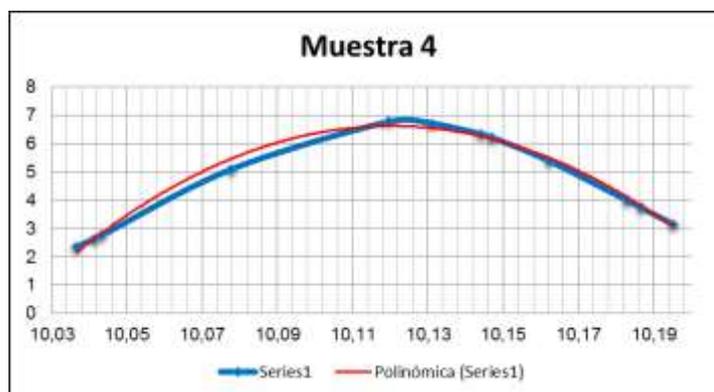


Figura 72 Rango donde se encuentra el valor real de medición de la muestra 4

Tabla 30

## Mediciones de la posición 5 del cono de prueba

Muestra 5						
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Dato	Orden mayor a menor	Distribución Normal
1	-3,794	-10,081	-6,875	12,7783654	12,8989039	2,56122011
2	-6,794	-8,300	-6,875	12,7402536	12,8825730	3,69815843
3	-9,438	-5,044	-6,875	12,7194106	12,8666064	4,88897038
4	-10,588	-2,044	-6,875	12,7886400	12,8610477	5,28886022
5	-10,119	3,956	-6,875	12,8572828	12,8572828	5,54781964
6	-9,100	5,956	-6,875	12,8666064	12,8238834	6,99292229
7	-4,856	9,675	-6,875	12,8238834	12,8101126	6,95572039

CONTINÚA

<b>8</b>	-0,856	10,775	-6,875	12,8101126	12,7918772	6,30881775
<b>9</b>	3,144	10,319	-6,875	12,7918772	12,7886400	6,13390674
<b>10</b>	7,269	8,081	-6,875	12,8610477	12,7783654	5,49075176
<b>11</b>	10,450	3,081	-6,875	12,8825730	12,7402536	2,73484724
<b>12</b>	10,744	-1,919	-6,875	12,8989039	12,7194106	1,54380722
<b>Promedio de datos</b>				12,8182464		
<b>Desviación estándar</b>				0,05676887		

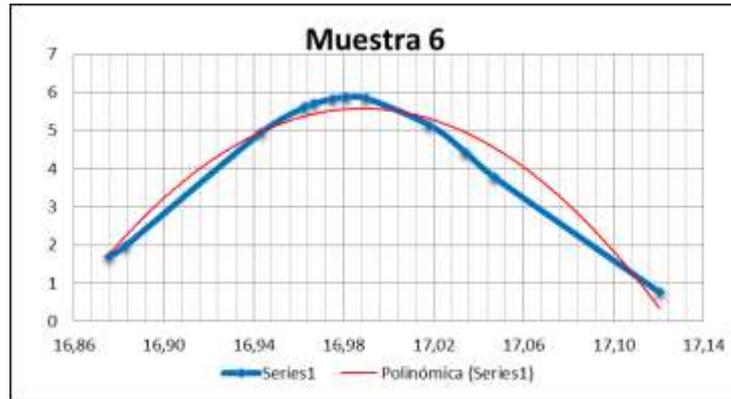


Figura 73 Rango donde se encuentra el valor real de medición de la muestra 5

Tabla 31

Mediciones de la posición 6 del cono de prueba

Muestra 6						
Punto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Dato	Orden mayor a menor	Distribución Normal
<b>1</b>	10,600	-4,919	-12,394	17,0343123	17,12058425	0,7601365
<b>2</b>	7,363	-9,044	-12,394	17,0181944	17,04720006	3,76431339
<b>3</b>	2,363	-11,356	-12,394	16,9750918	17,03431234	4,42043794
<b>4</b>	-4,637	-10,619	-12,394	16,9669139	17,01819441	5,13769782
<b>5</b>	-9,756	-6,000	-12,394	16,8757451	16,99007863	5,8377921
<b>6</b>	-11,288	-2,000	-12,394	16,8828368	16,98102485	5,86546681
<b>7</b>	-10,838	4,000	-12,394	16,9432429	16,97509178	5,82734538
<b>8</b>	-7,600	8,738	-12,394	16,9624255	16,96691386	5,70355306
<b>9</b>	-2,600	11,313	-12,394	16,9810249	16,96242553	5,60217078
<b>10</b>	4,400	10,756	-12,394	16,9900786	16,94324290	4,94005588
<b>11</b>	8,975	7,513	-12,394	17,0472000	16,88283685	1,97620898
<b>12</b>	11,800	0,513	-12,394	17,1205842	16,87574508	1,68510974
<b>Promedio de datos</b>				16,9831375		
<b>Desviación estándar</b>				0,0679826		



**Figura 74 Rango donde se encuentra el valor real de medición de la muestra 6**

La desviación estándar experimental del promedio de las muestras, es la estadística utilizada para la cuantificación de la incertidumbre estándar de medición “ $u(x)$ ”.

El valor de incertidumbre se la obtiene mediante la ecuación 10, en la cual se hace referencia a elementos estadísticos para la obtención del dato deseado.

$$u = S(\bar{X}) * t_{n-1;99\%} \quad (\text{Ecu. 12})$$

Donde:

- ✓ U: Valor de incertidumbre estándar de la medición.
- ✓  $S(\bar{X})$ : Desviación estándar de la media.
- ✓  $t_{n-1;99\%}$ : Nivel de confianza al 99% y grados de libertad de n-1.

De acuerdo a la tabla de nivel de confianza de anexos B2, se obtiene los datos necesarios para la ecuación 12, en donde los grados de libertad tiene un valor de número de muestras menos 1 “n-1”, es decir un grado de libertad de 11 de acuerdo a las 12 datos de cada muestra y un nivel de confianza del 99%, todos estos datos son específicos para muestras menores de 20 tomas.

En la tabla 32 se muestra el promedio en cada muestra, la desviación estándar, la desviación media y una incertidumbre al 99% de nivel de confianza para el análisis de la capacidad de medición.

Tabla 32

## Resultado final de incertidumbre al 99% de confianza

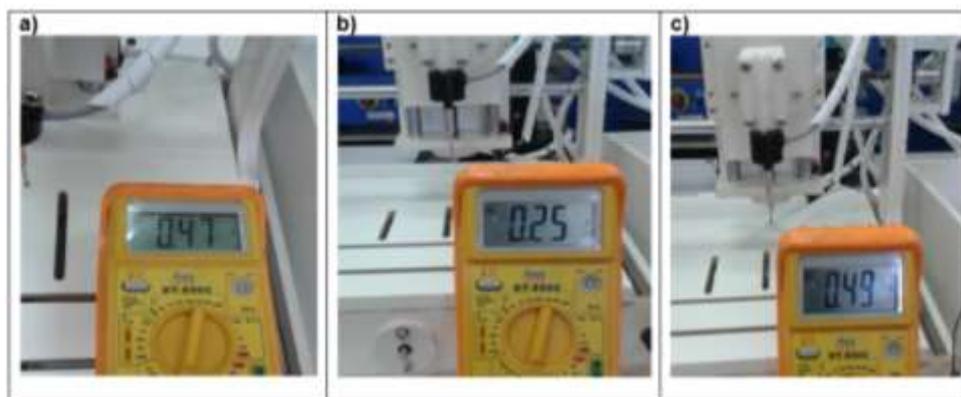
Tabla de datos						
	Muest.1	Muest.2	Muest.3	Muest.4	Muest.5	Muest.6
<b>Promedio</b>	16,94628	12,81784	10,08932	10,12232	12,81824	16,98313
<b>Desviación Estándar</b>	0,059411	0,058456	0,054103	0,058816	0,056768	0,06798
<b>Desviación Media</b>	0,017150	0,016874	0,015618	0,016978	0,016387	0,019624
<b>Incertidumbre 99%</b>	0,05333	0,052480	<b>0,048572</b>	0,052804	0,050965	<b>0,06103</b>

EL cono utilizado para la prueba tiene un valor de tolerancia de **0.6 mm** determinado por el fabricante y de acuerdo con el criterio de seguridad de la norma ISO 17025, el valor de la incertidumbre debe ser como mínimo 3 veces menor al semi-intervalo  $\alpha$  o al valor medio de la tolerancia, es decir, tres veces menor a **0.3 mm**.

Como se puede observar en la tabla 31, en las 6 muestras tomadas, el valor de incertidumbre al 99% de nivel de confianza varía entre **0.048 mm** y **0.061 mm** siendo estos datos aproximadamente 6 veces menor al valor medio de la tolerancia establecida por el fabricante, por lo que se puede concluir que las mediciones realizadas por la estación de control de calidad arrojan un valor de medida muy cercano a la real y estos se encuentran dentro del criterio de aceptación de la norma ISO 17025.

#### 4.4 Pruebas de corrientes en los motores paso a paso

Para la comprobación del correcto suministro de corriente se utiliza un amperímetro conectado a una bobina de los motores paso a paso correspondientes a cada uno de los ejes X, Y, Z, como se muestra en la figura 75, obteniendo los resultados de la tabla 19, mediciones de corriente en relación a la variación de velocidad de desplazamiento.



