

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA
DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**



**TRABAJO DE GRADO PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA:

**“DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA
MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA
MÁQUINA CNC”**

AUTOR:

JASON ADEL NOBOA RIVERA

DIRECTOR:

ING. COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA

IBARRA – ECUADOR

2022



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE
LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
Cédula de identidad:	1004780365
Apellidos y nombres:	Noboa Rivera Jason Adel
Dirección :	Ibarra, Calle Guayas 2-282 y Av. 13 de Abril
Email :	janoboar@utn.edu.ec
Teléfono fijo:	Teléfono móvil: 0999685685

DATOS DE LA OBRA	
Título:	"Diseño de una interfaz hombre máquina para la medición y control de parámetros de corte en una máquina CNC"
Autor:	Noboa Rivera Jason Adel
Fecha:	17 de octubre de 2022
Programa:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
Título por el que opta:	Ingeniería Mecatrónica
Asesor / director:	Ing. Cosme Mejía

CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra concepto de la presente autorización es original y se la desarrollo, sin violar los derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de octubre de 2022

EL AUTOR



 Jason Adel Noboa Rivera



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

Que la Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica con el tema **“DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC”**, ha sido desarrollado y terminado en su totalidad por el Sr. Jason Adel Noboa Rivera, con cedula de identidad: 100478036-5, bajo mi supervisión para lo cual firmo en constancia.

Ing. Cosme Mejía

DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a toda mi familia, por haberme apoyado y siempre enviarme mensajes de ánimo a pesar de la distancia, también a Em por haber estado ahí para mí en momentos donde parecía que nada salía bien.

A todos los Ingenieros que han contribuido para mi formación académica, y sobre todo al Ing. Cosme Mejía por haberme guiado en todo el transcurso de la elaboración del documento.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado para mi madre, que siempre ha estado ahí para apoyarme y sacarme adelante a pesar de cualquier cosa, y sobre todo para que se siente orgullosa de la persona que ha cuidado y criado.

RESUMEN

Este trabajo muestra la conceptualización, diseño y desarrollo de una HMI la cual permitirá la obtención de parámetros de corte en el mecanizado CNC, la Interfaz se basa en Arduino y Labview. Tiene como finalidad presentar una interfaz amigable, intuitiva y fácil de usar.

La selección de los sensores que se implementaron está basada en los criterios de una Matriz QFD y criterios ponderados, en donde la selección se basa en los requerimientos del usuario.

Los sensores y la interfaz se implementaron en la máquina que ha sido desarrollada en el trabajo de titulación llamado “Máquina de Control Numérico Computacional para corte de planchas de aluminio por desbaste de material: Diseño”, obteniendo resultados favorables de medición y con errores porcentuales con un error porcentual promedio de 1,85% para todos los sensores.

ABSTRACT

This work shows the design and development of a Human-Machine Interface that will facilitate the obtaining of cutting parameters of machining in a Computer Numerical Control Machine, based on Arduino and Labview. It aims to present a friendly, intuitive, and easy to use interface.

The selection of the sensors that were implemented are based on the criteria of a QFD Matrix and weighted criteria, where the selection is based on user requirements.

The sensors and the interface were implemented in the machine that has been developed in the degree work called "Computer Numerical Control Machine for Aluminum Plate Cutting by Material Roughing: Design", obtaining favorable measurement results and with relatively low percentage errors, with a percent error of all sensors of 1.85%.

ÍNDICE

Contenido

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA _____	¡Error! Marcador no definido.
CONSTANCIA _____	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICACIÓN _____	III
AGRADECIMIENTO _____	IV
DEDICATORIA _____	V
RESUMEN _____	VI
ABSTRACT _____	VII
ÍNDICE _____	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS _____	XI
ÍNDICE DE TABLAS _____	XIII
INTRODUCCIÓN _____	XIV
CAPÍTULO I _____	22
1. MARCO TEÓRICO _____	22
1.1. Procesos de manufactura _____	22
1.2. Máquinas de control numérico computarizado (CNC) _____	23
1.3. Parámetros de corte _____	26
1.3.1. Velocidad de corte _____	27
1.3.2. Avance por diente _____	28
1.3.3. Velocidad de avance _____	28
1.3.4. Profundidad de pasada axial y radial _____	28
1.4. Tipo de sensores _____	29
1.5. Tipos de señales y acondicionadores _____	31
1.5.1. Acondicionadores de señal _____	33
1.6. Interfaces Humano-Máquina _____	34
1.6.1. Tipos de HMI _____	36
1.6.2. Pautas de diseño de una Interfaz de un sistema SCADA _____	36
CAPÍTULO II _____	38
2. METODOLOGÍA _____	38

2.1.	Puesta a punto de entorno de ensayos _____	38
2.2.	Fase 1 _____	40
2.2.1.	Actividad 1: Despliegue de la función de calidad (QFD) _____	40
2.2.2.	Actividad 2: Voz del usuario _____	40
2.2.3.	Actividad 3: Voz del ingeniero _____	41
2.2.4.	Actividad 4: Diagrama de la casa de la calidad _____	42
2.3.	Fase 2 _____	42
2.3.1.	Actividad 1: Análisis funcional _____	42
2.3.2.	Actividad 2: Diagramas funcionales _____	43
2.3.3.	Actividad 3: Soluciones por módulo _____	44
2.3.3.1.	Módulo 1 _____	44
2.3.3.2.	Módulo 2 _____	44
2.3.3.3.	Módulo 3 _____	53
2.3.3.4.	Propuesta final de diseño _____	59
2.4.	Simulación y diseño _____	60
2.4.1.	Plataforma _____	60
2.4.2.	Sensor de corriente SCT-013-030 _____	62
2.4.2.1.	Acondicionamiento de la señal _____	62
2.4.3.	Acelerómetro y Giroscopio MPU6050 _____	63
2.4.4.	Encoder Singswise 360P/R _____	64
2.4.5.	Software de simulación _____	64
2.5.	Implementación física del circuito _____	65
2.6.	Implementación de sensores _____	66
2.6.1.	Sensor de Corriente _____	66
2.6.2.	Giroscopio MPU6050 _____	66
2.6.3.	Encoders _____	67
2.7.	Implementación de interfaz _____	69
2.8.	Ejecución del experimento _____	70
2.8.1.	Instalación y cableado _____	71
2.8.2.	Configuración de los sensores _____	77
2.8.2.1.	Configuración inicial en Arduino IDE _____	77
2.8.2.2.	Configuración del void setup() de Arduino IDE _____	79
2.8.2.3.	Configuración del void loop() de Arduino IDE _____	80
2.8.2.4.	Configuración para mostrar valores en Arduino IDE _____	81
CAPÍTULO III _____		83
3.	PRUEBAS Y RESULTADOS _____	83
3.1.	Resultados de implementación _____	83

3.2.	Validación de resultados	83
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
4.1.	Conclusiones	90
4.2.	Recomendaciones	91
5.	BIBLIOGRAFÍA	92
6.	ANEXOS	98
6.1.	Anexo 1. Casa de la Calidad	1
6.2.	Anexo 2: Código implementado en Arduino	2
6.3.	Anexo 3: Código G del mecanizado para pruebas de funcionamiento	6
6.3.1.	Pruebas a distintas velocidades	6
6.3.2.	Pruebas a distintas inserciones	6
6.4.	Anexo 4: Planos eléctricos	9
6.5.	Anexo 5: Distribución de los colores en cable UTP	11
6.6.	Anexo 6: Planos	13
6.7.	Anexo 7: Hojas de datos	22

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Primera fresadora CNC</i>	24
<i>Figura 2 Proceso CAD/CAM</i>	25
<i>Figura 3 Representación de la velocidad de corte</i>	27
<i>Figura 4 Representaciones gráficas de señales</i>	32
<i>Figura 5 Ejemplo de señales analógicas y digitales</i>	33
<i>Figura 6 Proceso de acondicionamiento de señales</i>	34
<i>Figura 7 Ejemplo de HMI en LabView</i>	35
<i>Figura 8 Panel frontal de HMI para el control de nivel de tanques</i>	37
<i>Figura 9 Diagrama funcional de Nivel 0.</i>	43
<i>Figura 10 Diagrama funcional de Nivel 1.</i>	43
<i>Figura 11 Diagrama funcional de Nivel 2 y módulos.</i>	43
<i>Figura 12 Sensor de corriente CT no invasivo.</i>	45
<i>Figura 13 Sensor Hall de corriente HK-KY01</i>	46
<i>Figura 14 Encoder absoluto E6C3-A</i>	47
<i>Figura 15 Resolver brushless y synchro</i>	47
<i>Figura 16 Galgas extensiométricas</i>	48
<i>Figura 17 Tarjeta de adquisición de datos</i>	48
<i>Figura 18 Sistemas Embebidos</i>	49
<i>Figura 19 Panel operador táctil</i>	54
<i>Figura 20 HMI a través de software</i>	55
<i>Figura 21 Partes de Arduino UNO</i>	61
<i>Figura 22 Pines de Arduino UNO</i>	61
<i>Figura 23 Amplificador operacional LM358</i>	62
<i>Figura 24 Conexión de amplificador TLC084</i>	63
<i>Figura 25 Principio de Coriolis</i>	63
<i>Figura 26 Simulación de sensores en Multisim</i>	64
<i>Figura 27 Conexión de los sensores</i>	65
<i>Figura 28 Adaptador de sensor de corriente</i>	66
<i>Figura 29 Adaptador Giroscopio</i>	67
<i>Figura 30 Acoples Flexibles de 10mm a 5mm</i>	67
<i>Figura 31 Soporte para encoder Eje X</i>	68
<i>Figura 32 Soporte para encoder Eje Y</i>	69
<i>Figura 33 Diseño de HMI</i>	70
<i>Figura 34 Placa Arduino colocada en la estructura del Eje X</i>	71
<i>Figura 35 Sensor de corriente situado dentro del gabinete</i>	72
<i>Figura 36 Salidas en el gabinete de mando</i>	73

<i>Figura 37 Soporte para conector USB.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 38 Fuente de alimentación de 5V</i>	<i>75</i>
<i>Figura 39 Interior del gabinete de control y sus fases</i>	<i>75</i>
<i>Figura 40 Posicionamiento de encoder Eje X</i>	<i>76</i>
<i>Figura 41 Posicionamiento de encoder Eje Y</i>	<i>76</i>
<i>Figura 42 Posicionamiento de Giroscopio.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 43 Librerías incluidas en la programación de Arduino</i>	<i>78</i>
<i>Figura 44 Variables para el censado de corriente</i>	<i>78</i>
<i>Figura 45 Variables para el censado de los encoders</i>	<i>78</i>
<i>Figura 46 Variables para el censado del Giroscopio</i>	<i>79</i>
<i>Figura 47 Código del void setup() de Arduino IDE</i>	<i>80</i>
<i>Figura 48 Código del void loop() de Arduino IDE</i>	<i>80</i>
<i>Figura 49 Función mostrar_valores</i>	<i>81</i>
<i>Figura 50 Función mostrar_valores</i>	<i>82</i>
<i>Figura 51 Simulación de código mediante NC Viewer</i>	<i>84</i>
<i>Figura 52 Prueba de corte en distintas velocidades</i>	<i>84</i>
<i>Figura 53 Simulación de código G para prueba de Giroscopio</i>	<i>87</i>
<i>Figura 54 Prueba de corte en distintas inserciones</i>	<i>87</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes.</i>	29
<i>Tabla 2 Características de sensores de corriente</i>	30
<i>Tabla 3 Sensores de velocidad y desplazamiento.</i>	31
<i>Tabla 4 Matriz morfológica Módulo 2</i>	50
<i>Tabla 5 Evaluación de cada criterio del módulo 2</i>	51
<i>Tabla 6 Evaluación de alternativas: Precisión</i>	52
<i>Tabla 7 Evaluación de alternativas: Costo</i>	52
<i>Tabla 8 Evaluación de alternativas: Disponibilidad</i>	52
<i>Tabla 9 Evaluación de alternativas: Fácil Implementación</i>	53
<i>Tabla 10 Evaluación de los resultados del análisis del módulo 2</i>	53
<i>Tabla 11 Matriz morfológica del módulo 3</i>	57
<i>Tabla 12 Evaluación de cada criterio del módulo 2</i>	58
<i>Tabla 13 Análisis de alternativas: Costo</i>	58
<i>Tabla 14 Análisis de alternativas: Usabilidad</i>	58
<i>Tabla 15 Análisis de alternativas: Fiabilidad</i>	59
<i>Tabla 16 Análisis de alternativas: Conectividad</i>	59
<i>Tabla 17 Evaluación de los resultados del análisis del módulo 3</i>	59
<i>Tabla 18 Tabla de resultados: Sensor de corriente</i>	85
<i>Tabla 19 Tabla de resultados: Encoders</i>	86
<i>Tabla 20 Tabla de resultados: Giroscopio</i>	88

INTRODUCCIÓN

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Ecuador la gran mayoría de procesos de manufactura enfocados a la carpintería se realizan de manera manual; en cuanto a los procesos manuales [1] comentan que el trabajo realizado por los carpinteros resulta dificultoso cuando se necesita realizar operaciones de manera repetitiva, además que el tiempo de manufactura se prolonga debido a las constantes mediciones que se necesitan para que la pieza sea lo más parecido al modelo.

Debido a los inconvenientes, la mayor parte de las personas que trabajan en madera han optado por cambiarse parcialmente a los procesos de manufactura automatizados, los cuales, “usando una máquina para la elaboración de pequeñas partes proveen una flexibilidad y eficiencia en la manufactura, aprovechando y reduciendo costos” [1]. Aunque presentan una mejoría en lo que tiene que ver al tiempo de fabricación y precisión siguen presentando problemas debido al mal uso de las herramientas de corte.

Entonces nace la necesidad de conocer el uso adecuado de las herramientas genéricas de corte para que el trabajo realizado en la madera sea eficiente, estableciendo los parámetros adecuados para el correcto uso de las máquinas CNC en la elaboración de productos.

Sin embargo, la obtención de estos parámetros resulta en un arduo trabajo ya que no se posee los equipos adecuados, haciendo que la obtención de los datos necesarios para generar dichos parámetros sea un trabajo que en ocasiones toman años, estas observaciones se hacen basado en la experiencia.

Por todo lo planteado anteriormente, en vista de los problemas presentados anteriormente se debe realizar el adecuamiento de una máquina CNC que sea capaz de brindar las facilidades de un entorno óptimo para la obtención de los parámetros de corte mediante un sistema de adquisición de datos y una interfaz humano-máquina.

2. OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar una interfaz hombre máquina para la medición y control de parámetros de corte en una máquina CNC.

Objetivos Específicos

- Definir los sistemas de medición de los parámetros de corte de una máquina CNC.
- Seleccionar la instrumentación adecuada para el sistema de medición y control.
- Implementar el sistema de medición y control seleccionado con una interfaz amigable.
- Validar el sistema de medición y control.

3. ALCANCE

Este trabajo de investigación iniciará con el análisis de los parámetros de corte y maquinado que influyen en los procesos de manufactura con control numérico para luego seleccionar los diferentes sensores que ayudarán a la medición de los parámetros. Se realizará la implementación de sensores sobre la máquina CNC de corte de aluminio que se encuentra en los laboratorios de Mecatrónica. A continuación, se implementará una interfaz amigable en donde se presentará y almacenará los resultados de las mediciones de los diferentes parámetros en la máquina de ensayos. Finalmente se validará los resultados obtenidos a través de experimentos.

4. JUSTIFICACIÓN

Dada la gran cantidad de problemas que genera la manufactura manual en la industria de la carpintería, se ha vuelto sumamente necesario dar el paso hacia la industria automatizada lo cual generará un gran avance tanto tecnológico como industrial en el Ecuador.

Para dar este importante paso es necesario que se conozcan cuáles son los parámetros adecuados para el mecanizado, por lo que es sumamente importante constar de un centro de ensayos en donde se facilite la obtención de dichos parámetros.

Se considera que, si se conocen estos parámetros, resultará mucho más eficiente el proceso de mecanizado, que provocará una mejoría considerable en la calidad y precisión del producto terminado. Y esto a su vez representará mejorías en el sector industrial a nivel nacional, sin dejar pasar por alto el impacto económico que resultará para los empresarios de la pequeña y mediana industria; al poder vender un producto de mejor calidad ocasionará un crecimiento en estas empresas. Según Carranco presentan un gran aporte a la generación de empleo, lo cual contribuye al desarrollo del aparato productivo nacional de un país y aporta al cambio de la matriz productiva [2]

Cabe recalcar que una de las principales mejoras que se obtiene al conocer la más eficiente configuración de la máquina en el mecanizado hace que la eficiencia energética tome un papel fundamental, esto resultará en una disminución del exceso de consumo de energía de la máquina que a su vez bajará el gasto económico en la elaboración del producto.

La Universidad Técnica del Norte como una de las principales academias de la zona, al ser un referente en los procesos de manufactura, se encuentra investigando sobre los parámetros de corte de herramientas genéricas en los procesos de manufactura más utilizados en el sector. Es por ello por lo que es de vital importancia que se desarrolle la investigación en los laboratorios de manufactura y CNC de la UTN.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Procesos de manufactura

Hoy en día cualquier cosa ha pasado por procesos de manufactura, no se puede encontrar nada de del entorno de manera natural, ya que todos estos objetos han pasado por diversas transformaciones a partir de la materia prima, la combinación de dichos procesos es a lo que se denomina manufactura. Según Schmid es el proceso de convertir la materia prima en productos, incluye el diseño del producto, la selección de la materia prima y la secuencia de procesos a través de los cuales será manufacturado el producto [3].

Por otro lado, en la ingeniería industrial la manufactura es considerada como un mecanismo para la transformación de materiales en artículos útiles para la sociedad. También considerada como la estructuración y organización de acciones que permiten a un sistema lograr una tarea determinada [4].

Si bien los procesos de manufactura han ayudado considerablemente a la industria, hoy en día no resulta ser suficiente, pues lo único que las empresas buscan es reducir costos y ganar competitividad y para ello se han creado diversos conceptos y enfoques, entre los conceptos adoptados últimamente se encuentre la manufactura esbelta, que se basa en la identificación y eliminación de desperdicios, mejora de calidad y a la reducción de tiempo y costo en la producción [5].

Como un concepto simple, la manufactura esbelta es una manera simple de mejorar las operaciones o actividades de cualquier sistema de producción. Es hacer más con menos y a su vez emplear menor esfuerzo (menor esfuerzo humano, menos equipamiento, tiempo y espacio) [6].

Además, se ha clasificado a los métodos de manufactura en dos grupos: el enfoque tradicional y la manufactura avanzada.

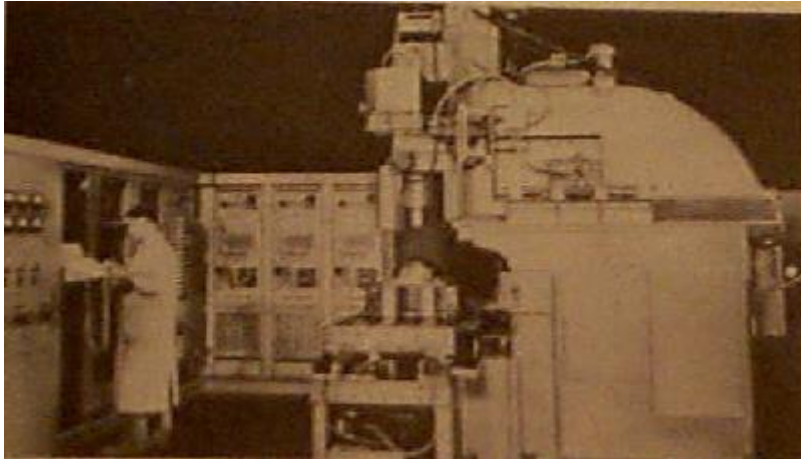
Como enfoque tradicional tenemos al método que desarrolla el producto de manera secuencial, con pasos bien definidos que van desde la fase de diseño, pasando a la fase de prototipado y culminando con la elaboración del producto final. Una fase después de la otra sin ningún tipo de relación entre ellas, es decir, aisladas entre sí [7].

Por el contrario, la ingeniería concurrente o simultánea al contrario del enfoque tradicional se basa en el perfecto equilibrio entre todas las fases del proceso, no quiere decir que todas las fases se realicen al mismo tiempo sino que todas y cada una de las fases están conectadas de tal manera que todas se aporten entre sí, por ejemplo, mientras la fase de diseño se realiza, la fase de elaboración puede aportar con la disponibilidad de materiales, de esta manera se pueden evitar inconvenientes en la fabricación del producto final [7].

Como solución a todos los requerimientos de producción, han surgido los procesos de manufactura por control numérico, este hace que el proceso de producción sea sumamente eficiente y mucho más rápido.

1.2.Máquinas de control numérico computarizado (CNC)

Para conocer acerca de la importancia de la implementación de las máquinas CNC es importante conocer su definición, las siglas CNC hacen referencia a Control Numérico Computarizado, lo que quiere decir control automatizado de una máquina de herramientas para la realización de determinados trabajos mecánicos [8], la primera máquina CNC diseñada se puede observar en la Figura 1.

Figura 1*Primera fresadora CNC*

Nota: [9]

Las CNC se originan en los años 50 en el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) en donde se automatiza por primera vez una fresadora, una computadora es la encargada de controlar la posición y la velocidad de los motores con la cual se puede hacer movimientos que no se logran manualmente como círculos, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales, el término control numérico se debe a que las órdenes emitidas por el computador hacia la máquina que los interpreta se presentan como códigos numéricos [9], (por ejemplo: G00 X10 Y-5, que significa desplazamiento rápido de la herramienta de corte a la posición 10 en el eje X y -5 en el eje Y).

Hay dos maneras en las que el operario puede generar el código con las instrucciones para el mecanizado de una pieza, la primera es la programación manual en la cual se escribe el programa a mano en base a razonamiento lógico, cálculos y experiencia en los procesos de manufactura. La programación automática es el segundo método, se hacen uso de herramientas de software como el CAD/CAM el cual convierte un diseño 3D en código G automáticamente, la máquina recibe esta información la interpreta y realiza el mecanizado para la obtención de la pieza final [10], el proceso general se describe a continuación en la Figura 2.

Figura 2
Proceso CAD/CAM



Nota: [11]

Estas máquinas resultan ser la evolución de los procesos de manufactura siendo utilizados en diversas aplicaciones como prototipos, modelados y artesanías, llevando el uso del CNC a todo tipo de maquinaria: tornos, rectificadoras, electroerosionadoras, máquinas de coser, etc. Resultan ser una buena opción en la industria pues aumentan la productividad, minimizan los costos, incrementan la calidad del producto terminado y optimizan los procesos de producción ya que estas máquinas permiten diseñar e implementar con características impresionantes de precisión y funcionales de forma muy económica [7], [12].

Con el desarrollo de las tecnologías enfocadas en las máquinas y herramientas CNC han surgido varios tipos de procesos de mecanizado tomando en cuenta diferentes aspectos como la exactitud, precisión, volumen de metal cortado por unidad de tiempo, entre algunos otros.

El mecanizado convencional, consiste esencialmente en la utilización de máquinas y herramientas convencionales, es decir, sin la utilización de controles avanzados, con las que se obtiene un acabado final con una precisión que ronda entre 200 μm y 50 μm . El mecanizado de precisión, como su nombre lo indica consiste en realizar el corte de metal, para obtener

tolerancias que se encuentran entre $5\ \mu\text{m}$ y $0,5\ \mu\text{m}$ y rugosidad superficial inferior a $0,18\ \mu\text{m}$. También, existe el denominado maquinado de ultra-precisión, donde se alcanzan tolerancias de entre $0,05\ \mu\text{m}$ y $0,005\ \mu\text{m}$ [13], [14]. Para que los diferentes enfoques de mecanizado tengan el resultado que tienen es imprescindible el buen manejo de los parámetros de corte de los cuales se hablará en la siguiente sección, dichos parámetros garantizan la calidad del acabado del mecanizado y aseguran una reducción en el desgaste tanto de la máquina como de la herramienta de corte prolongando de esta manera la vida útil de ambos [15].

1.3. Parámetros de corte

Un proceso de maquinado de alta velocidad tiene la capacidad de producir piezas a una alta velocidad y calidad, sin embargo, para que esto suceda es necesario de una correcta configuración de la máquina. De acuerdo con Zuperl, la selección óptima de parámetros de maquinado es un elemento clave para la operación eficiente [16].

Para prevenir daños y evitar fallas en el maquinado, las condiciones de operación se configuran de una manera conservadora. La mayoría de los parámetros para el mecanizado se configuran con datos recomendados, desaprovechando un rango grande de valores de avance y velocidad de corte. Esto causa costosas operaciones, ya que al trabajar con parámetros conservadores no se optimiza el proceso, varios de estos problemas se deben a la limitación de datos técnicos, lo que provoca que muchas veces dichos datos se centren netamente en la experiencia del operador.

Para evitar desperdicio de recursos en el mecanizado es importante conocer los parámetros de corte necesarios para una operación óptima. Entre los principales parámetros de corte podemos encontrar los siguientes:

- Diámetro nominal [mm]

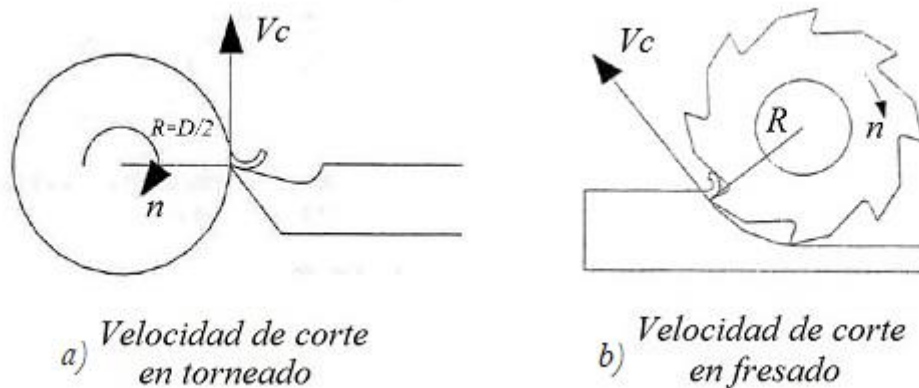
- Velocidad de corte $[\frac{m}{min}]$
- Avance por diente $[\frac{mm}{z}]$
- Velocidad de avance $[\frac{mm}{min}]$
- Profundidad de pasada axial y radial $[mm]$
- Número de revoluciones $[rpm]$

1.3.1. Velocidad de corte

La velocidad de corte es la velocidad tangencial periférica de los filos de corte de la fresa y la pieza de trabajo, se representa gráficamente la velocidad de corte tanto de torneado como de fresado en la Figura 3. Su valor suele darse en m/min. Depende directamente de la velocidad del husillo y del diámetro de la fresa [17].

Figura 3

Representación de la velocidad de corte



Nota: a) V_c = Velocidad de corte, n = revoluciones en RPM y b) V_c = Velocidad de corte, n = revoluciones en RPM, R = radio de la herramienta [18]

La siguiente ecuación representa la fórmula para determinar la velocidad de corte.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Donde:

N : Indica las revoluciones del husillo [rpm].

D : Representa el diámetro nominal de la herramienta de corte [mm].

V_c : Es el valor de la velocidad de corte dada en [$\frac{m}{min}$].

1.3.2. Avance por diente

Es la distancia que recorre un diente al entrar en contacto con el material, se encuentra expresado en las unidades [$\frac{mm}{diente}$]. Llamado carga de viruta, y representa el tamaño de la viruta formada por cada filo de corte [19], este parámetro viene dado en las características de la herramienta de corte que ofrece el fabricante.

1.3.3. Velocidad de avance

Es la velocidad de avance que posee la herramienta mientras avanza transversalmente por el material. Sus dimensiones son [$\frac{m}{min}$]. La velocidad de avance está definida por la ecuación (2):

$$V_f = N * z * f_z \quad (2)$$

Donde, N representa la velocidad del husillo, z el número de dientes y f_z el avance por diente.

1.3.4. Profundidad de pasada axial y radial

Se define como la distancia de la penetración axial y radial de la herramienta de corte, viene expresada en [mm]. Normalmente para estos valores existen tablas establecidas por los fabricantes de las herramientas donde establecen parámetros de corte óptimos para las operaciones de desbaste y acabado en donde se establece la profundidad máxima de las pasadas [20].