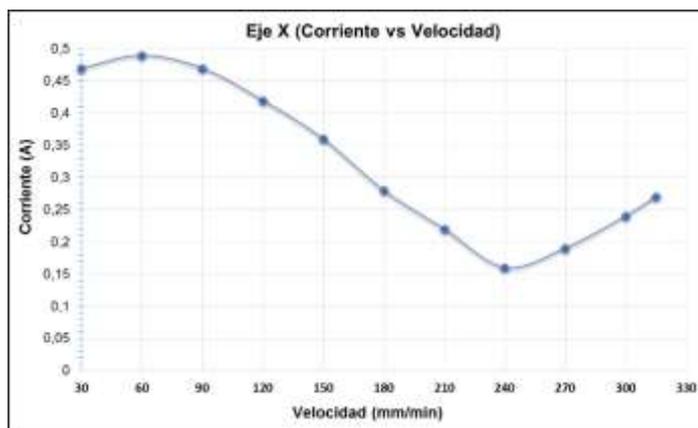
**Figura 75 a) Corriente en Motor PAP Eje X. b) Corriente en Motor PAP Eje Y. c) Corriente en Motor PAP Eje Z**

**Tabla 33**

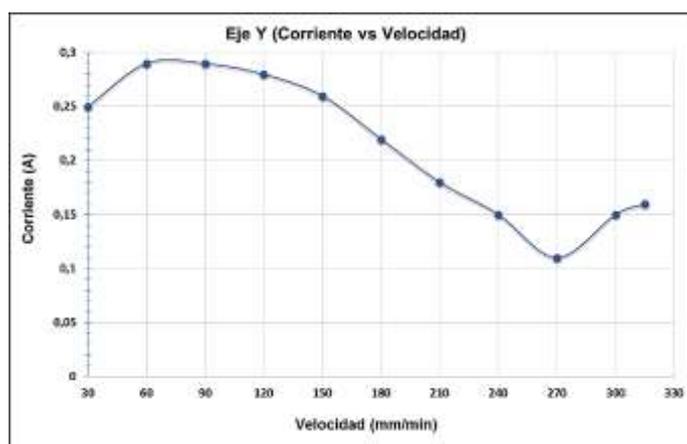
**Corriente vs velocidad de los motores PAP Nema 17**

<b>EJE X</b>	Velocidad (mm/min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	315
	Corriente (A)	0.47	0.49	0.47	0.42	0.36	0.28	0.22	0.16	0.19	0.24	0.27
<b>EJE Y</b>	Velocidad (mm/min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	315
	Corriente (A)	0.25	0.29	0.29	0.28	0.26	0.22	0.18	0.15	0.11	0.15	0.16
<b>EJE Z</b>	Velocidad (mm/min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	310
	Corriente (A)	0.49	0.51	0.49	0.43	0.37	0.29	0.23	0.16	0.19	0.24	0.26

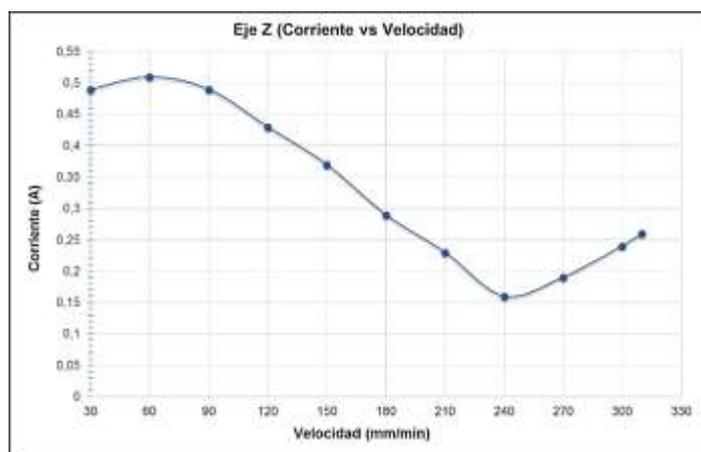
En las figuras 76, 77 Y 78 se observa la variación de corriente que circula por los bobinados de los motores PAP (Paso a paso), dándonos una estimación gráfica de las velocidades en la cuales el consumo de corriente es máxima, mínima y recomendar dichos valores para la programación de los desplazamientos de la estación de control de calidad y evitar la circulación de altos valores de corriente circulando por los bobinados de los motores PAP (Paso a paso) y prolongar su vida útil.



**Figura 76 Consumo de Corriente en el Eje X**



**Figura 77 Consumo de Corriente en el Eje Y**



**Figura 78 Consumo de Corriente en el Eje Z**

Por medio de estas gráficas, se puede observar que el consumo de corriente en los ejes X, Y y Z dentro del rango de velocidades que van desde 30 a 180 mm/min el consumo de amperaje es relativamente alto, mientras que desde 180 a 330 mm/min es bajo, presentándose a 240 mm/min la velocidad

idónea para un consumo bajo de corriente, siendo el valor recomendable para obtener una circulación de corriente bajo en los motores pap Nema 17.

#### **4.5 Validación de la hipótesis**

La hipótesis planteada en el proyecto es la siguiente:

¿El diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad para prácticas de FMS en el laboratorio de CNC, ayudará al desarrollo de prácticas de Sistemas Flexibles de Manufactura de la ESPE Extensión Latacunga?

##### **4.5.1 Planteamiento de la hipótesis de trabajo y nula**

**Hipótesis de trabajo:** El desarrollo de prácticas de Sistemas Flexibles de Manufactura depende del diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad.

**Hipótesis nula:** El desarrollo de prácticas de Sistemas Flexibles de Manufactura es independiente del diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad.

##### **4.5.2 Designación de variables**

Variable independiente: Celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad.

Variable dependiente: Prácticas de Sistemas Flexibles de Manufactura.

##### **4.5.3 Valores observados**

En la Tabla 34, se presentan los datos obtenidos en las pruebas realizadas, se analiza la relación de dependencia existente entre ambas variables.

**Tabla 34****Valores observados**

Prácticas de FMS /Celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad	Sujeción de pieza	Medición	Control de calidad
Dependientes	3	1	0
Independientes	4	5	5

**4.5.4 Valor de frecuencias esperadas y observadas**

En la tabla 35 y 36 se observa la frecuencia observada y esperada respectivamente, para obtener los valores de cada frecuencia esperada se multiplica el total de cada columna y fila correspondiente a la celda que se desea obtener y se divide para la suma total.

**Tabla 35****Frecuencia observada**

Prácticas de FMS /Celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad	Sujeción de pieza	Medición	Control de calidad	<b>Total</b>
Dependientes	3	1	0	<b>4</b>
Independientes	4	5	5	<b>14</b>
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>18</b>

**Tabla 36****Frecuencia esperada**

Prácticas de FMS /Celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad	Sujeción de pieza	Medición	Control de calidad	<b>Total</b>
Dependientes	1.55	1.33	1.11	<b>4</b>
Independientes	5.44	4.66	3.88	<b>14</b>
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>18</b>

**4.5.4 Cálculo de chi cuadrado**

Para obtener el valor de chi cuadrado se tiene la Ecu. 13

$$x^2_{calc} = \sum \frac{(f_0 - f_e)^2}{f_e} \quad (\text{Ecu. 13})$$

Dónde:

$f_0$  Frecuencia del valor observado

$f_e$  Frecuencia del valor esperado

Reemplazando los datos de las Tablas 30 y 31 en la Ecu. 13 se tiene:

$$x^2_{calc} = \frac{(3 - 1.55)^2}{1.55} + \frac{(1 - 1.33)^2}{1.33} + \frac{(0 - 1.11)^2}{1.11} + \frac{(4 - 5.44)^2}{5.44} + \frac{(5 - 4.66)^2}{4.66} + \frac{(5 - 3.88)^2}{3.88}$$

$$x^2_{calc} = 1.36 + 0.08 + 1.11 + 0.38 + 0.02 + 0.32$$

$$x^2_{calc} = 3.27$$

#### 4.5.5 Cálculo del grado de libertad y nivel de significancia

El valor del grado de libertad se obtiene mediante la Ecu. 14.

$$v = (\text{cantidad de filas} - 1) * (\text{cantidad de columnas} - 1) \quad (\text{Ecu. 14})$$

Reemplazando los valores respectivos se tiene:

$$v = (2 - 1) * (3 - 1)$$

$$v = 2$$

El nivel de significancia es el error que se puede cometer al rechazar la hipótesis nula siendo verdadera; por lo general se trabaja con un nivel de significancia de 0,05; que indica que hay una probabilidad del 95% de que la hipótesis nula sea verdadera. 95%.

#### 4.5.6 Análisis de chi cuadrado mediante tabla

Una vez deducido el grado de libertad y el nivel de significancia, se obtiene el valor de chi cuadrado mediante la tabla del ANEXO B3, siendo este:

$$x^2_{tabla} = 5.99$$

Para el análisis por chi cuadrado se tiene la siguiente condición: Si  $x^2_{calc} \leq x^2_{tabla}$ , entonces se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis de trabajo, mientras que si  $x^2_{calc} > x^2_{tabla}$ , entonces se acepta la hipótesis de trabajo y se rechaza la hipótesis nula.

Es así que mediante los resultados obtenidos, se tiene:

$$x^2_{calc} \leq x^2_{tabla}$$

$$3.27 < 5.99$$

Por tal razón se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis de trabajo; es decir, el desarrollo de prácticas de Sistemas Flexibles de manufactura es independiente del diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad.

#### **4.6 Manual de operación**

Ver los detalles de operación de la estación de control de calidad en el anexo E.

#### **4.7 Análisis económico del proyecto**

A través del análisis económico del proyecto se puede determinar la factibilidad y la viabilidad del mismo de acuerdo a la inversión empleada para la implementación del proyecto, la misma que se ha dividido en dos secciones, la primera en el análisis económico de la estación de control de calidad y la segunda relacionado a la celda flexible de manufactura implementado.

##### **4.7.1 Análisis económico de la estación de control de calidad**

Una vez implementa la estación de control de calidad para la celda de manufactura flexible, se requiere elaborar un análisis técnico-económico particular de la estación y de esta manera poder identificar su viabilidad y esencialmente su rentabilidad identificando la relación entre los beneficios que proporciona la inversión económica y el esfuerzo contribuidos en la elaboración de la estación de control de calidad.

A continuación en la tabla 37 se especifican los elementos utilizados y su correspondiente inversión para la construcción de prototipo.

**Tabla 37**

**Nómina de elementos utilizados en la estación de control de calidad**

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>P. Unit. \$</b>	<b>P. Total %</b>
1	Mesa de posicionamiento	1	280,00	280,00
2	Soporte de Sonda de Medición	1	42,50	42,50
3	Mesa de la estación	1	25,00	25,00
4	Pulsadores NA, finales de carrera	4	0,95	3,80
5	Interruptores NA, finales de carrera	2	1,25	2,50
6	Sonda de disparo por contacto	1	265,00	265,00
7	Juego de palpadores	4	12,00	48,00
8	Arduino Uno Rev3	2	25,00	50,00
9	CNC Shield Arduino v3	1	25,00	25,00
10	Driver Pololu A4988	3	8,00	24,00
11	Placa de conexión PCB	1	12,00	12,00
12	Fuente de Alimentación ATX	1	20,00	20,00
13	Ventilador	1	4,50	4,50
14	Pulsador tipo hongo	1	3,50	3,50
15	Luces piloto 110V	2	2,25	4,50
16	Acrílico (50 x 50 cm)	1	8,75	8,75
17	Cable flexible AWG 20 (8 m)	3	12,00	36,00
18	Cables puente Macho-hembra	35	0,20	7,00
19	Swich	1	0,50	0,50
20	Fusible	1	1,25	1,25
21	Tornillos y pernos	30	0,20	6,00
22	Espiral pequeño (10 m)	2	6,50	13,00
23	Otros	1	250,00	250,00
<b>TOTAL</b>				<b>1124.80</b>

Por otra parte, en la tabla 38 se detalla la mano de obra empleada durante la realización del prototipo de estación de control de calidad.