1.4. Tipo de sensores

Los sensores son dispositivos capaces de detectar magnitudes físicas o químicas de todo tipo las cuales son llamadas variables de instrumentación y transformadas a señales o variables eléctricas, las variables de instrumentación pueden ser: temperatura, intensidad, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, fuerza, humedad, presión, torsión, etc. [21]

El número de sensores que existen hoy en día es tan amplio que no es posible establecer una clasificación de todos los sensores sin un criterio establecido. Para la ingeniería resulta más atractiva la clasificación de los sensores de acuerdo con el parámetro de la variable a medir, en la Tabla 1 se presenta las clasificaciones de los sensores.

Tabla 1

Sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes.

Sensores	Posición Distancia Desplazamiento	Velocidad	Aceleración Vibración	Temperatura	Presión	Caudal Flujo	Nivel	Fuerza	Humedad
Resistivos	Potenciómetros Galgas Magnetorresistivas		Galgas + masa- resorte	RTD Termistores	Potenciómetros + tubo Bourdon	Anenómetros de hilo caliente Galgas + voladizo Termistores	Potenciómetro + flotador Termistores LQR	Galgas capacitivas	Humisor
Capacitivos	Condensador diferencial				Condensador variable + diafragma		Condensador variable	Magnet elástico LVDT + célula carga	Dieléctrico variable
Inductivos y electromagnéticos	LVDT Corrientes Foucault Resolver Inductosyn Efecto Hall	Ley Faraday LVDT Efecto Hall Corrientes Foucault	LVDT + masa- resorte		LVDT + diafragma Reluctancia variable + diafragma	LVDT + rotámetro Ley de Faraday	LVDT + flotador Corrientes Foucault	Piezoeléctricos	
Generadores			Piezoeléctricos + masa resorte	Termopares Piroeléctricos	Piezoeléctricos				
Digitales	Codificadores incrementales y absolutos	Codificadores incrementales		Osciladores de cuarzo	Codificado + tubo Bourdon	Vórtices			SAW
Uniones p-n	Fotoeléctricos			Diodo Transistor Convertidores T/I			Fotoeléctricos		
Ultrasonidos	Reflexión	Efecto Doppler				Efecto Doppler	Reflexión Absorción		

Nota: [22]

Para beneficio del trabajo, se analizarán las ventajas y desventajas de ciertos sensores orientados a las variables que se necesitan para definir los parámetros de corte para un buen mecanizado. La primera variable para medir es la potencia que consume la máquina al momento de realizar el mecanizado, para ello se estudiarán las diferentes propuestas de sensores que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2
Características de sensores de corriente

Tipos de Sensores para corriente			
	Shunt	Efecto Hall	CT
Tipo de Conexión	Directa	Indirecta	Indirecta
Corriente	AC/DC	AC/DC	AC
Precisión	Alto	Medio	Medio
Rango	Bajo	Medio	Alto
Aislamiento	No	Si	Si
Concepto	Son resistencias normales, que se usan para medir la corriente. Con la tensión en sus extremos se puede calcular la corriente que la atraviesa con la Ley de Ohm.	Cuando los electrones se empujan más hacia un lado del conductor se crea una diferencia de potencial entre los dos lados del conductor. Esta diferencia de potencial era directamente proporcional a la fuerza del campo magnético. campos magnéticos.	Una corriente alta se transforma en una más baja utilizando un portador magnético, por lo que se pueden medir corrientes muy altas de manera segura y eficiente.
Ventajas	- Fácil aplicación - Simple funcionamiento	- Carga aislada del sensor - Requiere muy poca energía	- Carga aislada del sensor - Requiere poca energía - No es necesario interrumpir el circuito - Alto rendimiento - Compacto y liviano
Desventajas	- Disipa energía por efecto Joule - Es necesario abrir el circuito para implementarla	- No es lineal en todo el intervalo de medición - Sensible a la temperatura - Error con fuentes magnéticas cercanas	- Únicamente puede medir valores de corriente alterna

Nota. [23],[24],[25]

Otra variable importante que medir es la velocidad con la que se desplaza la mesa al momento de mecanizar, de igual forma en la Tabla 3 se presentan ciertas características de varios tipos de sensores orientados a la velocidad o desplazamiento. Cabe recalcar que el Efecto Hall es también válidamente usado para la determinación de la posición y velocidad de cualquier medio físico [26].

Tabla 3*Sensores de velocidad y desplazamiento.*

Tipos de Sensores para movimiento			
	Magnético Resistivo Gigante (GMR)	Encoders	
		Absolutos	Incrementales
Concepto	Están basados en una tecnología multicapa, optimizados para la detección de posiciones angulares. Son sensibles a la dirección del campo magnético aplicado, pero no a su intensidad.	Los encoders absolutos proporcionan información sobre la posición, el ángulo y las revoluciones en incrementos angulares específicos. Cada incremento angular tiene asignado un patrón de código inequívoco.	Proporcionan información sobre la posición, el ángulo y las revoluciones. El número de impulsos por vuelta que el encoder transfiere al controlador en cada vuelta determina esta información.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Mediciones extremadamente precisas -Robusto -Consumo bajo -Gran variedad de campos de aplicación 	<ul style="list-style-type: none"> -Permiten conocer la posición exacta en cada momento sin tener que dar la vuelta completa. -Mejor rendimiento de arranque -Múltiples protocolos de red -Mejor recuperación de fallas del sistema o de energía 	<ul style="list-style-type: none"> -Su implementación es menos costoso que la de un encoder absoluto. -Excelente respuesta de velocidad y distancia. -Simple y económico.
Desventajas	Montaje complicado	Es más costoso que un encoder incremental y además especifica un solo código de ángulo.	Lleva un registro del movimiento relativo a un punto de inicio. Tiene que ser recalibrado antes de comenzar a operar.

Nota: [23],[27]

1.5. Tipos de señales y acondicionadores

Para que las mediciones de los sensores presenten resultados reales, es necesario que la señal emitida por éstos sea bien leída, procesada e interpretada. Para lo que es necesario conocer acerca de las señales, los problemas que estas pueden presentar, entre otros factores importantes a la hora de procesar señales.

Dentro del campo de tratamiento de señales, es fundamental el simular y visualizar los pasos que experimenta una señal a lo largo de su transmisión, desde su emisión hasta que llega a su destino final y cumple su misión de transportar una información [28].

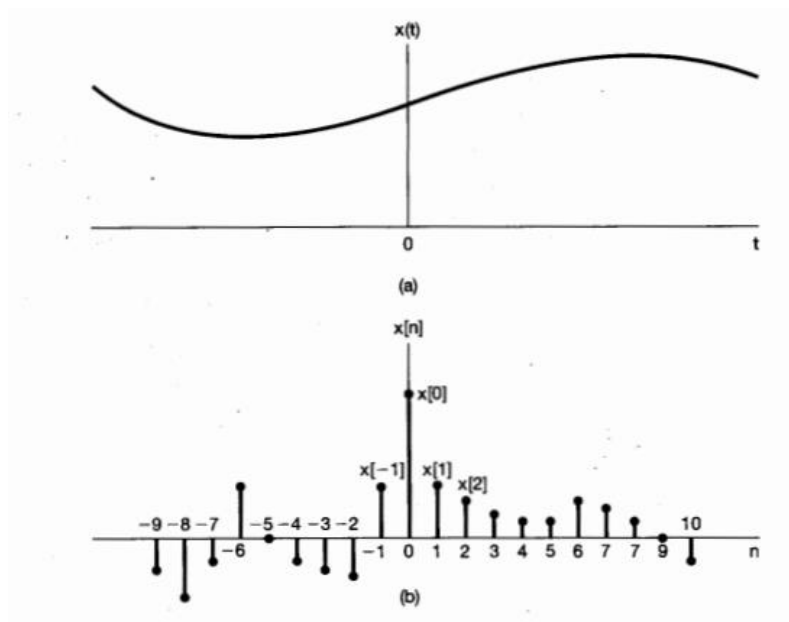
Una señal es “la abstracción de cualquier cantidad medible que es función de una o más variables independientes, como el tiempo o el espacio”.

Las señales pueden dividirse en dos grandes grupos: las señales continuas pueden definirse como una sucesión continua de valores variables independientes presentes en todos los instantes de tiempo o espacio. Por otro lado, las señales discretas solo están definidas en

tiempos discretos, es decir, la variable independiente toma solamente un conjunto discreto de valores, a menudo las señales discretas son versiones muestreadas de señales de tiempo continuo [29]. La discretización de señales continuas facilita el estudio y control. El comportamiento de las señales continuas y discretas se pueden observar en la Figura 4.

Figura 4

Representaciones gráficas de señales



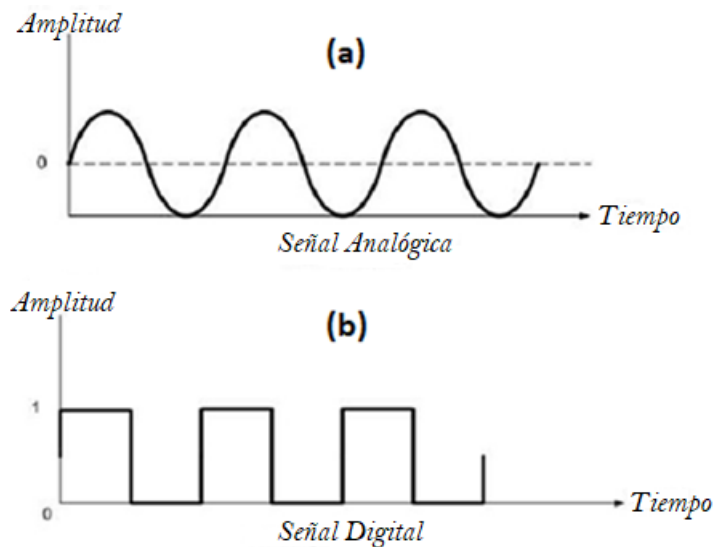
Nota. (a) una señal continua y (b) una señal discreta [29]

Los sensores como se habló en la sección 1.4 son dispositivos que transforman una señal física en una señal eléctrica. Dicha señal puede darse de dos formas, una de ellas es denominada señal analógica la cual puede tomar únicamente dos valores los cuales se traducen en 1 o 0. Por otro lado, están las señales analógicas, las cuales pueden tomar cualquier valor en un rango establecido. Ambos tipos de señales se pueden observar en la

Figura 5.

Figura 5

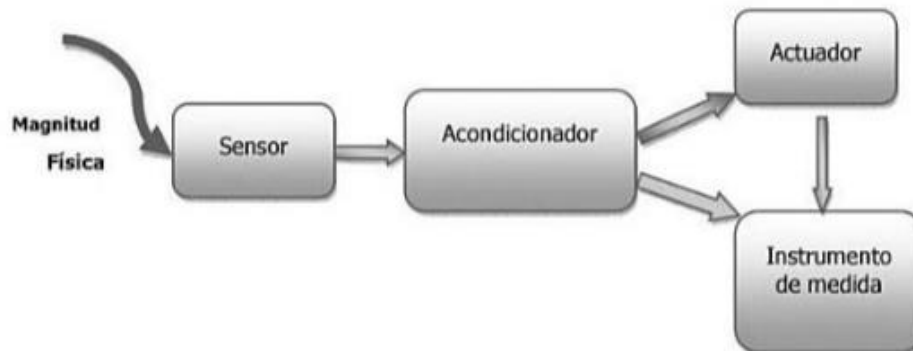
Ejemplo de señales analógicas y digitales



Nota: (a) señal analógica y (b) señal digital [30]

1.5.1. Acondicionadores de señal

Los acondicionadores de señal se encargan de convertir una señal electrónica en otro tipo de señal eléctrica de fácil lectura para equipos de instrumentación convencional, previo a la adquisición de datos prepara la señal antes de ingresar al controlador y puede presentar las siguientes funciones: linealización, filtración y amplificación la señal eléctrica estándar [31]. El proceso mediante el cual se transforma una magnitud física hasta una señal medible y tratable se establece en la Figura 6.

Figura 6*Proceso de acondicionamiento de señales**Nota.* [32]

Entre los acondicionadores de señales más comunes están:

- Divisores de voltaje
- Puente de Wheatstone
- Transistores
- Multivibradores Astables
- Convertidores A/D
- Amplificadores Operacionales
- Microcontroladores

1.6. Interfaces Humano-Máquina

El mecanizado a altas velocidades puede representar una diferencia importante en las industrias especializadas y en los procesos de manufactura. También, la aparición de nuevas tecnologías y avances en los sistemas CNC permiten un diseño inteligente en el proceso de maquinado. Características como la velocidad de avance de las herramientas, la potencia que consume la herramienta y el esfuerzo que genera el mecanizado pueden influir directamente en los procesos de manufactura, haciendo de estos robustos y confiables [33], todo esto se logra

gracias a la implementación del interfaz humano máquina la cual facilita y posibilita el seguimiento y en ocasiones control de las máquinas CNC.

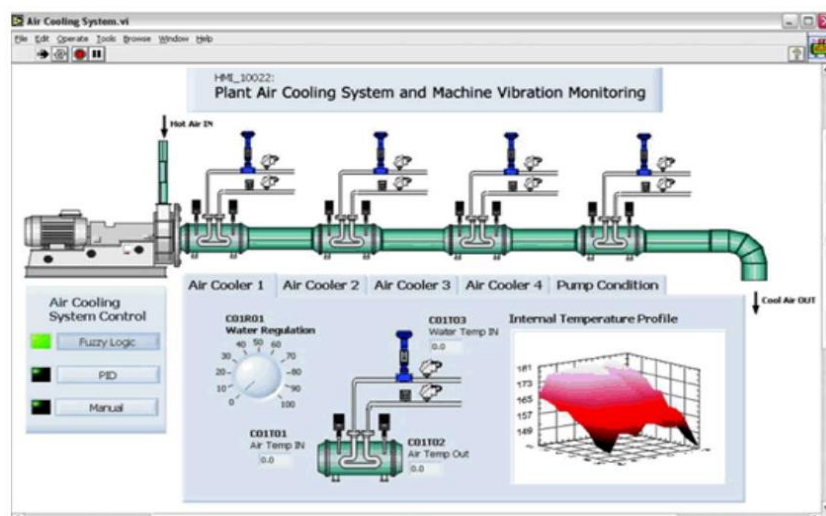
La interfaz de usuario HMI (Human Machine Interface) es un medio por el cual se presentan datos a un operador (humano), el cual controla y monitoriza todo el proceso el cual se hace por medio de un ordenador [34].