Tabla 38

## Costo de mano de obra

No.	Descripción	Salario	Tiempo (Meses)	P. Total %
1	Ingeniero en Mecatrónica	380,00	12	4560,00
2	Ingeniero en Mecatrónica	380,00	12	4560,00
<b>TOTAL</b>				<b>9120,00</b>

Elaborando un sumatorio de todos los valores mencionados anteriormente, se tiene que para la implementación de la estación de control de calidad se realizó una inversión total de **10.244,80 USD**.

En la actualidad, existe numerosas empresas y fabricas dedicadas a la construcción de máquinas de medición que van desde los más sencillos instrumentos hasta las maquinarias más complejas para control de calidad, pero contraproducentemente no se encuentran en el mercado nacional, siendo una de las principales Mitutoyo, quienes ofrecen una gran variedad de maquinarias semejantes a nuestro proyecto en donde la de más cercanas características es la Crysta Plus M544, véase figura 79, la cual está valorado en **48.567,00 USD**.

Efectuando una comparación de estos valores, determinando como el 100%, al costo de la máquina del mercado, se obtiene como resultado que el proyecto implementado permite un ahorro de **38.322,22 USD**, de este valor se saca el porcentaje de ahorro del 78.90% que se logró al implementar la estación de control de calidad.



Figura 79 Crysta Plus M544

La estación de control de calidad se ha implementado en su totalidad y cumplido sus funciones determinadas, por lo que se puede concluir de acuerdo a los valores mostrados en las tablas 37 y 38 que el proyecto es rentable en su incorporación a la celda de manufactura flexible del laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPEL.

#### 4.5.2 Análisis económico de la celda de manufactura

Para poder realizar un análisis económico del proyecto, es necesario determinar todos los elementos e insumos utilizados para la implementación de la celda de manufactura.

En la tabla 39 de a continuación, se indica el equipo y material proporcionado por el Laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L.

**Tabla 39**

#### Equipos disponibles en el Laboratorio de CNC de institución

No.	Descripción	Cant.	P. Unit. \$	P. Total %
1	Centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes.	1	7.830,00	7.830,00
2	ExpertMill VMC - 0600	1	24.000,00	24.000,00
3	Sistema automatizado de Almacenamiento/Recuperación AS/RS	1	2.855,00	2.855,00
<b>TOTAL</b>				<b>34.685,00</b>

En la tabla 40 se indica el uso materiales eléctricos, electrónicos, dispositivos de control, materiales mecánicos y procesos de maquinado proporcionado por los estudiantes encargados del proyecto.

**Tabla 40**

#### Equipo y material proporcionado por los estudiantes

No.	Descripción	Cant.	P. Unit. \$	P. Total %
1	Mecanismo Piñón cremallera 3 m	1	300,00	300,00
2	Estructura eje desplazable	1	80,00	80,00
3	Moto reductor 131:1	1	80,00	80,00
4	Arduino Mega 2590	1	35,00	35,00
5	Fuente de poder regulable	1	15,00	15,00

CONTINÚA 

6	Sensor capacitivo E18-D80NK	1	15,00	15,00
7	Finales de carrera	3	0,75	2,25
8	Material mecánico	1	200,00	200,00
9	Perfil de aluminio FISA 1398 (3m)	2	60,00	120,00
10	Tornillos y pernos	100	0,15	15,00
11	Material eléctrico/electrónico	1	200,00	200,00
12	Rollo de cable N.-16 (100 m)	3	30,00	90,00
13	Canaleta y riel DIN	1	15,00	15,00
14	Switch VGA	1	80,00	80,00
15	Cable VGA	6	6,50	39,00
16	Cable UTP con RJ-45 (1 m)	8	8,00	64,00
17	Selector on/off	1	3,50	3,50
18	Amarras y Espirales	2	11,00	22,00
19	Caja de control	1	30,00	30,00
20	Robot articulado (Scorbot ER-4pc)	1	2.500,00	2.500,00
21	Spectralight Mill 200	1	2.500,00	2.500,00
22	Estación de control de calidad	1	1.124,80	1.124,80
<b>TOTAL</b>				<b>7.530,55</b>

Con todos los costos mencionados, incluyendo la mano de obra valorado en 9120,00\$, se tiene una inversión total del proyecto de **51.335,55 USD**.

En la Figura 80, se indica una celda de manufactura existente en el país instalada en el laboratorio de la Universidad San Francisco de Quito con similares características, evaluada en **130.200,00 USD**, si se realiza una comparación de estos valores y se determina el valor de la celda de manufactura que se encuentra en el mercado como el valor del 100%, se obtiene como resultado que el proyecto elaborado por los estudiantes encargados del mismo, permitiendo un ahorro de **78.864,45 USD**, de este valor se saca el porcentaje de ahorro del 60.57% que se logró al implementar la celda de manufactura dentro del Laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.



**Figura 80 Celda de manufactura instalada en la Universidad San Francisco de Quito**

Por lo tanto se puede deducir que el diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y en línea con control de calidad para prácticas de FMS en el laboratorio de CNC, se puede realizar a nivel industrial, la cual podría ser destinada para operaciones didácticas de enseñanza aplicable a instituciones o empresas a fines con la manufactura y la automatización.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Este prototipo que se encuentra dentro de los rangos de aceptación de acuerdo a las normas internacionales ISO 10360 y 10012, teniendo una precisión de 0.02 mm, exactitud del 99.8913%, repetibilidad de 0,13017752 mm, error de desviación de redondez de 0,179131801 mm y un valor de incertidumbre de medición de aceptación aproximado de 6 veces menor a la tolerancia al 99% de nivel de confianza.
- Las pruebas acerca del correcto funcionamiento de la estación de control de calidad se las realizó en base a la norma ISO 10360, especializada en el análisis de máquinas de medición por coordenadas, las cuales nos permitieron determinar las características reales del prototipo determinadas en la sección 4 de pruebas y resultados.
- En cuanto a la norma ISO 10012/2003, especializada en Sistema de Gestión de las Mediciones, requisitos para las mediciones y equipos de medición, nos permitieron efectuar las pruebas necesarias para control de calidad, ayudándonos a mejorar, asegurar el nivel de calidad de las medidas y de esta manera tomar las decisiones idóneas en cuanto a aceptar o rechazar el material y hacer el proceso más eficiente.
- Se realizó el proceso de control de calidad de las piezas tanto en la parte superior como los laterales, estableciendo los parámetros determinados según la forma de la pieza y a través del software Grbl se obtuvo los valores en los cuales fueron introducidos en el HMI arrojándonos los resultados del control de calidad.
- Se desarrolló dos programas para el control de calidad de las piezas de prueba, permitiendo obtener los movimientos deseados y la introducción

de las sentencias de control para activación de palpación, resultando exitoso todos los procesos de control de calidad.

- La interfaz gráfica HMI se la desarrolló de una manera sencilla, simplificada y sumamente intuitivo para el manejo, registro y observación del proceso de control de calidad.
- Mediante el uso del hardware implementado en la estación de control de calidad se puede realizar e implementar impresoras y máquinas de similar comportamiento debido a que dichos elementos ofrece las funcionalidades y capacidades en cuanto a librerías y actividades que se las puede aprovechar en otro proyecto semejante.
- Se logró configurar cinco estaciones de trabajo de un FMS las cuales son: estación de distribución (Brazo robótico Scorbot ER4), estación de mecanizado (Compuesto por ExpertMill VMC 0600, SpectraLigth y centro vertical CNC de 5 ejes), estación de control de calidad y estación de almacenamiento y reciclaje de piezas (AS/RS y brazo robótico Scorbot ER4), las cuales cumplen su función concreta obteniendo el correcto funcionamiento de una celda de manufactura.
- Con la implementación de este proyecto se facilita las prácticas de Sistemas Flexibles de Manufactura para su enseñanza a los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas sede Latacunga, en el laboratorio de CNC, poniendo a su disposición la manipulación, manejo y facilidad de mejoramiento de la estación de control de calidad.
- Se logró diseñar e implementar una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad para prácticas de FMS para el laboratorio de CNC, que ayudará al desarrollo de prácticas de Sistemas Flexibles de Manufactura de la ESPE Extensión Latacunga.