Rodríguez [35] define al HMI como el punto en el que seres humanos y computadores se ponen en contacto, transmitiéndose mutuamente tanto información, órdenes y datos como sensaciones, intuiciones y nuevas formas de ver las cosas. Sin embargo, en ocasiones la HMI representa problemas de limitación en la comunicación debido a un obre diseño y una escasa atención a los detalles de la tarea a realizar.

Si la interfaz está bien diseñada, el usuario encontrará la respuesta que espera a su acción; si no es así, puede ser frustrante para el usuario, que habitualmente tiende a culparse a sí mismo por no saber usar el objeto. Además, un buen programa con una pobre interfaz tendrá una mala imagen, y, al contrario, una buena interfaz puede realzar un programa mediocre [35].

Figura 7

Ejemplo de HMI en LabView



Nota: [36]

1.6.1. Tipos de HMI

Terminal del Operador, consiste en dispositivos generalmente contruidos para ser instalado en ambientes donde las condiciones de trabajo no son óptimas. Pueden constar solo con botoneras o en ocasiones pueden ser además con pantallas sensibles al tacto (touch screen) [37].

PC + Software, consiste en otra alternativa que consta de un ordenador en donde se carga un programa apropiado para el monitoreo del proceso. Normalmente se pueden usar varios tipos de PC u ordenadores: PC industriales (para ambientes agresivos), los Panel PC que simulan un terminal de operador y los tradicionales PC de escritorio [37].

1.6.2. Pautas de diseño de una Interfaz de un sistema SCADA

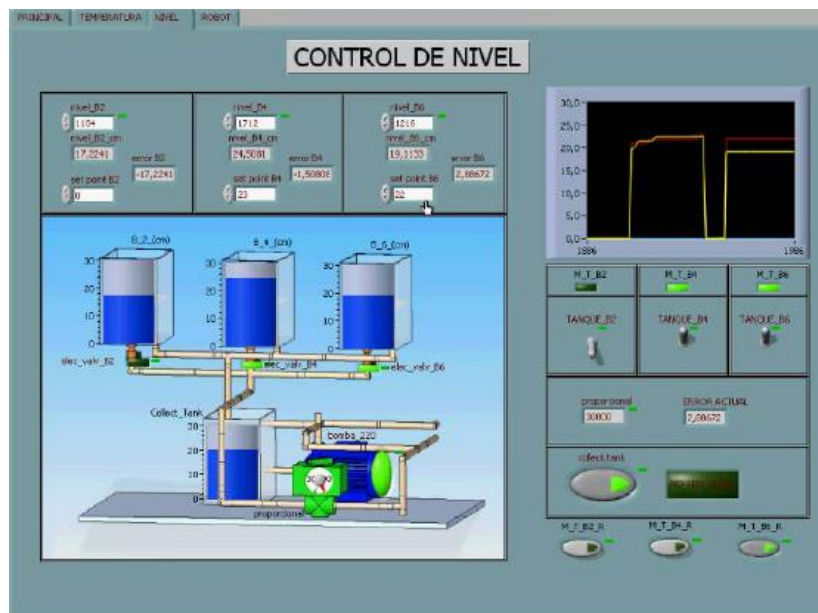
Los SCADA son sistemas de supervisión y control de procesos reales mediante una abstracción de software, debe emular, no solo de manera correcta, sino también sencilla el funcionamiento de proceso. La norma ISO 9126 establece que para que una Interfaz sea correctamente diseñada se deben aplicar los siguientes conceptos.

- Usabilidad
- Navegabilidad
- Teoría del color
- Manejo de la Información
- Consistencia

Rodríguez, por ejemplo, usa el criterio de usabilidad para el diseño de una interfaz HMI en donde toma en cuenta que no debería estar saturada de información, ya que cree que esto retrasaría al operario lo que implicaría costos en la producción [35]. Por ende, es importante usar estas pautas para un buen diseño de las interfaces. Cuando el diseño de una interfaz se realiza siguiendo los todos los conceptos mencionados el resultado de dicha interfaz puede ser bastante satisfactorio como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Panel frontal de HMI para el control de nivel de tanques



Nota. [35]

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

Para la investigación y el desarrollo de la tesis se utilizará la herramienta de despliegue de función de calidad denominada también QFD, además el método de criterios ponderados para el cual se partirá inicialmente desde la descomposición funcional del aparato para luego desarrollar la matriz morfológica de cada proceso del nuevo sistema, consiguiendo así las diferentes alternativas de diseño que serán evaluadas finalmente en la metodología mencionada.

En el primer objetivo se realizará un análisis funcional de la máquina para asegurarse que el sistema se encuentra trabajando en óptimas condiciones y poder pasar a la implementación del nuevo sistema de medición.

Como segundo objetivo se realizará la selección de los sensores, sistemas de procesamiento de datos y de la HMI basados en la metodología de criterios ponderados, se evaluará cuáles de las alternativas resulta ser la óptima bajo ciertos criterios preestablecidos.

Como tercer y último objetivo, se realizará la implementación de todo lo descrito anteriormente dentro de la máquina CNC asegurándose de que el funcionamiento de la máquina de ensayos sea el esperado.

Para el cumplimiento del desarrollo de la tesis se basa en el cumplimiento de 4 fases en las cuales se detalla las siguientes actividades.

2.1.Puesta a punto de entorno de ensayos

Antes de la implementación del nuevo sistema, es necesario verificar el funcionamiento de la máquina CNC. Se comprueba rápidamente que el funcionamiento no es óptimo, el eje X de la máquina no se mueve adecuadamente, cuando se manda una señal desde el control

alámbrico manual de que se mueva hacia el lado negativo del eje X, el eje se mueve en el sentido positivo por lo que se intuye que el problema es del control por lo que se procede a mover el eje desde la pantalla LCD instalada en el panel de control, con el mismo resultado se concluye que el problema es posiblemente del software instalado en el Arduino Mega.

Como primera solución se propone reinstalar exactamente el mismo software que ya estaba instalado, al no obtener una solución y luego de una revisión minuciosa se descubre que el problema es generado por la opción de menú personalizado que brinda el software Marlin, que es el que está instalado en la máquina. Se propone actualizar la versión del software por lo que se procede a configurar nuevamente el software Marlin esta vez en su versión 1.1.9, la configuración es bastante parecida a su versión anterior, pero con varias características nuevas orientadas principalmente a las impresoras 3D.

Una vez que se ha implementado se puede observar que el problema persiste, por lo que lo más lógico es pensar que es problema del cableado, una vez se ha revisado los cables uno por uno se observa que el cable denominado DIR X se encontraba flojo, asegurando este cable se observa que la máquina funciona correctamente por lo que el problema se ha resuelto satisfactoriamente.

Por otro lado, también se ha detectado que 2 de los 6 sensores no funcionan correctamente, además, los 4 sensores restantes se encuentran en malas condiciones y se ha observado que no son lo suficientemente robustos para soportar el rozamiento contra la mesa por lo que se ha decidido cambiar todos los finales de carrera por unos mucho más robustos los cuales también constan de los dos estados de funcionamiento, normalmente abierto (NA) y normalmente cerrado (NC). En varios de los sensores se ha cambiado el posicionamiento y orientación de los sensores para asegurar que no exista colisiones entre la estructura y los finales de carrera.

La máquina requiere una adecuación mecánica debido al mal funcionamiento del traslado de los ejes, dicho adecuamiento se lo ejecutará en otro tema de tesis ya planteado.

2.2.Fase 1

En esta fase se va a realizar el cumplimiento del primer objetivo el cual se basa en definir cuáles son los sistemas de medición que se van a incorporar en la máquina CNC. Para el cumplimiento del objetivo se van a realizar las siguientes actividades.

2.2.1. Actividad 1: Despliegue de la función de calidad (QFD)

El despliegue de la función de Calidad es una metodología de planeación que se introduce el control de calidad en la etapa del diseño/desarrollo de un producto o servicio; es un mecanismo formal para asegurar que la voz del consumidor sea escuchada y tomada en cuenta en todas las etapas del desarrollo del producto o servicio [38].

Como se dijo anteriormente es importante conocer las necesidades del cliente las cuales posteriormente se convierten en la voz del cliente o usuario, estos datos se pueden obtener de diferentes formas, pueden ser a través de entrevistas si es que es un grupo de personas o hablar directamente con el que va a ser el beneficiario directo del producto o servicio. En la conversación se solicita cuáles son los requerimientos básicos de la máquina, estos datos son interpretados técnicamente para ser transformados en criterios técnicos medibles los cuales se conocen como la voz del ingeniero.

2.2.2. Actividad 2: Voz del usuario

Se ha decidido realizar una entrevista para conocer las necesidades de diseño, una vez que se ha realizado la entrevista se han logrado detectar los requerimientos del usuario el cual necesita una adaptación de la fresadora CNC para convertirla en una máquina de ensayos para parámetros de corte con las siguientes características:

- Debe tener una interfaz HMI fácil de usar. (5)

- HMI debe ser intuitiva. (3)
- Las medidas tienen que ser precisas. (3)
- Se debe poder tabular los datos obtenidos. (5)
- Se debe poder extraer y guardar los datos. (5)
- Tiene que ser económica. (3)
- No utilizar más fuentes de alimentación. (1)
- Que el mantenimiento sea fácil. (1)

También se le ha pedido al usuario que les dé un valor de relevancia o importancia a cada uno de los criterios planteados anteriormente, el rango se encuentra definido con “5” para lo importante, “3” lo medianamente importante y “1” lo poco importante.

2.2.3. Actividad 3: Voz del ingeniero

Una vez que se han establecido los requerimientos del usuario se procede a realizar la interpretación técnica la cual se encuentra plasmada de la siguiente manera:

- Precisión
- Diseño
- Costo
- Consumo energético
- Sensores estandarizados
- Operabilidad

Con esta información procedemos a ubicar los requerimientos en la casa de la calidad en donde se van a ubicar los pesos de acuerdo con la importancia y la relación que se tiene entre la voz del ingeniero y la voz del cliente. Se obtendrá entonces una evaluación de importancia en donde se sabrá cuáles son los requerimientos técnicos a los que se debe poner

mayor atención. Finalmente se evaluará el diseño frente a otros diseños para saber si el diseño será viable o no [39].

2.2.4. Actividad 4: Diagrama de la casa de la calidad

Luego de realizar el análisis de la casa de la calidad cuyo diagrama completo se puede observar en el Anexo 1 se ha obtenido que el parámetro más importante a considerar es la Fiabilidad, seguido por el Costo y estrechamente relacionado con la Usabilidad, dejando por debajo a parámetros menos importantes como son el Consumo Energético, la Precisión y la Conectividad en ese orden respectivamente.

2.3.Fase 2

En esta fase se va a realizar el cumplimiento del objetivo 2 el cual se enfoca en la selección de los sensores que se van a incorporar en el sistema de medición. Para el cumplimiento de esta fase se van a realizar las actividades que se detallan a continuación.

2.3.1. Actividad 1: Análisis funcional

El análisis funcional es una técnica propuesta por el ingeniero Miles, el cual define al análisis como una herramienta cuyo propósito es el de separar la acción que se efectúa del componente o mecanismo, para de este modo buscar nuevas soluciones a un mismo problema lo cual logra que los productos sean mejores considerando un menor costo [40].

Para aplicar esta herramienta de diseño es importante identificar cuáles son las funciones primarias y secundarias, siendo las primeras aquellas funciones por las que el cliente compra el producto y las secundarias son aquellas funciones que permiten que la función primaria se ejecute satisfactoriamente y son las que se determinan mediante este análisis funcional [41].

Cuando las funciones primarias y secundarias están bien definidas se procede a plantear varias soluciones las cuales luego serán evaluadas y se determinará cual de todas ellas es la que más acorde se encuentra conforme los requerimientos del usuario y del ingeniero.

2.3.2. Actividad 2: Diagramas funcionales

Figura 9

Diagrama funcional de Nivel 0.

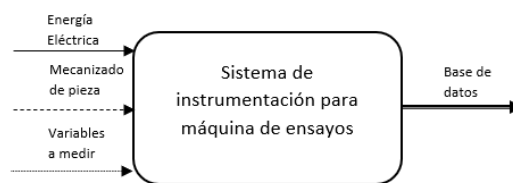


Figura 10

Diagrama funcional de Nivel 1.

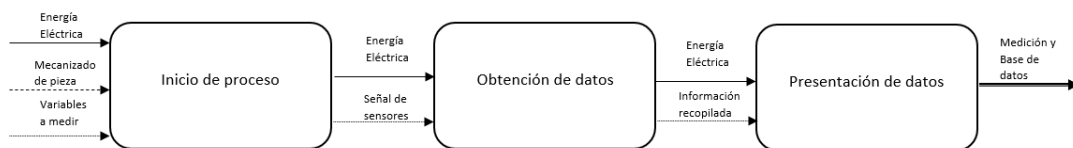
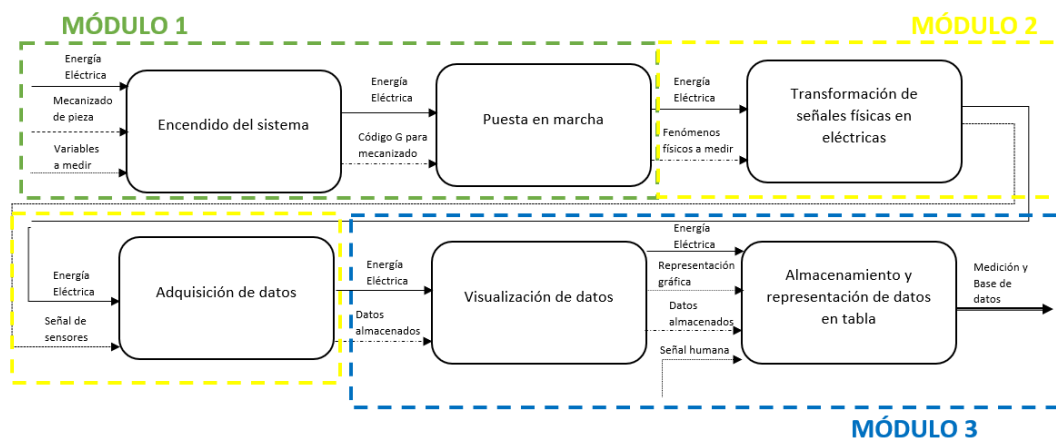


Figura 11

Diagrama funcional de Nivel 2 y módulos



En la Figura 11 se presenta de color verde el Módulo 1 en donde se encierra la parte de puesta en marcha y encendido. De color amarillo se representa el Módulo 2 el cual es la parte de la toma de señales, así como su procesamiento e interpretación. De color azul se presente el

Módulo 3 en donde se encierra la parte de presentación de las medidas tomadas y a la vez el almacenamiento de los datos.