## 5.2 Recomendaciones

- Se observa ineludiblemente optimizar el sistema de control de calidad mediante una comunicación directa entre los dos software de control, Grbl y Processing para que los datos de medición ingresen directamente al HMI, sin la necesidad de transcribir por medio del teclado.
- Debido a que la estación de control de calidad cuenta con partes mecánicas remotas, con el tiempo presentaran desgastes, por lo cual es aconsejable dar mantenimiento y lubricación a los componentes con una regularidad frecuente para prolongar la vida de la misma, así como mantener la precisión en el proceso de control de calidad.
- Se considera necesario establecer en cada arranque del software Grbl antes de mover los ejes de su posición inicial, seleccionar “cero pieza”, para que el programa establezca las coordenadas correctas.
- Es obligatorio observar los pasos de colocación de la pieza a ser medida para que el proceso de control de calidad se realice de manera correcta.
- Es necesario observar la dimensión aceptable máximas de las piezas a medirse, el cual no debe superar los 140 mm de largo, 120 mm de ancho y 50 mm de altura, por motivo del recorrido de los ejes, haciendo imposible la medición en piezas fuera de este tamaño.
- Se recomienda elaborar otro soporte para la sonda de medición, la cual pueda colocar la misma de manera más elevada en el eje Z, obteniendo de esta forma la posibilidad de medir piezas con mayor altura que los 50 mm, inclusive en el eje Y se puede recorrer la sonda aproximadamente 10 mm y alcanzar piezas de mayor ancho que los 120 mm.
- Para el presente proyecto se recomienda cambiar el sistema de fijación de la pieza a algún sistema de cerrado automático para poder tener menos intervención del operación y una mayor automatización

- Se recomienda el mejoramiento de los finales de carrera por medio de otro tipo de sensor, el cual podría ser uno inductivo.
- Cuando se requiera sustituir el palpador de la sonda de medición tener sumo cuidado tomando en cuenta el sentido de giro para extraerlo es horario y de manera contraria para colocar el nuevo palpador, es imperioso que todo el proceso se lo realice con la estación desenergizada.
- Para flashear correctamente el archivo hexadecimal en la placa arduino es sumamente importante que la placa se encuentre totalmente libre de cualquier acople para que el proceso se realice de la mejor manera

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Apolo, N. P., & Caizalitin Quinaluisa, E. A. (Agosto 2014). *Diseño e implementación de una celda de manufactura robotizada, para réplica de piezas 3D, mediante fresado en el laboratorio de robótica industrial de la ESPEL*. Latacunga, Cotopaxi.
- Acuña, F. (26 de 09 de 2012). *Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS)*. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.
- Almeida Arteaga, N. (Junio 2009). *Diseño e implementación de una celda de manufactura para el sistema robótico CRS A255 del laboratorio de robótica de la Escuela Politécnica del Ejército*. Sangolquí, Pichincha.
- Castillo, F. D. (2010). *Máquinas CNC, Robots y la Manufactura Flexible*. Cautitlán .
- Cifuentes Molano, M. F., & Jaramillo Blandón, J. S. (2015). *Diseño de un sistema de manufactura automático para circuitos eléctricos*. Pereira, Risaralda.
- Fernández Martínez, R. E., & LLamuca Torres, P. M. (2015). *Diseño y construcción de material tiflotécnico que facilite la impresión de información en sistemas braille a niños de la Unidad Educativa Especializada de no Videntes de Cotopaxi*. Latacunga, Cotopaxi.
- Gallo Caiza, V. M., & Saá Tapia, F. D. (2013). *Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el laboratorio de robótica industrial de la ESPEL*. Latacunga, Cotopaxi.
- Groover , M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera Edición ed.). México, D.F.: Mc Graw Hill.
- Jaramillo, C. (02 de Agosto de 2011). *Sistemas Flexibles de Manufactura un enfoque estructural. Manufactura Flexible, conceptos y generalidades*. Málaga.

- Llerena Pintag, A. M., & Coronel Hernnandez, M. O. (2014). *Estudio, diseño e implementación de una máquina herramienta de control numérico computarizado, caso práctico prototipo de fresadora para madera*. Riobamba, Chimborazo.
- Proaño Piñeiros, M. B. (2011). *Diseño de celdas de manufactura y propuesta de balanceo de línea en la empresa Trapitos*. Cuenca, Azuay.
- Quezada Cantuña, A. L. (Julio 2015). *Diseño y construcción de un prototipo de visión artificial y control de calidad de la chapa de madera*. Quito, Pichincha.
- Riquelme García, M., & Zamora Predeño, R. (24 Agosto del 2014). *Diseño y fabricación de una fresadora CNC de 3 ejes para el mecanizado de PCB con plataformas de desarrollo abiertas*. Cartagena.
- Velásquez, J. A. (03 de Mayo de 2012). *Automatización en el Proceso de la Manufactura*. Barcelona, Cataluña.

## NETGRAFÍA

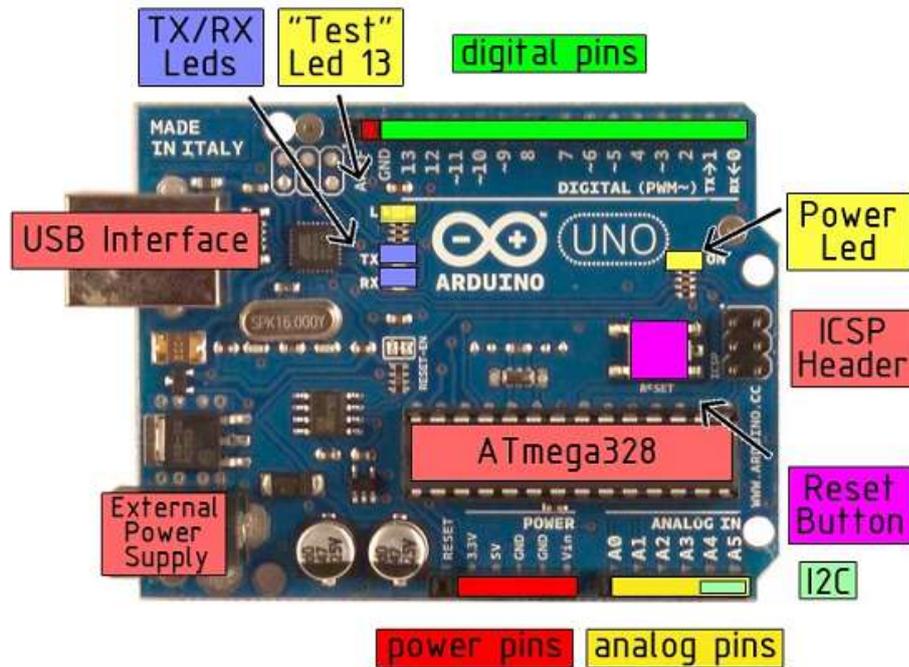
- CNC, E. (04 de 08 de 2012). *The Straight Probe Command*. Recuperado el 03 de 08 de 2016, de [http://www.edingcnc.com/wiki/index.php?page=75\\_g-codes-g382-g421](http://www.edingcnc.com/wiki/index.php?page=75_g-codes-g382-g421)
- CNC, G. (2016). *Sondas Touch*. Recuperado el 06 de 04 de 2016, de <http://www.craftycnc.com/touch-probes/>
- Diyprojects. (22 de Mayo de 2016). *CNC Shield V3.0 con v0.9 GRBL*. Recuperado el 25 de Julio de 2016, de <http://diyprojects.eu/arduino-cnc-shield-version-3-0-with-grbl-v0-9/>
- Duxbury, N. (16 de 04 de 2015). *Shapeoko Spring Cleaning and Touch Probe*. Obtenido de <https://nateduxbury.wordpress.com/2015/03/16/shapeoko-spring-cleaning-and-touch-probe/>

- Electroniclab. (s.f.). *Driver para motor paso a paso A4988*. Recuperado el 08 de Septiembre de 2016, de <http://electronilab.co/tienda/driver-motor-paso-a-paso-1a-a4988-pololu/>
- G7smy. (30 de 03 de 2014). *Máquina láse de grabado CNC*. Recuperado el 03 de 08 de 2016, de <http://www.g7smy.co.uk/2014/03/arduino-laser-cnc-engraving-machine/>
- González López, E. (09 de Mayo de 2016). *GRBL a fondo*. Recuperado el 20 de Julio de 2016, de <https://www.staticboards.es/blog/dominar-motor-paso-a-paso-con-grbl/>
- Grbl. (2011). *GitHub*. Recuperado el 19 de Agosto de 2016, de Configuración Grbl v0.9: <https://github.com/grbl/grbl/wiki/Configuring-Grbl-v0.9>
- Interempresas. (s.f.). *Renishaw Ibérica, S.A.U. - Sondas, sensores, palpadores y detectores dimensionales*. Recuperado el 05 de 04 de 2015, de <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/Producto-Modulos-para-sonda-con-cambiador-Renishaw-TP20-1677.html>
- Josh, N. (30 de 05 de 2006). *Processing tutorial*. Obtenido de <http://go.yuri.at/p5/tutorial/>
- Makers, D. (05 de 01 de 2013). *Arduino+Processing: primeros pasos*. Recuperado el 09 de 08 de 2016, de <http://diymakers.es/arduino-processing-primeros-pasos/>
- Peters, J. J. (21 de 12 de 2013). *Casiopea, Desarrollo Electrónica DIYLILCNC*. Recuperado el 01 de 05 de 2016, de [http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Desarrollo\\_Electr%C3%B3nica\\_DIYLILCNC](http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Desarrollo_Electr%C3%B3nica_DIYLILCNC)
- Pronotoneer. (22 de Julio de 2016). *Arduino CNC Shield v3*. Obtenido de <http://blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield-v3-00-assembly-guide/>

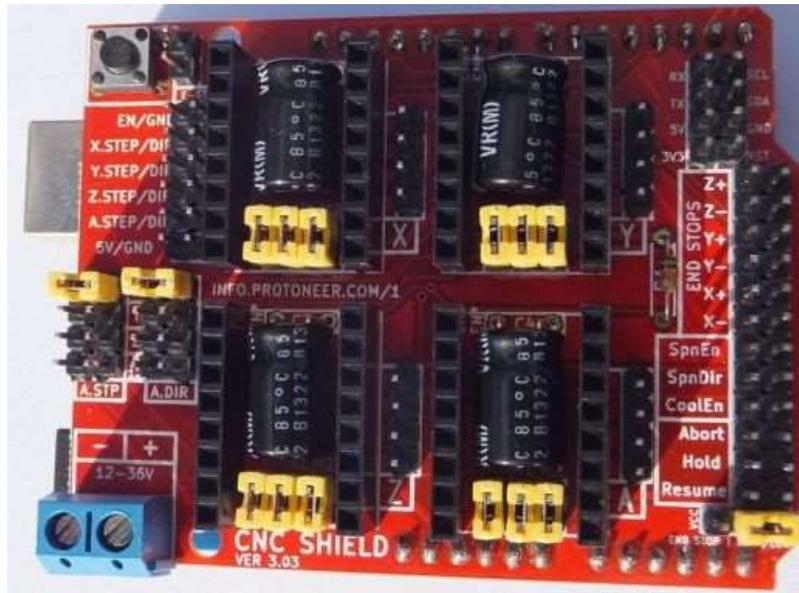
- Renishaw. (s.f.). *TP20 Sonda de Disparo por contacto*. Recuperado el 01 de 04 de 2016, de <http://www.renishaw.es/es/tp20--6670>
- Shapeoko. (s.f.). *G-code*. Recuperado el 20 de Julio de 2016, de [http://www.shapeoko.com/wiki/index.php/G-Code#G-code\\_supported\\_by\\_Grbl](http://www.shapeoko.com/wiki/index.php/G-Code#G-code_supported_by_Grbl)
- Sparkfun. (09 de 11 de 2011). *Conexión de Arduino para Processing*. Recuperado el 09 de 08 de 2016, de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/connecting-arduino-to-processing>
- Vázquez López, V. (2005). *Tecnológico de Monterrey. Obtenido de Redes Industriales: <http://homepage.cem.itesm.mx/vlopez/profibus.htm>*
- Wikia. (s.f.). *Diseño del software de control*. Recuperado el 01 de 08 de 2016, de [http://es.mecaa.wikia.com/wiki/Dise%C3%B1o\\_del\\_software\\_de\\_control](http://es.mecaa.wikia.com/wiki/Dise%C3%B1o_del_software_de_control)