2.3.3. Actividad 3: Soluciones por módulo

2.3.3.1. Módulo 1

En este módulo se tienen las siguientes funciones:

- Encendido del sistema
- Puesta en marcha

Los requerimientos presentados en este módulo se encuentran en perfecto funcionamiento en la máquina por lo que no resulta necesario el estudio y rediseño de dichos parámetros.

2.3.3.2. Módulo 2

El Módulo 2 presenta las siguientes funciones:

- Transformación de señales físicas a eléctricas
- Adquisición de datos

En la siguiente parte se procede a realizar las distintas combinaciones de posibles soluciones para este módulo, las cuales luego serán evaluadas bajo criterios ponderados y se escogerá la solución que mejor satisfaga las necesidades de diseño.

2.3.3.2.1 Transformación de señales físicas a eléctricas

Para la transformación de señales físicas a eléctricas hay que tomar en cuenta que las variables físicas a medir son las siguientes:

A. Consumo energético del sistema

El Watt denominado en inglés o voltios, es la unidad de potencia eléctrica equivalente a un Jule; según el Sistema Internacional de Unidades. En términos eléctricos el Watt (W), es la potencia eléctrica que es producida por una diferencia de potencial de un voltio y un amperio. El potencial eléctrico es directamente proporcional al voltaje y a la Intensidad de corriente que circula mediante un circuito [42].

$$P = V * I \quad (3)$$

En nuestro país, el consumo energético es la medida correspondiente a un periodo de tiempo determinado expresado en kW/hora.

Como se habló en el Capítulo I para la medición de la corriente se han tomado en cuenta dos posibles soluciones.

Sensor de corriente CT

En la Figura 12 se observa los diferentes tipos de sensores no invasivos CT los cuales sirven para la medición de corriente del sistema.

Figura 12

Sensor de corriente CT no invasivo.



Nota: [43]

Sensor de corriente Efecto Hall

De igual forma que en el caso anterior, en la Figura 13 se puede observar un modelo de sensor de corriente de efecto Hall el cual también es no invasivo y de igual manera sirve para las mediciones de corriente.

Figura 13

Sensor Hall de corriente HK-KY01.



Nota: [44]

Las ventajas y desventajas de ambos sensores se pueden observar en la Tabla 2 del Capítulo I de este documento.

B. Velocidad de desplazamiento de los ejes de la mesa

Para los sensores de la velocidad de desplazamiento es importante saber que ya que se trata de un tornillo roscado se puede saber exactamente a qué velocidad se están moviendo cada uno de los ejes de la máquina conociendo su velocidad angular, para ello se evaluará cada una de las siguientes alternativas.

Encoder

En la Figura 14 se puede observar un modelo de encoder absoluto cuyas características se presentan en la Tabla 3, los cuales nos servirán en este caso para la medición de la velocidad a la que se mueve la mesa de trabajo.

Figura 14*Encoder absoluto E6C3-A*

Nota: [45]

Resolver

Así mismo, en la Figura 15 se puede observar otra alternativa al encoder, que es un sensor resolver el cual también sirve para la medición de la velocidad de la mesa.

Figura 15*Resolver brushless y synchro*

Nota: [46]

Al igual que los sensores de corriente, las características, ventajas y desventajas de estos sensores se encuentran plasmados en la Tabla 3.

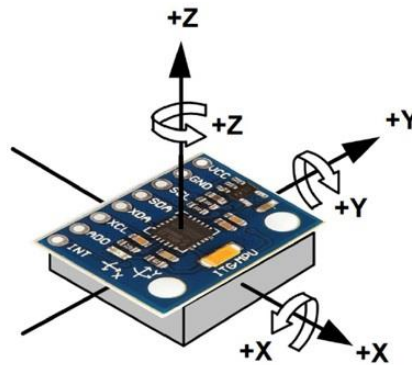
C. Esfuerzo de la herramienta de corte

Para medir el esfuerzo al que está sometida la herramienta de corte se ha escogido un sensor giroscopio, acelerómetro, el modelo en particular del sensor es el MPU6050.

Se ha definido que el MPU6050 que se pueden observar en la Figura 16 como una alternativa óptima para la aplicación en cuestión, ya que éste puede medir la desviación en grados de la herramienta y así poder determinar en qué zonas del corte se ha ejercido mayor esfuerzo en la herramienta.

Figura 16

Acelerómetro y giroscopio MPU6050



Nota: [47]

2.3.3.2.2 Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se presentan dos propuestas importantes:

A. Tarjeta de Adquisición de Datos

Figura 17

Tarjeta de adquisición de datos USB 7204



Nota: [48]

Ventajas

- Pensados para una intensa adquisición y tratamiento de datos.

- Puede tratar señales analógicas sin problemas
- Amplia velocidad de medición

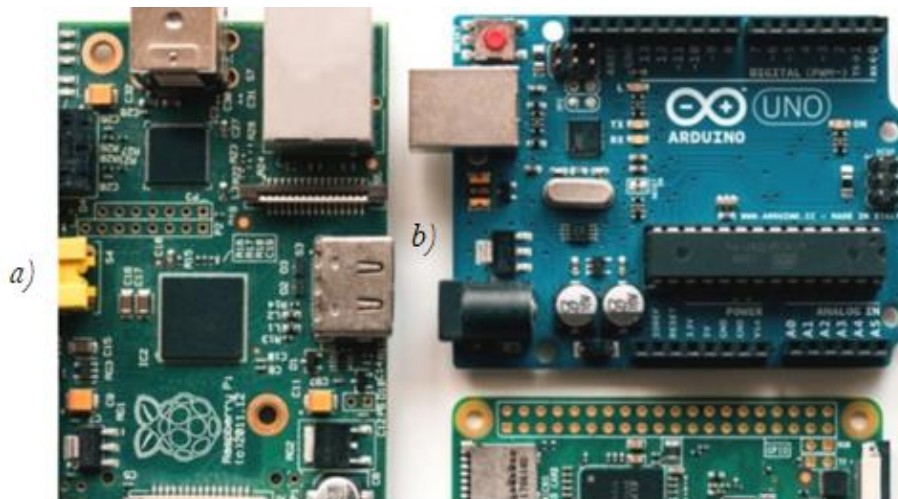
Desventajas

- No tienen la capacidad de gestionar los datos
- Costo elevado

B. Placa de Microcontrolador o Microordenador (Sistemas Embebidos)

Figura 18

Sistemas Embebidos



Nota: a) sistema embebido Raspberry Pi y b) Arduino UNO [49].

Ventajas

- Tamaño reducido
- Buena capacidad de procesamiento
- Bajo costo
- Permiten una personalización completa
- Capacidad de ampliación funcional

Desventajas

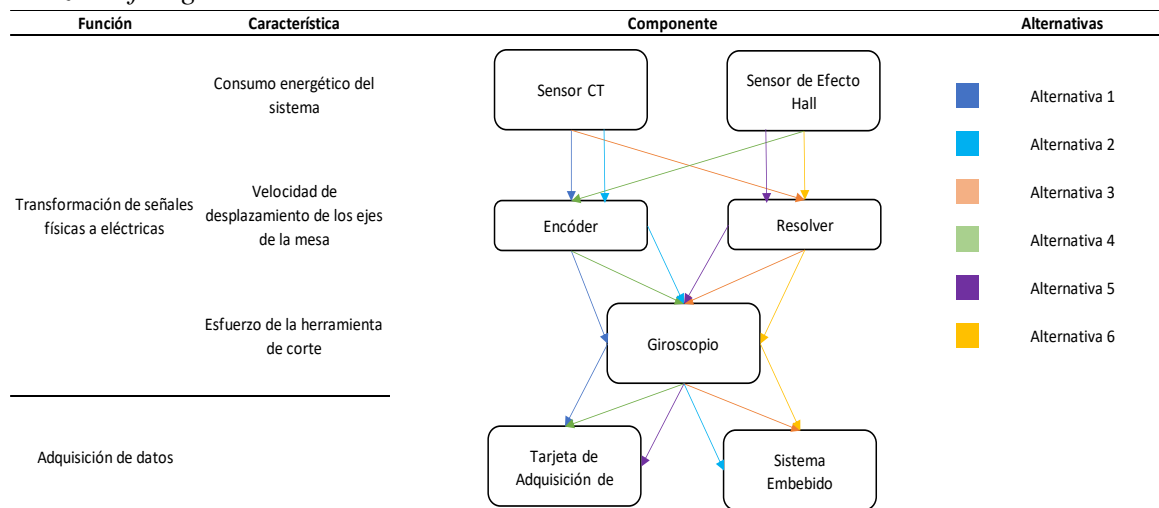
- No son especializados en la adquisición de datos
- Requieren una configuración adicional para trabajar como adquisición de datos
- No procesan las señales analógicas a la misma velocidad que una tarjeta especializada

2.3.3.2.3 Matriz morfológica del módulo 2

Con respecto a lo planteado anteriormente, las posibles soluciones para el Módulo 2 se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Matriz morfológica Módulo 2



Todas las soluciones del Módulo 2 se detallan a continuación:

- **Alternativa 1:** Sensor de corriente CT, encoder, giroscopio y tarjeta de adquisición de datos.
- **Alternativa 2:** Sensor de corriente CT, encoder, giroscopio y sistema embebido.
- **Alternativa 3:** Sensor de corriente CT, resolver, giroscopio y sistema embebido.
- **Alternativa 4:** Sensor de corriente de Efecto Hall, encoder, giroscopio y tarjeta de adquisición de datos.

- **Alternativa 5:** Sensor de corriente de Efecto Hall, resolver, giroscopio y tarjeta de adquisición de datos.
- **Alternativa 6:** Sensor de corriente de Efecto Hall, resolver, giroscopio y sistema embebido.

2.3.3.2.4 Evaluación y solución del módulo 2

Para la evaluación de la mejor alternativa de solución para el módulo 2 se utilizará la herramienta de criterios ponderados el cual se basa en definir analíticamente cual de todas las alternativas es la adecuada.

Primero se hace una evaluación de la importancia de cada uno de los criterios, comparándolos a cada uno entre sí lo cual se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5

Evaluación de cada criterio del módulo 2

	Precisión	Costo	Disponibilidad	Fácil Implementación	$\Sigma +1$	Ponderación
Precisión		0	0,5	1	2,5	0,25
Costo	1		1	1	4	0,40
Disponibilidad	0,5	0		1	2,5	0,25
Fácil Implementación	0	0	0		1	0,10
					SUMA 10	1

Nota: Costo > Precisión = Disponibilidad > Fácil Implementación

A continuación, se realizará la evaluación de cada una de las alternativas frente a cada uno de los criterios.

El primer criterio que se va a analizar es la Precisión, la comparación entre todas las alternativas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6*Evaluación de alternativas: Precisión*

Precisión	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	1	1	1	6	0,286
Alternativa 2	0		1	1	1	1	5	0,238
Alternativa 3	0	0		1	1	1	4	0,190
Alternativa 4	0	0	0		1	1	3	0,143
Alternativa 5	0	0	0	0		1	2	0,095
Alternativa 6	0	0	0	0	0		1	0,048
						SUMA	21	1,000

Nota: Alternativa 1 > Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 4 > Alternativa 5 >

Alternativa 6

El siguiente criterio por evaluar es el Costo, la evaluación de criterios ponderados correspondiente se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7*Evaluación de alternativas: Costo*

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	0,5	1	0	2,5	0,119
Alternativa 2	1		1	0,5	1	1	5,5	0,262
Alternativa 3	1	0		0	1	1	4	0,190
Alternativa 4	0,5	0,5	1		1	1	5	0,238
Alternativa 5	0	0	0	0		0	1	0,048
Alternativa 6	1	0	0	0	1		3	0,143
						SUMA	21	1,000

Nota: Alternativa 2 > Alternativa 4 > Alternativa 3 > Alternativa 6 > Alternativa 1 >

Alternativa 5

La Disponibilidad es el siguiente criterio para evaluar, los resultados se muestran en la

Tabla 8.

Tabla 8*Evaluación de alternativas: Disponibilidad*

Disponibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,5	0	0,5	3	0,143
Alternativa 2	1		1	1	1	1	6	0,286
Alternativa 3	0	0		0	1	0,5	2,5	0,119
Alternativa 4	0,5	0	1		1	1	4,5	0,214
Alternativa 5	1	0	0	0		0	2	0,095
Alternativa 6	0,5	0	0,5	0	1		3	0,143
						SUMA	21	1,000

Nota: Alternativa 2 > Alternativa 4 > Alternativa 1 = Alternativa 6 > Alternativa 3 >

Alternativa 5

El último criterio que se evaluará en el módulo 2 es el de Fácil Implementación, los resultados de los criterios ponderados con respecto a todas las alternativas se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9*Evaluación de alternativas: Fácil Implementación*

Fácil Implementación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	0,5	0,5	1	5	0,238
Alternativa 2	0		0,5	0	0	0,5	2	0,095
Alternativa 3	0	0,5		0	0	0,5	2	0,095
Alternativa 4	0,5	1	1		0,5	1	5	0,238
Alternativa 5	0,5	1	1	0,5		1	5	0,238
Alternativa 6	0	0,5	0,5	0	0		2	0,095
						SUMA	21	1,000

Nota: Alternativa 1 = Alternativa 4 = Alternativa 5 > Alternativa 2 = Alternativa 3 = Alternativa 6

Finalmente, luego de realizar la evaluación de las alternativas con respecto a todos los criterios, se analiza cada uno de los resultados frente a la importancia de cada alternativa, los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10*Evaluación de los resultados del análisis del módulo 2*

	Precisión	Costo	Disponibilidad	Fácil Implementación	Σ	Ponderación
Alternativa 1	0,286x0,25	0,119x0,40	0,143x0,25	0,238x0,10	0,179	3
Alternativa 2	0,238x0,25	0,262x0,40	0,286x0,25	0,095x0,10	0,245	1
Alternativa 3	0,190x0,25	0,190x0,40	0,119x0,25	0,095x0,10	0,163	4
Alternativa 4	0,143x0,25	0,238x0,40	0,214x0,25	0,238x0,10	0,208	2
Alternativa 5	0,095x0,25	0,048x0,40	0,095x0,25	0,238x0,10	0,090	6
Alternativa 6	0,048x0,25	0,143x0,40	0,143x0,25	0,095x0,10	0,114	5

Nota: La Alternativa 2 resulta ser la más apta como solución del módulo 2.

2.3.3.3. Módulo 3

Al igual que el módulo anterior, este módulo contiene las siguientes funciones:

- Visualización de datos
- Almacenamiento y representación de datos en tabla

A continuación, se presentan las posibles soluciones planteadas para cada función del módulo 3.

2.3.3.3.1 Visualización de datos

Para la visualización de los datos obtenidos a través de los sensores, se ha propuesto dos alternativas importantes, de las cuales los pros y contras se encuentran especificados a continuación:

A. Terminal de Operador

Figura 19

Panel operador táctil



Nota: Panel operador de la marca Siemens [50].

Ventajas

- Cuerpo robusto, apto para ambientes laborales
- Registro simplificado
- Pantalla táctil de fácil manejo
- Siempre se encuentra conectado y monitorizando

Desventajas

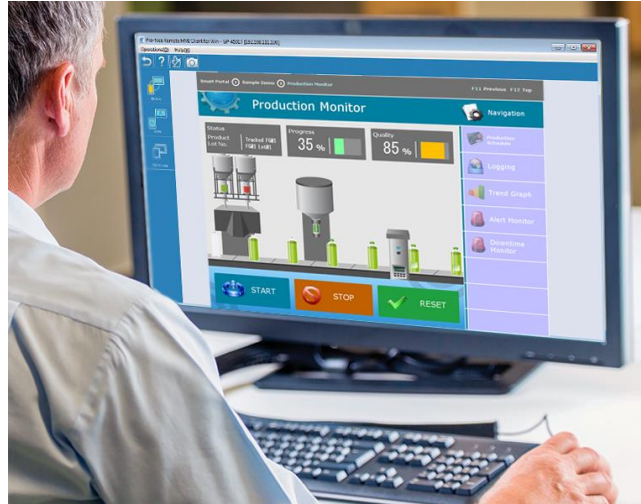
- Mayor costo de implementación

- Se necesita un mayor espacio en el panel de control

B. PC + Software

Figura 20

HMI a través de software



Nota: Software para el monitoreo remoto desde una computadora de escritorio [51].

Ventajas

- Costo de implementación relativamente bajo
- Mayor facilidad de programación
- Alta flexibilidad en el diseño
- No representa una alternativa demasiado invasiva estéticamente

Desventajas

- Necesita que se conecte un dispositivo adicional para visualizar el funcionamiento
- No es un conjunto apto para ambientes excesivamente agresivos

2.3.3.3.2 Almacenamiento y representación de datos en tabla

Se ha decidido que los datos se almacenarán en forma de tabla y se exportarán hacia una hoja de cálculo, por lo tanto, las alternativas que se deben tomar en cuenta son con respecto a la forma en que se van a exportar los datos.

A. Almacenar datos en la nube

Se plantea como propuesta un almacenamiento online o en la nube como normalmente se conoce, se basa básicamente al hecho de contar con un espacio de almacenamiento en un servidor remoto que permite guardar la información y que el acceso a ésta se pueda realizar en cualquier momento y desde cualquier lugar siempre y cuando se cuente con conexión a internet [52].

Ventajas

- Acceso remoto
- Información disponible en cualquier momento

Desventajas

- Estrictamente necesaria la conexión a internet
- Se necesita un módulo especial que permita la conexión a la red
- Mayor problema de implementación

B. Exportar datos hacia USB

Adicionalmente se propone un sistema de exportación hacia un dispositivo USB, el USB (Universal Serial Bus) es una interfaz para la transmisión serie de datos y la distribución de energía, desarrollado por el Foro de desarrolladores del USB (USB IF) [53].

Ventajas

- Facilita la conectividad con el ordenador.
- Pueden ser desconectados mientras la computadora está en uso.
- Puede compartir un mismo bus dispositivos que requieren distintos anchos de banda.
- No se necesita cable extra de alimentación.
- Elevada simplicidad

Desventajas

- No consta con acceso remoto a la información.
- Necesariamente la información tiene que ser sustraída directamente de la máquina.

2.3.3.3.3 Matriz morfológica del módulo 3

A continuación, en la Tabla 11 se presenta una matriz morfológica con las posibles soluciones que se pueden dar al módulo 3 las cuales serán evaluadas en la siguiente sección.

Tabla 11

Matriz morfológica del módulo 3

Función	Característica	Componente	Alternativas
Visualización de datos		Terminal de Operador	<ul style="list-style-type: none"> Alternativa 1 Alternativa 2 Alternativa 3 Alternativa 4
		PC + Software	
		Tabla en Excel	
		Datos en la Nube	
	Almacenamiento		
	Almacenamiento y representación de datos en tabla		
	Sistema de Exportación o Backup	Exportar datos hacia USB	

Las alternativas de este módulo constan con las siguientes características:

- **Alternativa 1:** Terminal del operador, tabla en Excel y guardar datos en la nube.
- **Alternativa 2:** Terminal del operador, tabla en Excel y exportar los datos mediante USB.
- **Alternativa 3:** PC + Software, tabla en Excel y guardar datos en la nube.
- **Alternativa 4:** PC + Software, tabla en Excel y exportar los datos mediante USB.

2.3.3.3.4 Evaluación y solución del módulo 3

Al igual que en el módulo anterior, se hará un análisis de criterios ponderados de cada una de las alternativas del módulo 3, para ello se evaluará primero a cada uno de los criterios los cuales se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12*Evaluación de cada criterio del módulo 3*

	Costo	Usabilidad	Fiabilidad	Conectividad	$\Sigma +1$	Ponderación
Costo		0,5	0	1	2,5	0,250
Usabilidad	0,5		0	1	2,5	0,250
Fiabilidad	1	1		1	4	0,400
Conectividad	0	0	0		1	0,100
	SUMA				10	1

Nota: Fiabilidad > Costo = Conectividad > Usabilidad

El primer criterio por evaluar es el Costo, los resultados del análisis se presentan en la

Tabla 13.

Tabla 13*Análisis de alternativas: Costo*

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0	1,5	0,150
Alternativa 2	0,5		0	0	1,5	0,150
Alternativa 3	1	1		0,5	3,5	0,350
Alternativa 4	1	1	0,5		3,5	0,350
	SUMA				10	1,000

Nota: Alternativa 3 = Alternativa 4 > Alternativa 1 = Alternativa 2

El siguiente criterio es la Usabilidad, los resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14*Análisis de alternativas: Usabilidad*

Usabilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	0	1	0,100
Alternativa 2	1		0	0	2	0,200
Alternativa 3	1	1		1	4	0,400
Alternativa 4	1	1	0		3	0,300
	SUMA				10	1,000

Nota: Alternativa 3 > Alternativa 4 > Alternativa 2 > Alternativa 1

El tercer criterio evaluado es la Fiabilidad, los resultados se encuentran plasmados en la Tabla 15.

Tabla 15*Análisis de alternativas: Fiabilidad*

Fiabilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	0	1	0,100
Alternativa 2	1		0,5	0	2,5	0,250
Alternativa 3	1	0,5		0	2,5	0,250
Alternativa 4	1	1	1		4	0,400
				SUMA	10	1,000

Nota: Alternativa 4 > Alternativa 3 = Alternativa 2 > Alternativa 1

El último criterio que se evaluó es la Conectividad, los resultados de la evaluación se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16*Análisis de alternativas: Conectividad*

Conectividad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0	1,5	0,150
Alternativa 2	0,5		0	0	1,5	0,150
Alternativa 3	1	1		0,5	3,5	0,350
Alternativa 4	1	1	0,5		3,5	0,350
				SUMA	10	1,000

Nota: Alternativa 4 = Alternativa 3 > Alternativa 2 = Alternativa 1

Finalmente, al igual que en el módulo anterior se hace un análisis y evaluación de cada una de las alternativas frente a los valores de importancia de cada uno de los criterios, los resultados del análisis se encuentran a continuación en la Tabla 17.

Tabla 17*Evaluación de los resultados del análisis del módulo 3*

	Costo	Usabilidad	Fiabilidad	Conectividad	Σ	Ponderación
Alternativa 1	0,15x0,25	0,1x0,25	0,1x0,4	0,15x0,1	0,118	4
Alternativa 2	0,15x0,25	0,2x0,25	0,25x0,4	0,15x0,1	0,203	3
Alternativa 3	0,35x0,25	0,4x0,25	0,25x0,4	0,35x0,1	0,323	2
Alternativa 4	0,35x0,25	0,3x0,25	0,4x0,4	0,35x0,1	0,358	1

Nota: La alternativa 4 resulta ser la más apta de acuerdo con el análisis del módulo 3.

2.3.3.4.Propuesta final de diseño

Después de realizar el análisis de los requerimientos mediante el despliegue de la casa de la calidad, el análisis funcional, las matrices morfológicas y finalmente haber obtenido una

solución viable mediante la técnica de criterios ponderados se ha llegado a la conclusión de que la solución a implementar es la siguiente:

- **Sensor de corriente de Efecto Hall:** Para a la medición de la corriente, y así determinar la potencia de la máquina.
- **Encoder:** Para medir la velocidad de desplazamiento de la mesa.
- **Giroscopio:** Para obtener la desviación a la que está sometida la herramienta de corte.
- **Sistema embebido:** Para la toma y procesamiento de las señales enviadas por los sensores.
- **PC + Software:** Como alternativa viable para la visualización de los datos.
- **Tabla en Excel:** Para el ordenamiento y almacenamiento interno de los datos generados.
- **Exportar los datos mediante USB:** Como la mejor alternativa para la exportación de los datos almacenados.

2.4.Simulación y diseño

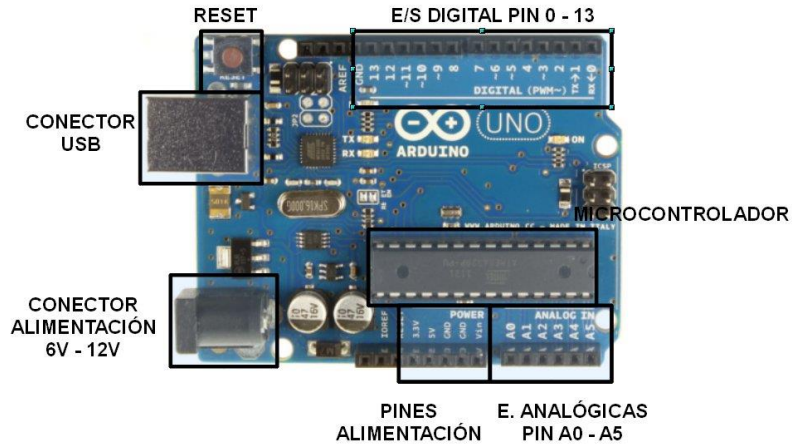
Previo a la implementación de los sensores es necesario realizar una simulación, en donde se simulará la recepción de señal de todos los sensores, el acondicionamiento de la señal y asegurarse de que la comunicación entre los sensores y la tarjeta de adquisición de datos sea efectiva.

2.4.1. Plataforma

La plataforma en la que se va a implementar el sistema de adquisición de datos será un Arduino UNO. El cual es una placa de hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines, las cuales se pueden configurar como entradas o salidas digitales y a su vez como entradas analógicas, ya que posee un conversor análogo-digital de 10 bits, y puede simular salidas analógicas a través de PWM [54].

Los componentes y su disposición se pueden observar a continuación en la Figura 21.

Figura 21
Partes de Arduino UNO

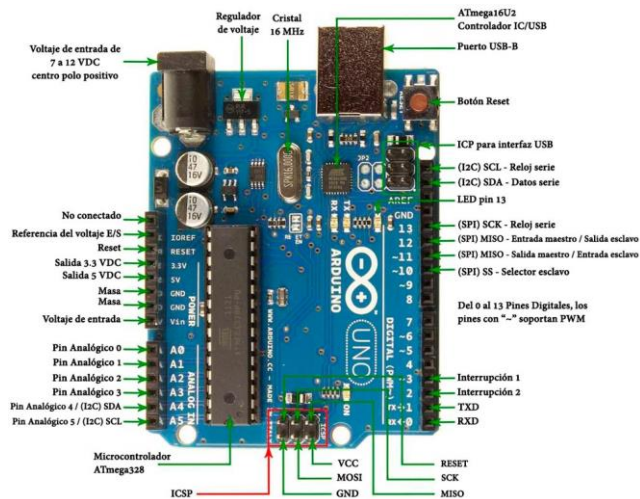


Nota: [55]

Entre los elementos más importantes de la placa y lo que va a ser de especial interés en este trabajo es la disposición de los pines de la placa Arduino.

A continuación, se presentan un esquema de localización y función de los pines, el número de pin y la función de cada uno de ellos se presentan en la Figura 22.

Figura 22
Pines de Arduino UNO



Nota: [56]

2.4.2. Sensor de corriente SCT-013-030

Este tipo de sensores de corriente tienen varios modelos, que varían por su capacidad de medición, normalmente se encuentran las versiones de 30A (SCT-013-030) y las de 100A (SCT-013-100), para este caso en particular se necesita únicamente el sensor de 30A ya que el consumo de la máquina difícilmente superará ese rango. La señal proporcionada por este sensor es directamente proporcional a la corriente medida, su relación es de 30A/1V.

2.4.2.1. Acondicionamiento de la señal

La salida de este sensor es una señal alterna por lo que debe ser corregida ya que la parte negativa de la señal puede afectar a la placa. Para ello lo primero que se tiene que hacer es rectificar la parte negativa de la señal del sensor, para ello se ha incorporado el amplificador operacional LM358 el cual se muestra en la Figura 23 con las configuraciones de sus pines, además la hoja de datos del amplificador se muestra en el Anexo 2.

Figura 23

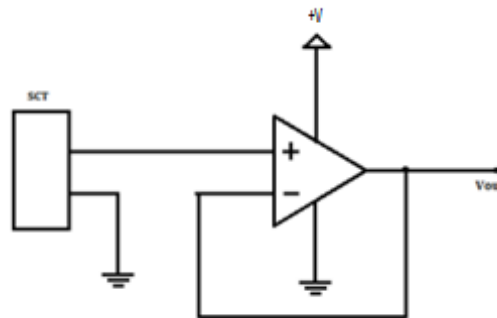
Amplificador operacional LM358



Nota: [57]

La configuración de la conexión que se tiene que implementar en el sensor y en el amplificador operacional se puede observar a continuación en la Figura 24.