**ANEXOS**

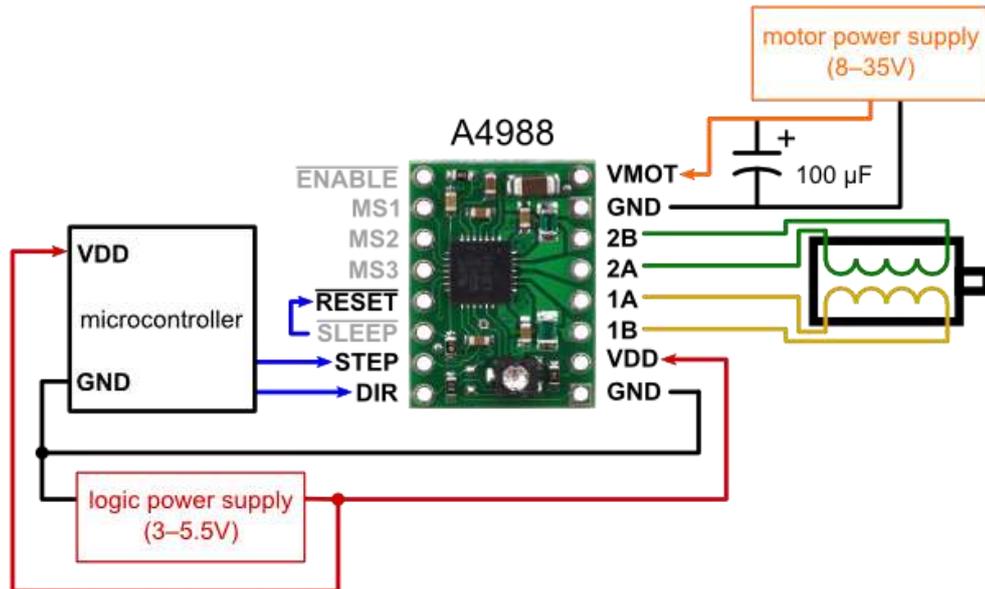
# **ANEXO A**



Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-9V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) (0.5 KB used by bootloader)
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

**Características:**

- GRBL 0.9c compatible. (Open source firmware that runs on an Arduino UNO that turns G-code commands into stepper signals <https://github.com/grbl/grbl>)
- 4-Axis support (X, Y, Z , A-Can duplicate X,Y,Z or do a full 4th axis with custom firmware using pins D12 and D13)
- 2 x End stops for each axis (6 in total)
- Spindle enable and direction
- Coolant enable
- Uses removable Pololu A4988 compatible stepper drivers. (A4988, DRV8825 and others)
- Jumpers to set the Micro-Stepping for the stepper drivers. (Some drivers like the DRV8825 can do up to 1/32 micro-stepping )
- Compact design.
- Stepper Motors can be connected with 4 pin molex connectors.
- Runs on 12-36V DC. (At the moment only the Pololu DRV8825 drivers can handle up to 36V so please consider the operation voltage when powering the board.)



### Dimensions

**Size:** 0.6" × 0.8"

**Weight:** 1.3 g<sup>1</sup>

### General specifications

<b>Minimum operating voltage:</b>	8 V
<b>Maximum operating voltage:</b>	35 V
<b>Continuous current per phase:</b>	1 A <sup>2</sup>
<b>Maximum current per phase:</b>	2 A <sup>3</sup>
<b>Minimum logic voltage:</b>	3 V
<b>Maximum logic voltage:</b>	5.5 V
<b>Microstep resolutions:</b>	full, 1/2, 1/4, 1/8, and 1/16
<b>Reverse voltage protection?:</b>	N
<b>Bulk packaged:</b>	N
<b>Header pins soldered:</b>	N <sup>4</sup>

## Medically Approved 500W ATX PC Power Supply

Product # TMPC-500



5.91" X 5.51" X 3.39"  
(150 X 140 X 86 mm)

**\*90-265 VAC universal input + PFC**  
**\*Unit without on/off switch is optional.**

### Features

- 90-265 VAC universal input
- Active PFC
- Low ripple & noise
- Output over voltage protection
- Short circuit protection on all outputs
- Resettable power shut down
- Low noise cooling fan
- 100% burn-in at 50°C
- 100% Hi-pot tested
- MTBF > 200,000 hours @ 25°C
- Line input fuse protection
- Approved to UL 60601-1, IEC 60601-1, EN 60601-1 medical standards
- Complies with EN 61000-3-2, EN 60601-1-2, EN 55011 standards
- < 90µA @ 264VAC low leakage version available

### Input Specifications

- Input voltage: 90 to 265 VAC
- Input frequency: 47 to 63 Hz
- Input current: 8.0A@115VAC, 4.0A@230VAC

### Other Specifications

- Hold-up time: 20ms @ 115VAC/60Hz, 20ms @ 230VAC/50Hz.
- Efficiency: 68% @ full load
- MTBF: >200,000 hours at full load @ 25°C
- Operating temperature: 0°C to +50°C
- Storage temperature: -20°C to +80°C
- Relative humidity: 5% to 95% non-condensing

### Output Specifications

- Over voltage protection: +3.7V to +4.5V for +3.3V; +5.7V to +6.5V for +5V; +13.3V to +15.6V for +12V
- Short circuit protection: On all outputs

DC Output Voltage	Minimum Load	*Maximum Load	Load Regulation	Ripple & Noise P-P (Max.)
+3.3V	0.5A	30A	±5%	50mV
+5V	0.3A	30A	±5%	50mV
+12V (1)	1A	17A	±5%	120mV
+12V (2)	1A	17A	±5%	120mV
-12V	0A	0.8A	±10%	120mV
+5Vsb	0A	2A	±5%	50mV
-5V	0A	0.3A	±10%	100mV

\*+3.3V & +5V total output: 200W max.

\*+3.3V & +5V & +12V total output: 480W max.

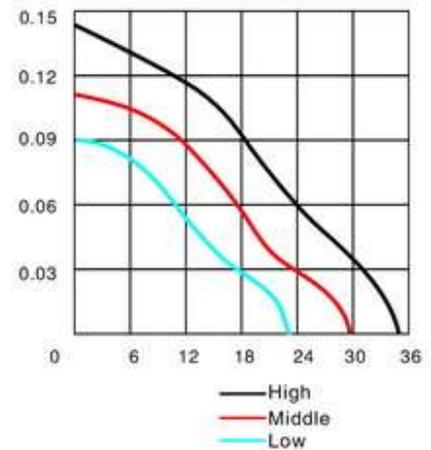
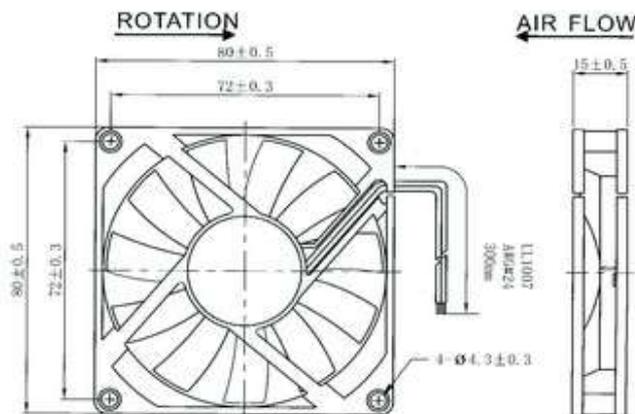
-01/2008-

**Tumbler Technologies + TRUMPower**

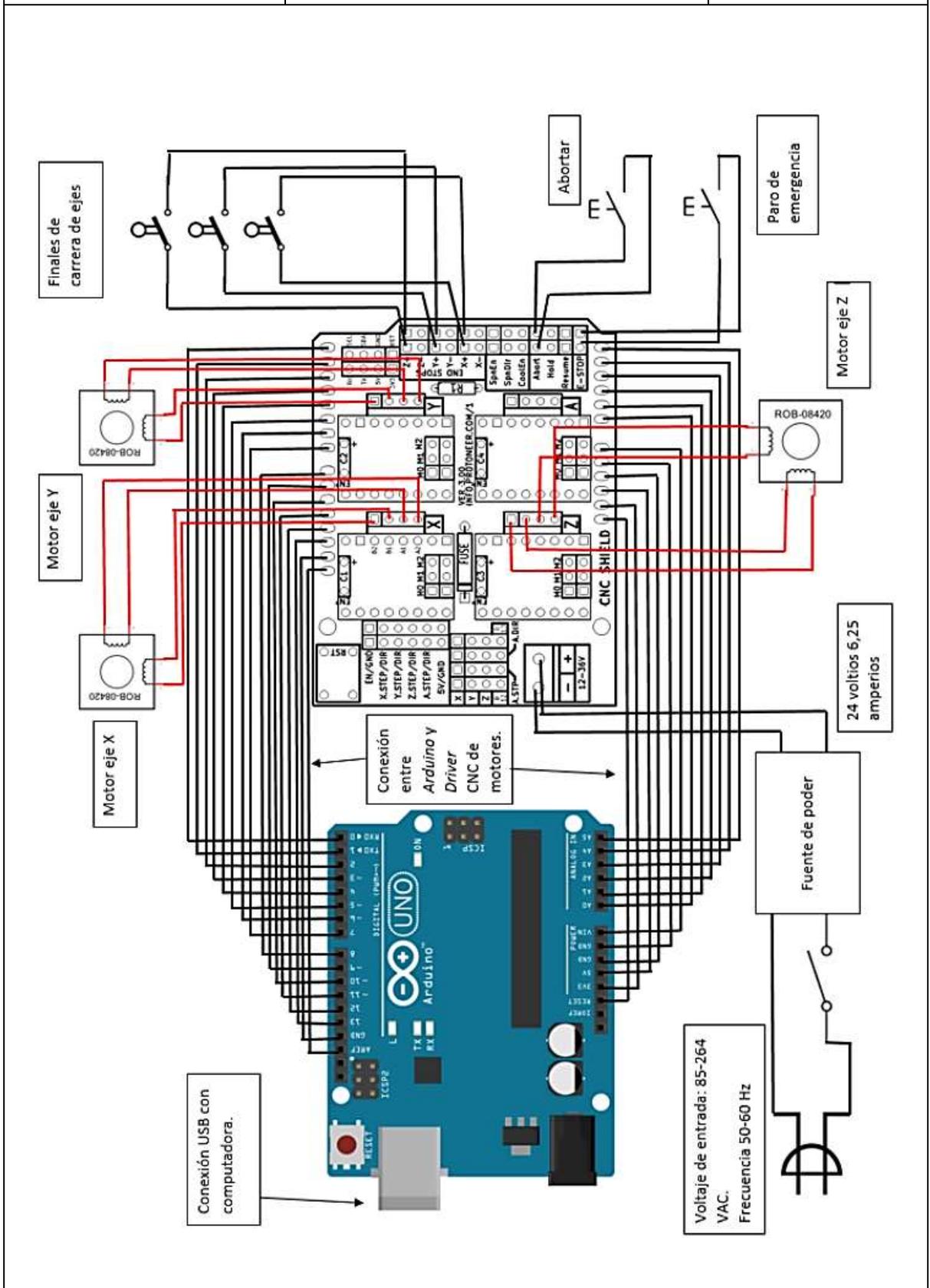
Santa Clara, California, USA • Phone: 408-988-6616 • sales@TRUMPower.com • www.TRUMPower.com