Figura 24
Conexión de amplificador LM358

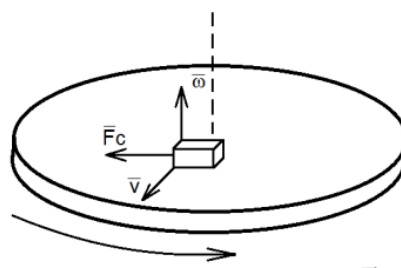


Nota: [58]

2.4.3. Acelerómetro y Giroscopio MPU6050

Este sensor se basa en un sistema de Sensores MEMS (Sistema Microelectromecánico), los cuales se basan en el principio del efecto Coriolis. Si se hace girar el sustrato sobre el que se encuentra este cuerpo, entonces la fuerza de Coriolis, que está dirigida perpendicular al eje de rotación y a la dirección de movimiento del cuerpo, comenzará a actuar sobre él [59]. En la Figura 25 se puede observar una imagen que facilitará el entendimiento de este principio.

Figura 25
Principio de Coriolis



Nota: ω el vector de la velocidad angular, \vec{V} el vector de la velocidad lineal, \vec{F}_c la fuerza de Coriolis [59]

Este sensor puede ser alimentado, por 3.3V o por 5V por lo que se puede alimentar directamente desde el Arduino, pero se optará por poner una fuente a parte de 5V para mejorar el trabajo del sistema.

2.4.4. Encoder Singwise 360P/R

Este encoder en específico es uno que consta de 360 pasos, lo que quiere decir que enviara 360 señales por cada vuelta que dé el motor; ya que los valores de la señal del encoder únicamente pueden ser 2, esta señal se puede tratar como una señal digital (con valores de 1 o 0).

Y ya que el encoder puede ser alimentado por rangos de voltaje que van entre los 5V y 24V, no hay ningún inconveniente con este sensor y es perfectamente medible con la placa Arduino, de igual forma va a ser alimentado por la misma fuente del Giroscopio.

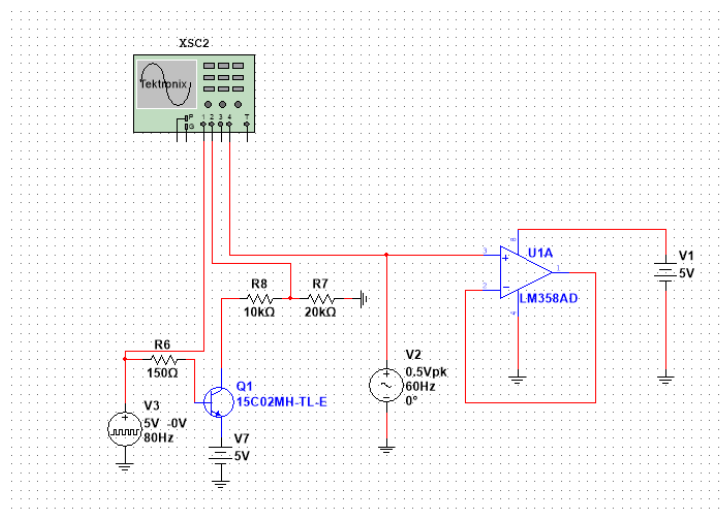
2.4.5. Software de simulación

Para la simulación se ha usado el software llamado Multisim, el cual posee un entorno esquemático interactivo que permite visualizar y analizar al instante el diseño de circuitos y simulaciones SPICE orientados a la electrónica de potencia, analógica y digital [60].

En este entorno se han implementado todos los circuitos mencionados anteriormente para su evaluación y posterior implementación física, el circuito de simulación total se puede observar en la Figura 26.

Figura 26

Simulación de sensores en Multisim



Una vez que se ha confirmado que la simulación responde de acuerdo con los requerimientos se ha continuado con la implementación física de los circuitos.

2.5. Implementación física del circuito

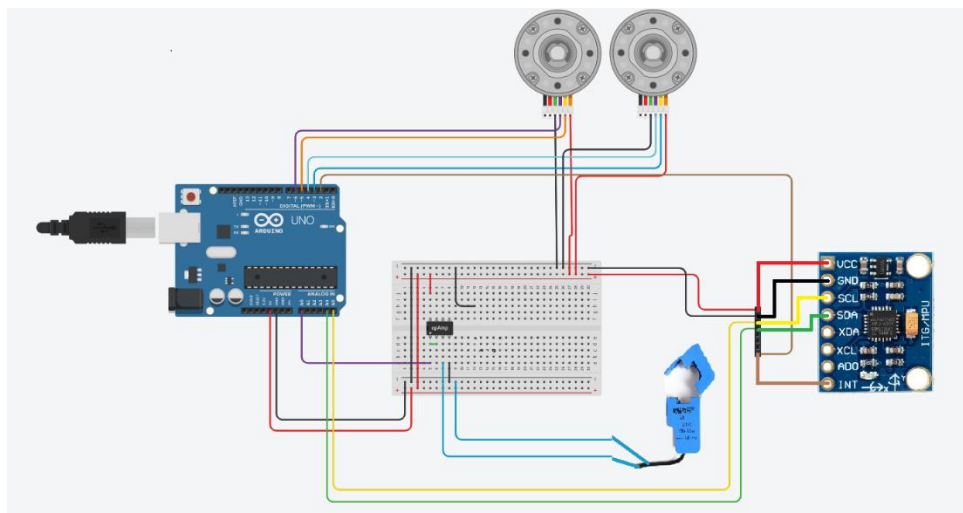
Con la simulación en software funcional como antecedente se ha procedido a realizar la implementación física de los circuitos y verificar de esta manera que el diseño cumple con las características necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de sensores.

A continuación, en la Figura 27 se presentan las conexiones de los diferentes pines de los componentes con las entradas y salidas de los sensores.

Además, el plano de conexión de los sensores se puede observar detalladamente en el Anexo 4: Planos eléctricos.

Figura 27

Esquema de conexión de los sensores



El esquema presentado anteriormente acondiciona perfectamente las señales por lo que se procede a elaborar la tarjeta PCB para la adquisición y procesamiento de datos.

El diseño de la tarjeta se realizará en el software Ultiboard, el cual es un software de diseño de tarjeta de circuito impreso que se integra perfectamente con Multisim para acelerar el desarrollo de prototipos PCB [61].

2.6.Implementación de sensores

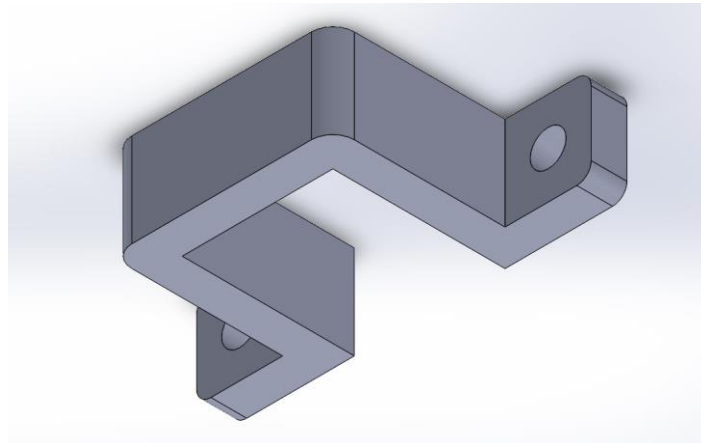
Validado la tarjeta PCB y el perfecto funcionamiento de los sensores se procede a la implementación física en la máquina.

2.6.1. Sensor de Corriente

Para el sensor de corriente se ha diseñado una pieza que sea capaz de sujetar el sensor dentro de la cabina, garantizando la estabilidad y el correcto funcionamiento, el diseño se lo realizó en SolidWorks y se presenta a continuación en la Figura 28. Además, los planos de la pieza se pueden observar detalladamente en Anexo 6: Planos.

Figura 28

Adaptador de sensor de corriente



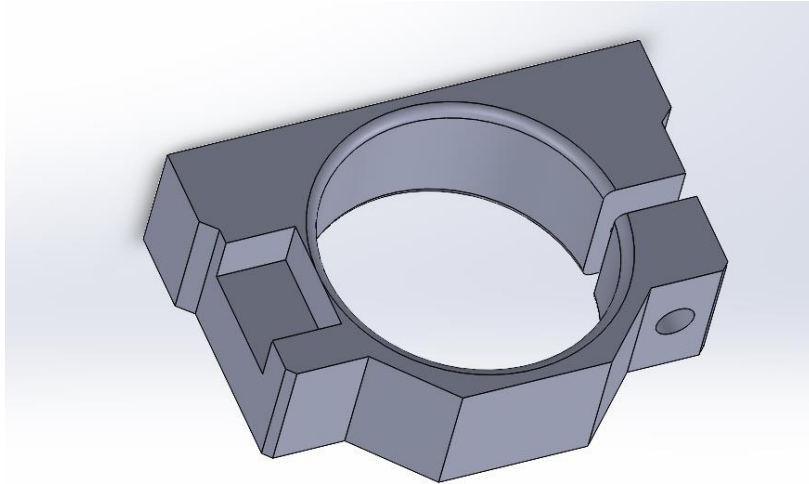
2.6.2. Giroscopio MPU6050

Para el acoplamiento del giroscopio se ha diseñado una pieza basada en la estructura en donde va colocado el husillo la cual fue diseñada y presentada en el trabajo de grado llamado “MÁQUINA DE CONTROL, NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA CORTE DE PLANCHAS DE ALUMINIO POR DESBASTE DE MATERIAL: DISEÑO”, para de esta

forma mantener el mismo patrón estético, dicho diseño se presenta a continuación en la Figura 29. De igual forma el plano de esta pieza se encuentra detallada en el Anexo 6: Planos.

Figura 29

Adaptador Giroscopio



2.6.3. Encoders

Para la sujeción de los encoders se ha optado por los denominados acoples flexibles presentados a continuación en la Figura 30.

Figura 30

Acoples Flexibles de 10mm a 5mm



Nota: [62]

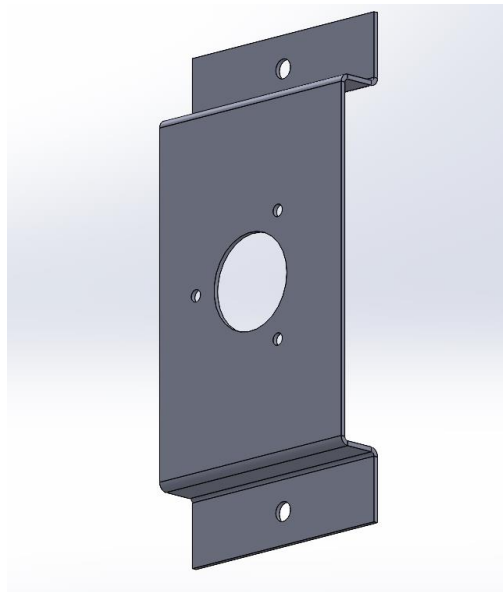
De esta forma se puede garantizar que, si el centro de rotación del eje de la máquina y del encoder no se encuentran correctamente posicionados, la desviación que se genera sea absorbido por este elemento.

Además, para cada uno de ellos se ha diseñado una pieza en chapa metálica para la sujeción de los sensores contra la estructura de la máquina.

La pieza necesaria para la sujeción del encoder del Eje X se puede observar en la Figura 31, al igual que piezas anteriores el plano a detalle de esta pieza se puede observar en el Anexo 6: Planos.

Figura 31

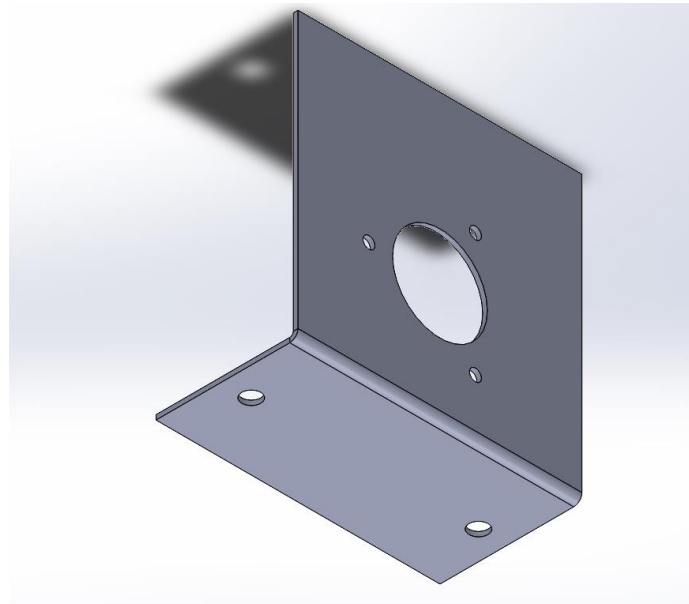
Soporte para encoder Eje X



Así mismo, para la sujeción del encoder en el Eje Y se ha elaborado una chapa metálica tal y como se puede observar en la Figura 32, de igual manera el plano se encuentra en el Anexo 6: Planos.

Figura 32

Soporte para encoder Eje Y



2.7.Implementación de interfaz

Para la implementación y el diseño de la interfaz se ha procurado seguir los parámetros presentados en la sección 1.6.2 , procurando que el diseño de la Interfaz sea lo más sencilla posible, sea intuitiva y fácil de manejar.

Entre los parámetros necesarios para mostrar en la interfaz se han propuesto:

- Velocidad en el Eje X de la máquina.
- Velocidad en el Eje Y de la máquina.
- Esfuerzo en el eje X de la herramienta.
- Esfuerzo en el eje Y de la herramienta.
- Potencia total consumida por la máquina.

También se ha configurado una hoja de Excel en la cual se almacenarán los datos obtenidos cada cierto tiempo.

Además, como se puede observar en la Figura 33 se presenta un botón en donde se puede elegir el archivo de Excel en donde se va a guardar los datos obtenidos y un menú

desplegable denominado Puerto de Comunicación en donde se elegirá el puerto COM en donde se encuentra conectada la placa Arduino, también consta de una casilla en donde se puede colocar la velocidad en baudios a la que se comunican la placa y el computador, la cual viene asignada con una velocidad predeterminada de 9600 baudios.

Figura 33

Diseño de HMI



La comunicación entre la placa de adquisición y la interfaz HMI se la ha realizado mediante comunicación serial, es un protocolo de comunicación entre dispositivos disponible en todos los computadores de hoy en día, se basa principalmente en la entrega y recepción de trenes de pulsos los cuales llevan información de bit a bit de un byte completo [63]. El código que se ejecuta en el Arduino se puede observar detalladamente en el Anexo 2: Código implementado en Arduino.