\*

- 尺寸 Size: 80 × 80 × 15mm
- 马达 Motor : Brushless DC, auto restart  
Impedance & polarity protected
- 风叶外壳 Impeller& Frame:Glassfiber reinforced thermoplastic  
PBT UL94V-0
- 绝缘 Insulation Resistance:Min.10M at DC 500V
- 耐压 Dielectric Strength: 500VAC/1 sec. Max. Leakage  
500 micro amp
- 温度范围 Permissible Temp. Range: Ball bearing -20°C~+75°C  
Sleeve Bearing -10°C~+50°C
- 安规认证 Safety:UL>CUL>CE
- 寿命 Life Expectancy at 40°C: Ball Bearing 50000 hr.  
Sleeve Bearing 30000 hr.



Model (型号)	Rated Voltage (VDC) (额定电压)	Startup Voltage (VDC) (启动电压)	Current Amp (A) (电流)	Speed (rpm) (转速)	Air Flow (CFM) (风量)	Static Pressure (Inch-H2o) (风压)	Noise Level (dB-A) (噪音)	Weight (g) (重量)
YM0508PHS(B)1	5.00	3.00	0.32	2500	29.17	0.11	28	54.00
YM0508PHS(B)2	5.00	3.00	0.28	2200	26.15	0.10	26	54.00
YM0508PHS(B)3	5.00	3.00	0.16	2000	23.33	0.09	22	54.00
YM1208PHS(B)1	12.00	5.00	0.24	3000	35.00	0.14	33	54.00
YM1208PHS(B)2	12.00	5.00	0.16	2500	29.17	0.11	28	54.00
YM1208PHS(B)3	12.00	5.00	0.08	2000	23.33	0.09	22	54.00
YM2408PHS(B)1	24.00	10.00	0.10	3000	35.00	0.14	33	54.00
YM2408PHS(B)2	24.00	10.00	0.08	2500	29.17	0.11	28	54.00
YM2408PHS(B)3	24.00	10.00	0.06	2000	23.33	0.09	22	54.00



# **ANEXO B**

ANEXO B1		Tabla de mediciones para verificar la norma ISO 10360										Hoja 1 de 2	
Número de Posición	Longitudes	Valores obtenidos			Promedio de mediciones	Error de longitud			Promedio de errores	Precisión	Error relativo	Error de indicación	
		Número 1	Número 2	Número 3		Número 1	Número 2	Número 3					
1	180	180,14	180,28	180,20	180,21	0,14	0,28	0,20	0,21	0,07	0,115%	0,00490	
	144	144,04	144,17	144,22	144,14	0,04	0,17	0,22	0,14	0,09	0,100%	0,00472	
	108	108,14	108,12	108,29	108,18	0,14	0,12	0,29	0,18	0,09	0,170%	0,00454	
	72	72,26	71,90	72,15	72,10	0,26	0,10	0,15	0,17	0,08	0,144%	0,00436	
	36	35,85	36,23	36,21	36,10	0,15	0,23	0,21	0,20	0,04	0,269%	0,00418	
2	180	180,24	180,18	180,04	180,15	0,24	0,18	0,04	0,15	0,10	0,085%	0,00490	
	144	144,27	144,30	144,31	144,29	0,27	0,30	0,31	0,29	0,02	0,204%	0,00472	
	108	108,23	108,05	108,25	108,18	0,23	0,05	0,25	0,18	0,11	0,164%	0,00454	
	72	72,22	71,96	72,18	72,12	0,22	0,04	0,18	0,15	0,09	0,167%	0,00436	
	36	35,99	36,09	35,90	35,99	0,01	0,09	0,10	0,07	0,05	-0,019%	0,00418	
3	180	180,11	180,21	180,19	180,17	0,11	0,21	0,19	0,17	0,05	0,094%	0,00490	
	144	144,11	144,19	144,05	144,12	0,11	0,19	0,05	0,12	0,07	0,081%	0,00472	
	108	108,18	107,95	108,21	108,11	0,18	0,05	0,21	0,15	0,09	0,105%	0,00454	
	72	72,03	72,21	71,86	72,03	0,03	0,21	0,14	0,13	0,09	0,046%	0,00436	
	36	35,88	35,83	35,95	35,89	0,12	0,17	0,05	0,11	0,06	-0,315%	0,00418	
4	180	180,21	180,11	180,21	180,18	0,21	0,11	0,21	0,18	0,06	0,098%	0,00490	
	144	144,17	144,03	143,86	144,02	0,17	0,03	0,14	0,11	0,07	0,014%	0,00472	
	108	108,07	108,10	108,21	108,13	0,07	0,10	0,21	0,13	0,07	0,117%	0,00454	
	72	72,09	72,21	72,18	72,16	0,09	0,21	0,18	0,16	0,06	0,222%	0,00436	
	36	36,03	36,09	35,93	36,02	0,03	0,09	0,07	0,06	0,03	0,046%	0,00418	
5	180	180,19	180,24	180,18	180,20	0,19	0,24	0,18	0,20	0,03	0,113%	0,00490	
	144	144,17	143,97	144,22	144,12	0,17	0,03	0,22	0,14	0,10	0,083%	0,00472	
	108	107,97	108,19	108,27	108,14	0,03	0,19	0,27	0,16	0,12	0,133%	0,00454	
	72	71,81	72,27	71,85	71,98	0,19	0,27	0,15	0,20	0,06	-0,032%	0,00436	
	36	36,23	35,81	36,02	36,02	0,23	0,19	0,02	0,15	0,11	0,056%	0,00418	
6	180	180,25	180,28	180,29	180,27	0,25	0,28	0,29	0,27	0,02	0,152%	0,00490	
	144	144,30	144,06	144,19	144,18	0,30	0,06	0,19	0,18	0,12	0,127%	0,00472	
	108	108,30	108,25	108,14	108,23	0,30	0,25	0,14	0,23	0,08	0,213%	0,00454	
	72	72,07	72,26	72,27	72,20	0,07	0,26	0,27	0,20	0,11	0,278%	0,00436	
	36	36,15	36,06	36,21	36,14	0,15	0,06	0,21	0,14	0,08	0,389%	0,00418	
7	180	180,19	180,29	180,25	180,24	0,19	0,29	0,25	0,24	0,05	0,135%	0,00490	
	144	144,29	144,25	144,02	144,19	0,29	0,25	0,02	0,19	0,15	0,130%	0,00472	
	108	108,11	108,16	107,89	108,05	0,11	0,16	0,11	0,13	0,03	0,049%	0,00454	
	72	72,09	72,13	72,22	72,15	0,09	0,13	0,22	0,15	0,07	0,204%	0,00436	
	36	36,04	35,85	35,97	35,95	0,04	0,15	0,03	0,07	0,07	-0,130%	0,00418	
									Exactitud	0,1087%			

# Prueba	Longitudes Num 1				
	1	2	3	4	5
1	180,14	144,04	108,14	72,26	35,85
2	180,24	144,27	108,23	72,22	35,99
3	180,11	144,11	108,18	72,03	35,88
4	180,21	144,17	108,07	72,09	36,03
5	180,19	144,17	107,97	71,81	36,23
6	180,25	144,30	108,30	72,07	36,15
7	180,19	144,29	108,11	72,09	36,04
<b>Promedio</b>	<b>180,19</b>	<b>144,19</b>	<b>108,14</b>	<b>72,08</b>	<b>36,02</b>

# Prueba	Longitudes Num 2				
	1	2	3	4	5
1	180,28	144,17	108,12	71,90	36,23
2	180,18	144,30	108,05	71,96	36,09
3	180,21	144,19	107,95	72,21	35,83
4	180,11	144,03	108,10	72,21	36,09
5	180,24	143,97	108,19	72,27	35,81
6	180,28	144,06	108,25	72,26	36,06
7	180,29	144,25	108,16	72,13	35,85
<b>Promedio</b>	<b>180,23</b>	<b>144,14</b>	<b>108,12</b>	<b>72,13</b>	<b>35,99</b>

# Prueba	Longitudes Num 3				
	1	2	3	4	5
1	180,20	144,22	108,29	72,15	36,21
2	180,04	144,31	108,25	72,18	35,90
3	180,19	144,05	108,21	71,86	35,95
4	180,21	143,86	108,21	72,18	35,93
5	180,18	144,22	108,27	71,85	36,02
6	180,29	144,19	108,14	72,27	36,21
7	180,25	144,02	107,89	72,22	35,97
<b>Promedio</b>	<b>180,19</b>	<b>144,12</b>	<b>108,18</b>	<b>72,10</b>	<b>36,03</b>