2.8.Ejecución del experimento

En esta parte se va a realizar la implementación e instalación de todo lo que viene a ser el cableado y adaptación de los diferentes sensores, junto con la placa Arduino.

2.8.1. Instalación y cableado

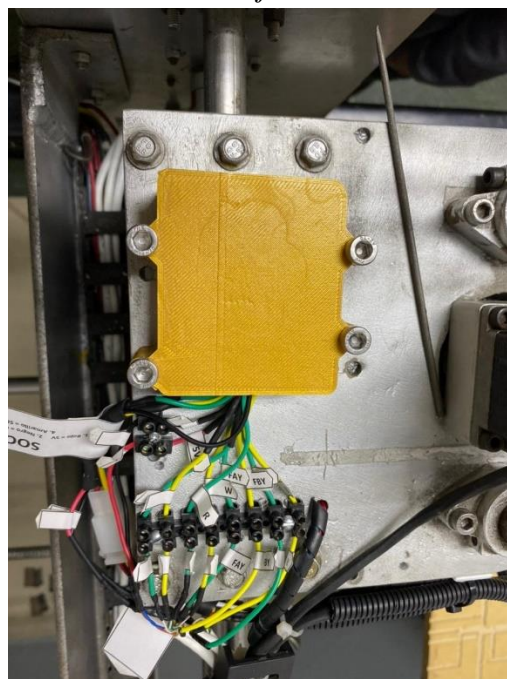
Se ha procedido a realizar la implementación física de los sensores en la máquina, para ello se ha decidido colocar toda la parte de recolección de información dentro del gabinete de mando, por lo que se ha iniciado con el cableado de los sensores.

Cabe mencionar que se culminó con el cableado de todos los sensores hasta el gabinete de mando, pero al momento de conectar la placa Arduino con el computador, se ha notado la falta de comunicación, luego de un extenso análisis se llegó a la conclusión de que el problema se debe al protocolo de comunicación que se maneja entre el sensor Giroscopio y el Arduino, el protocolo I2C únicamente funciona en perfectas condiciones hasta a 2 metros de distancia, debido a que la distancia de cableado excedía estas condiciones se ha procedido a evaluar otras alternativas.

Tomando en cuenta estos factores, se ha tomado la decisión de mover el sistema de adquisición de datos cerca del Giroscopio, entonces se ha puesto el Arduino encima de la estructura del eje X, como se puede observar en la Figura 34.

Figura 34

Placa Arduino colocada en la estructura del Eje X



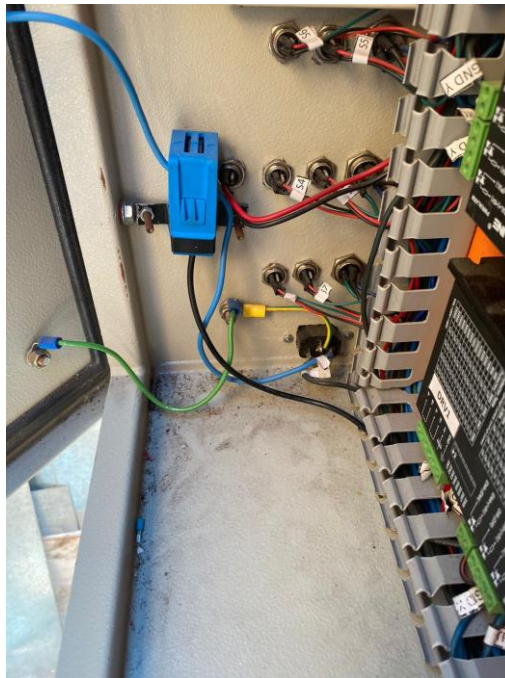
Para ello, se ha diseñado una carcasa para proteger al cableado y a la PCB de posibles factores externos que puedan afectar el desempeño de la tarjeta de adquisición, los planos de dicha carcasa, al igual que la tapa se pueden observar en el Anexo 6: Planos.

De esta manera se puede garantizar que la comunicación entre el Arduino y el Giroscopio se realice de manera óptima.

Dicho esto, se necesitó cablear hacia el gabinete de mando, el protocolo de comunicación que se maneja entre el computador y el Arduino, la alimentación de los sensores ya que se han alimentado con una fuente externa, y además la señal enviada por el sensor de corriente el cual se lo ha situado a un extremo del Gabinete, leyendo el paso de corriente que hay en la fase de la alimentación eléctrica, como se muestra en la Figura 35, de esta manera se garantiza que la corriente medida por el sensor es la que consume la máquina en general.

Figura 35

Sensor de corriente situado dentro del gabinete



Para garantizar la fácil movilización del gabinete se han usado los mismos conectores usados con anterioridad en el trabajo de grado “MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTACIONAL PARA CORTE DE PLANCHAS DE ALUMINIO POR DESBASTE DE MATERIAL: IMPLEMENTACIÓN”, estos conectores que se pueden observar en la parte inferior de la Figura 36 garantizan que la conexión de los cables se realicen en una única posición, lo cual es muy importante para garantizar la comunicación entre la placa de adquisición de datos y el computador.

Figura 36

Salidas en el gabinete de mando

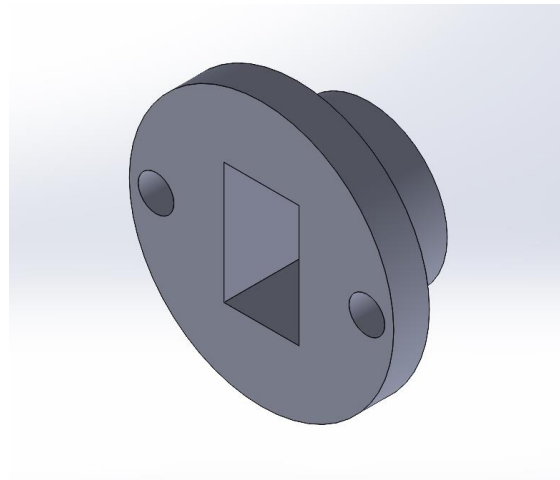


Es importante mencionar también, que debido a las nuevas configuraciones y disposiciones de la tarjeta Arduino, únicamente 2 de los 4 conectores macho mostrados en la Figura 36 han quedado habilitados, los otros 2 restantes quedan libres para futuros cambios o mejoras a la máquina.

Para la conexión entre la placa de adquisición de datos y el computador se ha dejado un puerto USB macho, el cual se puede observar alado de del CONTROL DB15 en la misma Figura 36, para fijar el puerto USB a la estructura se ha diseñado una pieza la cual se puede observar en la Figura 37, y de igual forma que en piezas anteriores el plano detallado de esta pieza se puede encontrar en el Anexo 6: Planos.

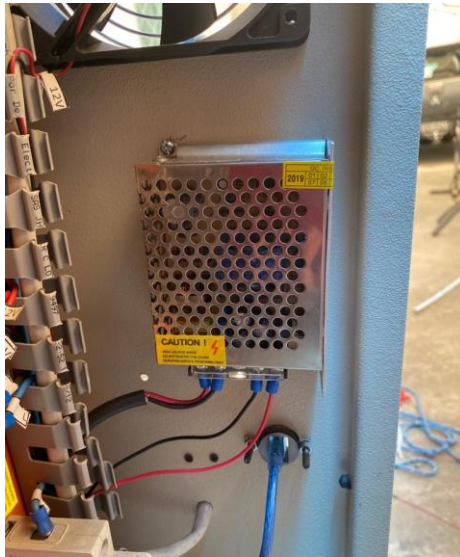
Figura 37

Soporte para conector USB



Finalmente, también se ha colocado un transformador de 120V a 5V en la parte lateral del gabinete para la alimentación de los sensores, ya que la alimentación provista por el Arduino evidentemente no era suficiente.

La fuente de alimentación se ha situado a un lado del gabinete como se puede observar en la Figura 38.

Figura 38*Fuente de alimentación de 5V*

La alimentación de esta fuente se ha hecho desde la Fase de alimentación como se ha denominado en el trabajo de grado mencionado anteriormente, la configuración y la denominación de dichas fases se puede observar en la Figura 39.

Figura 39*Interior del gabinete de control y sus fases*

Nota: [7]

Realizado todo el cableado dentro del gabinete, se ha procedido a sujetar todos y cada uno de los sensores en su posición de trabajo, el encoder del Eje X se ha sujetado a un extremo del eje justo del otro lado del motor paso a paso tal y como se puede observar en la Figura 40.

Figura 40

Posicionamiento de encoder Eje X



De igual forma, el encoder del Eje Y se ha situado al extremo del eje en el lado opuesto del motor paso a paso, como se mira en la Figura 41.

Figura 41

Posicionamiento de encoder Eje Y



Por su parte el Giroscopio ha sido situado en la parte más cercana a la herramienta de corte, que es el extremo del husillo, la forma en la que se ha colocado este sensor puede ser visto en la Figura 42.

Figura 42

Posicionamiento de Giroscopio



Es importante mencionar que todo el cableado se ha realizado con un cable UTP categoría 5e, la distribución de los colores y como se han conectado dichos cables se pueden observar en el Anexo 5: Distribución de los colores en cable UTP.

2.8.2. Configuración de los sensores

Concluida la instalación de todos y cada uno de los componentes necesarios se procede a realizar la calibración y configuración de los sensores.

2.8.2.1. Configuración inicial en Arduino IDE

Para comenzar con la configuración y calibración es necesario llamar las librerías necesarias para el manejo tanto de los encoders como del sensor MPU6050, para ello hay que descargar las librerías llamadas “Encoder.h” y “Simple_MPU6050.h” y luego incluirlas en las librerías de Arduino IDE, para luego definir las en el programa de la siguiente manera, tal y como se muestra en la Figura 43.

Figura 43*Librerías incluidas en la programación de Arduino*

```
#include <Encoder.h>           // incluye librería para encoders
#include "Simple_MPU6050.h"    // incluye libreria Simple_MPU6050
```

Luego hay que inicializar cada una de las variables necesarias para la obtención de datos, así como sus cálculos y muestreo.

En primer lugar, se inicializan las variables del sensor de corriente, por lo que es necesario escribir el código en el IDE de Arduino como se muestra en la Figura 44.

Figura 44*Variables para el censado de corriente*

```
//Variables para el censado de la corriente
float volt_sensor;
float corriente;
float Irms;
float N;
```

Después, de igual forma, es necesario declarar las variables necesarias para el control de los encoders, además declarar los pines a los cuales van a ir conectados la Fase A y la Fase B de los encoders, es importante mencionar, que una conexión óptima es conectar una fase de los encoders a uno de los pines capaces de detectar interrupciones, estos pines se encuentran en el Arduino UNO en los números 2 y 3, pero como es necesario del pin 2 para el funcionamiento del Giroscopio la configuración de los encoders queda puesta de la siguiente manera, como se puede ver en la Figura 45.

Figura 45*Variables para el censado de los encoders*

```
//Variables para el censado de los encoders
Encoder EncY(3, 4); // Entradas de encoder X
Encoder EncX(5, 6); // Entradas de encoder Y
long contadorX;
long contadorY;
long correccionX;
int Nx;
```

Finalmente, es necesario también inicializar los parámetros para el funcionamiento del MPU6050, así como otras instancias que servirán para hacer que el código quede mejor organizado y mucho más corto, el código a implementarse se presenta en la Figura 46.

Figura 46

Variables para el censado del Giroscopio

```
//Variables para el censado del Giroscopio
Simple_MPU6050 mpu; // crea objeto con nombre mpu
#define OFFSETS -2726, -860, 692, -47, 85, 83

#define spantimer(t) for (static uint32_t SpamTimer; (uint32_t)(millis() - SpamTimer) >= (t); SpamTimer = millis())
// spantimer funcion para generar demora al escribir en monitor serie sin usar delay()

#define printfloatx(Name,Variable,Spaces,Precision,EndTxt) print(Name); {char S[(Spaces + Precision + 3)];Serial.print(F(" "));
Serial.print(dtostrf((float)Variable,Spaces,Precision ,S));}Serial.print(EndTxt);
// printfloatx funcion para mostrar en monitor serie datos para evitar el uso se multiples print()
```

Es importante decir, que, aunque no se vea explícitamente en el código, dentro de la librería que usa el MPU6050 tiene reservado el pin 2 del Arduino para realizar las interrupciones cada vez que se detecta un valor.

2.8.2.2. Configuración del void setup() de Arduino IDE

El void setup() como se le denomina en el Arduino IDE es una función principal del Arduino que se ejecuta una única vez, generalmente en esta sección se inicializan parámetros de comunicación y estados de los pines del Arduino.

Como la comunicación entre el Arduino y el computador se la hace mediante protocolo serial y, además, la comunicación entre el Arduino y el MPU6050 se las hace con protocolo I2C es importante inicializar dichos protocolos en esta parte del programa, además de otras líneas necesarias las cuales se muestran en la Figura 47.

Figura 47*Código del void setup() de Arduino IDE*

```

void setup() {
  uint8_t val;
  #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE // activacion de bus I2C a 400 Khz
    Wire.begin();
    Wire.setClock(400000);
  #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
    Fastwire::setup(400, true);
  #endif

  Serial.begin(9600); // inicializacion de monitor serie a 115200 bps
  while (!Serial); // espera a enumeracion en caso de modelos con USB nativo
  mpu.SetAddress(0x68).load_DMP_Image(OFFSETS); // si existen OFFSETS
  //mpu.SetAddress(0x68).CalibrateMPU().load_DMP_Image(); //calibración automática del sensor
  mpu.on_FIFO(mostrar_valores); // llamado a funcion mostrar_valores si memoria FIFO tiene valores
}

```

2.8.2.3. Configuración del void loop() de Arduino IDE

El void loop() es una función de Arduino IDE que está constantemente ejecutándose, una vez que termina de ejecutar toda la función, vuelve inmediatamente a ejecutarla de nuevo.

Entonces es necesario colocar aquí un código rápido y sencillo para no ocupar mucha memoria del dispositivo, el código a implementarse en esta sección es el que se puede observar en la Figura 48.

Figura 48*Código del void loop() de Arduino IDE*

```

void loop() {
  analogReference(DEFAULT);
  contadorX = EncX.read();
  contadorY = EncY.read();
  analogReference(INTERNAL);
  volt_sensor = 30.00*(analogRead(A0) * (