# Prueba	Error Cuadrático			Desviación		
	Num 1	Num 2	Num 3	Num 1	Num 2	Num 3
1	0,2969	0,3380	0,2389	0,07106	0,09115	0,03931
2	0,1908	0,2689	0,2925	0,02577	0,05422	0,06340
3	0,1952	0,2522	0,2658	0,02719	0,04670	0,05071
4	0,0796	0,2017	0,2943	0,00243	0,02744	0,06432
5	0,3826	0,2937	0,2841	0,12412	0,06637	0,05928
6	0,2360	0,2162	0,2774	0,04232	0,03244	0,05603
7	0,1041	0,1976	0,3397	0,00544	0,02608	0,08943
<b>Promedio</b>	<b>0,2122</b>	<b>0,2526</b>	<b>0,2847</b>	<b>0,298331</b>	<b>0,344395</b>	<b>0,422466</b>
				<b>S</b>	<b>0,222984</b>	<b>0,239581</b>
				<b>R</b>	<b>0,116648</b>	<b>0,129556</b>
					<b>Repetibilidad</b>	<b>0,13017752</b>

Número de observaciones	Grados de libertad ( n-1 )	Nivel de confianza					
		99%	98%	95,45%	0,90	0,80	68,00
2	1	63,66	31,82	13,97	6,31	3,08	1,82
3	2	9,92	6,96	4,53	2,92	1,89	1,31
4	3	5,84	4,54	3,31	2,35	1,64	1,19
5	4	4,60	3,75	2,87	2,13	1,53	1,13
6	5	4,03	3,36	2,65	2,02	1,48	1,10
7	6	3,71	3,14	2,52	1,94	1,44	1,08
8	7	3,50	3,00	2,43	1,89	1,41	1,07
9	8	3,36	2,90	2,37	1,86	1,40	1,06
10	9	3,25	2,82	2,32	1,83	1,38	1,05
11	10	3,17	2,76	2,28	1,81	1,37	1,05
12	11	3,11	2,72	2,25	1,80	1,36	1,04
13	12	3,05	2,68	2,23	1,78	1,36	1,04
14	13	3,01	2,65	2,21	1,77	1,35	1,03
15	14	2,98	2,62	2,20	1,76	1,35	1,03
16	15	2,95	2,60	2,18	1,75	1,34	1,03
17	16	2,92	2,58	2,17	1,75	1,34	1,03
18	17	2,90	2,57	2,16	1,74	1,33	1,02
19	18	2,88	2,55	2,15	1,73	1,33	1,02
20	19	2,86	2,54	2,14	1,73	1,33	1,02
Infinito	Infinito	2,58	2,33	2,00	1,64	1,28	1,00

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			

# **ANEXO C**

```

import javax.sound.sampled.Port;
import javax.sound.sampled.Port;
import processing.serial.*; //importacion de la
libreria serial
import controlP5.*; // import controlP5 library
import processing.opengl.*;
ControlP5 cp5;
ControlGroup messageBox;
int messageBoxResult = -1;
String messageBoxString = "";
String altura = "";
String ancho = "";
String largo = "";
String f = "";
String g = "";
String h = "";
float number1;
float number2;
float number3;
String alturam = "";
String anchom = "";
String largom = "";
String fm = "";
String gm = "";
String hm = "";
float number4;
float number5;
float number6;
float number7;
float number8;
float number9;
float number10;
float number11;
float number12;
float number13;
float t;
float sum1;
float sum2;
float sum3;
float sum4;
float sum5;
float sum6;
float sum7;
float sum8;
int code;

```

```

Serial port; //nombre del puerto de serie
PrintWriter output; //crea el archivo de texto para
guardar los datos
char letter;
String words = "Bienvenido";
boolean status=false; //estado del color del
rectangulo

```

```

boolean overRect=false; //estado del mouse si
esta encima del rectangulo o no

```

```

int xlogo1=870; //posicion x de la imagen
int ylogo1=80; //posicion y de la imagen
int xlogo2=100; //posicion x de la imagen
int ylogo2=90; //posicion y de la imagen
int xlogo3=90; //posicion x de la imagen
int ylogo3=480; //posicion y de la imagen
int xlogo4=200; //posicion x de la imagen
int ylogo4=50; //posicion y de la imagen
int rquad=40; // es el radio del cuadrado
int xquad=200; //es la posicion x del rectangulo en
la pantalla en general
int yquad=200; // posicion y del rectangulo en la
pantalla en general
int valor; //valor d ela temperatura
float rojo;
float verde;
float azul;
String texto="SUCCESSFULL";
String texto1="FAIL";
String xlabel = "Entradas";
String ylabel = "Error (mm)";
String Heading = "Grafica Error";
String URL = "22/09/2016";
float Vcc = 5.0; // the measured voltage of your
usb
int NumOfVertDivisions=5; // dark gray
int NumOfVertSubDivisions=10; // light gray
int NumOfBars=6; // you can choose the number of
bars, but it can cause issues
int ScreenWidth = 600, ScreenHeight=400;
boolean firstContact = false;
int LeftMargin=100;
int RightMargin=80;
int TextGap=50;
int GraphYposition=80;
float BarPercent = 0.4;
int value;
PFont font;
PImage bg;
int temp;
float yRatio = 0.58;
int BarGap, BarWidth, DivisounsWidth;
int[] bars = new int[NumOfBars];
void setup() {
    port = new Serial(this,"COM48",9600); // abre el
puerto com3
    output=createWriter("DATOS SONDA.txt");
    //creamos el archivo de texto
    size(1000, 670,P3D);
    PFont font = createFont("arial", 15);
    font = createFont("Arial", 12);

```

```

cp5 = new ControlP5(this);
cp5.addTextfield("altura")
    .setPosition(220, 220)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(255, 0, 0))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("ancho")
    .setPosition(220, 280)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(255, 0, 0))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("largo")
    .setPosition(220, 340)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(255, 0, 0))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("alturam")
    .setPosition(340, 220)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(247, 212, 10))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("anchom")
    .setPosition(340, 280)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(247, 212, 10))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("largom")
    .setPosition(340, 340)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(247, 212, 10))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("f")
    .setPosition(220, 420)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(255, 0, 0))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("g")
    .setPosition(220, 480)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(255, 0, 0))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("h")
    .setPosition(220, 540)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(255, 0, 0))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("fm")
    .setPosition(340, 420)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(247, 212, 10))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("gm")
    .setPosition(340, 480)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(247, 212, 10))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addTextfield("hm")
    .setPosition(340, 540)
    .setSize(90, 36)
    .setFont(createFont("arial", 15))
    .setColor(color(247, 212, 10))
    .setAutoClear(false)
    .getCaptionLabel().setVisible(false)
;
cp5.addBang("calcular")
    .setPosition(340, 600)
    .setSize(80, 38)
    .getCaptionLabel().align(ControlP5.CENTER,
ControlP5.CENTER)
;
cp5.addBang("total")
    .setPosition(615, 220)
    .setSize(80, 38)

```

```

        .getCaptionLabel().align(ControlP5.CENTER,
ControlP5.CENTER)
        ;
        cp5.addBang("clear")
        .setPosition(225,600)
        .setSize(80,38)
        .getCaptionLabel().align(ControlP5.CENTER,
ControlP5.CENTER)
        ;
        noStroke();
        createMessageBox();
        Button          b          =
cp5.addButton("toggleBox", 1, 12, 640, 80, 20);
        b.setLabel("Salir");
        Button          a          =
cp5.addButton("toggleBox1", 1, 90, 220, 45, 35);
        a.setLabel("Ok");
        Button          c          =
cp5.addButton("toggleBox2", 1, 90, 290, 45, 35);
        c.setLabel("Fail");
        DivisounWidth = (ScreenWidth-LeftMargin-
RightMargin)/(NumOfBars);
        BarWidth      =
int(BarPercent*float(DivisounWidth));
        BarGap = DivisounWidth - BarWidth;
        textFont(createFont("", 30));
        textFont(font);
    }

void draw() {
    background(0,0,0);
    hint(ENABLE_DEPTH_TEST);
    pushMatrix();
    if(messageBox.isVisible()) {
        background(128);
    } else {
        background(0);
        fill(255);
        text(words+" Danilo", 120,height-10);
    }
    translate(width/2,height/2,mouseX);
    rotateY(t+=0.1);
    PImage imagen3=loadImage("Logo4.png");
    image(imagen3,xlogo4,ylogo4,500,300);
    popMatrix();
    hint(DISABLE_DEPTH_TEST);
    Axis();
    Labels();
    PrintBars();
    text(altura, 360,380);
    fill(74,211,45);
    text(sum1, 445,245);
    text(sum2, 445,302);
    text(sum3, 445,359);

    text(sum6, 445,445);
    text(sum7, 445,502);
    text(sum8, 445,559);
    fill(77,37,191);
    text(sum5, 730,250);
    if(mouseX > xquad-rquad && mouseX <
xquad+rquad && mouseY > yquad-rquad &&
mouseY < yquad+rquad)// si el mause se
encuentra dentro del rectangul
    {
        overRect=true;
        stroke(255,0,0); }
    else
    {
        overRect=false;
        stroke(0,0,0);
    }
    fill(255,252,255);
    textFont(createFont("Cambria-Bold-48.vlw", 36));
    textSize(19);
    text("UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS", 305, 35);
    text("ESPE EXTENCIÓN LATACUNGA", 360,
75);
    text("INGENIERIA MECATRÓNICA", 375, 115);
    if(port.available()>0) {
        valor=port.read(); }
    text("CONTROL DE CALIDAD",
393,155);//visualizamos la temperatura conun
texto
        imageMode(CENTER);          PImage
imagen=loadImage("logo-modificado1.png");
        image(imagen,xlogo1,ylogo1,150,150);
        imageMode(CENTER);
        PImage imagen1=loadImage("espe12.png");
        image(imagen1,xlogo2,ylogo2,150,150);
        imageMode(CENTER);
        PImage imagen2=loadImage("Sonda1.png");
        image(imagen2,xlogo3,ylogo3,500,300);
        fill(222,36,69);
        textSize(18);
        text("TOUCH PROBE", 15, 360);
        float touch=map(valor,15,32,0,255),
rojo=touch;
        verde=touch*-1+255;
        azul=touch*-1+255;
        text("Menu", 60, 205);
        text("Datos", 300, 180);
        text("Medidas Auxiliares", 260, 410);
        fill(24,188,219);
        text("AS", 25, 250);
        text("RS", 25, 310);
        text("Originales", 220, 205);
        text("Medidos", 340, 205);

```

```

text("Error (mm)", 460, 205);
text("Valor de error en la pieza %", 600, 205);
text("Grafica del error generado en las
mediciones", 600, 290);
text("Altura", 161, 245);
text("Ancho", 161, 302);
text("Largo", 161, 360);
text("X1", 170, 450);
text("X2", 170, 507);
text("X3", 170, 564);
}

void Headings(){
fill(0);
text("BarWidth",50,TextGap);
text("BarGap",250,TextGap);
text("DivisounsWidth",450,TextGap);
text(BarWidth,100,TextGap);
text(BarGap,300,TextGap);
text(DivisounsWidth,520,TextGap);
}

void PrintBars(){
int number1=10;
int number2=20;
int number3=30;
int number4=40;
int number5=50;
int number6=60;
int c=0;
textSize(16);
fill((0xe4+c),(255-number1+c),(0x1a+c));
stroke(90);
rect(0*DivisounsWidth+LeftMargin+470,
ScreenHeight-GraphYposition+260, BarWidth, -
number1);
fill(103,222,20);
text(float(number1)/(yRatio*(ScreenHeight))*Vcc,
0*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2+470,
ScreenHeight-number1-5-GraphYposition+260);
text("A",
0*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2 -5+470,
ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
text(0, 0*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2
+5+470, ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
fill((0xe4+c),(255-number2+c),(0x1a+c));
stroke(90);
rect(1*DivisounsWidth+LeftMargin+470,
ScreenHeight-GraphYposition+260, BarWidth, -
number2);
fill(103,222,20);
text(float(number2)/(yRatio*(ScreenHeight))*Vcc,
1*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2+470,
ScreenHeight-number2-5-GraphYposition+260);

```

```

text("A",
1*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2 -5+470,
ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
text(1, 1*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2
+5+470, ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
fill((0xe4+c),(255-number3+c),(0x1a+c));
stroke(90);
rect(2*DivisounsWidth+LeftMargin+470,
ScreenHeight-GraphYposition+260, BarWidth, -
number3);
fill(103,222,20);
text(float(number3)/(yRatio*(ScreenHeight))*Vcc,
2*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2+470,
ScreenHeight-number3-5-GraphYposition+260);
text("A",
2*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2 -5+470,
ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
text(2, 2*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2
+5+470, ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
fill((0xe4+c),(255-number4+c),(0x1a+c));
stroke(90);
rect(3*DivisounsWidth+LeftMargin+470,
ScreenHeight-GraphYposition+260, BarWidth, -
number4);
fill(103,222,20);
text(float(number4)/(yRatio*(ScreenHeight))*Vcc,
3*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2+470,
ScreenHeight-number4-5-GraphYposition+260);
text("A",
3*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2 -5+470,
ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
text(3, 3*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2
+5+470, ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
fill((0xe4+c),(255-number5+c),(0x1a+c));
stroke(90);
rect(4*DivisounsWidth+LeftMargin+470,
ScreenHeight-GraphYposition+260, BarWidth, -
number5);
fill(103,222,20);
text(float(number5)/(yRatio*(ScreenHeight))*Vcc,
4*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2+470,
ScreenHeight-number5-5-GraphYposition+260);
text("A",
4*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2 -5+470,
ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
text(4, 4*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2
+5+470, ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
fill((0xe4+c),(255-number6+c),(0x1a+c));
stroke(90);
rect(5*DivisounsWidth+LeftMargin+470,
ScreenHeight-GraphYposition+260, BarWidth, -
number6);
fill(103,222,20);

```

```

    text(float(number6)/(yRatio*(ScreenHeight))*Vcc,
    5*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2+470,
    ScreenHeight-number6-5-GraphYposition+260 );
    text("A",
    5*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2 -5+470,
    ScreenHeight-GraphYposition+20+260);
    text(5, 5*DivisounsWidth+LeftMargin+BarWidth/2
    +5+470, ScreenHeight-Graph Yposition+20+260 );
}

void Axis(){
    strokeWeight(1);
    stroke(220);
    for(float x=0;x<=NumOfVertSubDivisions;x++){
        int bars=(ScreenHeight-GraphYposition)-
        int(yRatio*(ScreenHeight)*(x/NumOfVertSubDivisio
        ns));
        line(LeftMargin-15+470,bars+260,ScreenWidth-
        RightMArgin-DivisounsWidth+50+470,bars+260);
    }
    strokeWeight(1);
    stroke(180);
    for(float x=0;x<=NumOfVertDivisions;x++){
        int bars=(ScreenHeight-GraphYposition)-
        int(yRatio*(ScreenHeight)*(x/NumOfVertDivisions))
        ;
        line(LeftMargin-15+470,bars+260,ScreenWidth-
        RightMArgin-DivisounsWidth+50+470,bars+260);
    }
    strokeWeight(2);
    stroke(90);
    line(LeftMargin-15+470, ScreenHeight-
    Graph Yposition+2+260, ScreenWidth-
    RightMArgin-DivisounsWidth+50+470,
    ScreenHeight-GraphYposition+2+260);
    line(LeftMargin-15+470,ScreenHeight-
    GraphYposition+2+260,LeftMargin-
    15+470,GraphYposition+260);
    strokeWeight(1);
}

void Labels(){
    textSize(18);
    fill(30,160,245);
    rotate(radians(-90));
    text(yLabel,-ScreenHeight/2-300,LeftMargin-
    45+470);
    textSize(18);
    for(float x=0;x<=NumOfVertDivisions;x++){
        int bars=(ScreenHeight-GraphYposition)-
        int(yRatio*(ScreenHeight)*(x/NumOfVertDivisions))
        ;
        text(round(x),-bars-265,LeftMargin-20+470);
    }

    textSize(18);
    rotate(radians(90));
    text(xLabel,LeftMargin+(ScreenWidth-LeftMargin-
    RightMArgin-50)/2+450,ScreenHeight-
    GraphYposition+40+260);
    textSize(24);
    fill(235,241,245);
    text(Heading,LeftMargin+(ScreenWidth-
    LeftMargin-RightMArgin-50)/2+420,70+250);
    fill(150);
    text(URL,ScreenWidth-RightMArgin-
    40+380,ScreenHeight-15+277);
}

public void calcular() {
    if(messageBox.isVisible()) {
        messageBox.show();
    } else {
        float number1=float(altura);
        float number2=float(ancho);
        float number3=float(largo);
        float number4=float(alturnam);
        float number5=float(anchom);
        float number6=float(largom);
        float number7=float(f);
        float number8=float(g);
        float number9=float(h);
        float number10=float(fm);
        float number11=float(gm);
        float number12=float(hm);
        sum1=number1-number4;
        sum2=number2-number5;
        sum3=number3-number6;
        sum6=number7-number10;
        sum7=number8-number11;
        sum8=number9-number12;
    }
}

public void total() {
    if(messageBox.isVisible()) {
        messageBox.show();
    } else {
        sum4=sum1+sum2+sum3+sum6+sum7+sum8;
        sum5=(sum4/6)*100;
    }
}

public void clear() {
    if(messageBox.isVisible()) {
        messageBox.show();
    } else {
        cp5.get(Textfield.class,"altura").clear();
        cp5.get(Textfield.class,"ancho").clear();
    }
}

```

```

cp5.get(Textfield.class,"largo").clear();
cp5.get(Textfield.class,"alturam").clear();
cp5.get(Textfield.class,"anchom").clear();
cp5.get(Textfield.class,"largom").clear();
cp5.get(Textfield.class,"l").clear();
cp5.get(Textfield.class,"g").clear();
cp5.get(Textfield.class,"h").clear();
cp5.get(Textfield.class,"fm").clear();
cp5.get(Textfield.class,"gm").clear();
cp5.get(Textfield.class,"hm").clear();
}
}

void toggleBox(int theValue) {
if(messageBox.isVisible()) {
messageBox.hide();
exit();
} else {
messageBox.show();
}
}

void toggleBox1(int theValue) {
port.write("A");
}

void toggleBox2(int theValue) {
port.write("B");
}

void createMessageBox() {
messageBox =
cp5.addGroup("messageBox",width/2
150,100,300);
messageBox.setBackgroundHeight(120);
messageBox.setBackgroundColor(color(0,100));
messageBox.hideBar();
TextLabel l =
cp5.addTextlabel("messageBoxLabel","Ingrese su
codigo aqui.",20,20);
l.moveTo(messageBox);
Textfield f =
cp5.addTextfield("inputbox",20,36,260,20);
f.getCaptionLabel().setVisible(false);
f.moveTo(messageBox);
f.setColorForeground(color(20));
f.setColorBackground(color(20));
f.setColorActive(color(100));
Button b1 =
cp5.addButton("buttonOK",0,65,80,80,24);
b1.moveTo(messageBox);
b1.setColorBackground(color(40));
b1.setColorActive(color(20));
b1.setBroadcast(false);

b1.setValue(1);
b1.setBroadcast(true);
b1.setCaptionLabel("OK");
Button b2 =
cp5.addButton("buttonCancel",0,155,80,80,24);
b2.moveTo(messageBox);
b2.setBroadcast(false);
b2.setValue(0);
b2.setBroadcast(true);
b2.setCaptionLabel("Cancel");
b2.setColorBackground(color(40));
b2.setColorActive(color(20));
}

void inputbox(String theString) {
println("got something from the inputbox :
"+theString);
messageBoxString = theString;
messageBoxString = "daniilo";
}

void buttonOK(int theValue) {
println("a button event from button OK.");
messageBoxString =
((Textfield)cp5.getController("inputbox")).getText();
messageBoxResult = theValue;
code=messageBoxResult;
int code=int(messageBoxString);
if(code==5326) {
messageBox.hide();
}
else{
messageBox.isVisible();
}
}

void buttonCancel(int theValue) {
println("a button event from button Cancel.");
messageBoxResult = theValue;
exit();
messageBox.hide();
}

void keyPressed(){
if(key=='x' || key=='X')
{
exit();//Salimos del programa
}
}

```

# **ANEXO D**



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

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

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**CERTIFICADO**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores; Mauricio Danilo Chilingua Malliquinga y Walter Miguel Jara Ramos.

En la ciudad de Latacunga a los 10 días del mes de enero del 2017.

Ing. Fausto Acuña

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hallo

DIRECTOR DE CARRERA

Aprobado por:

Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO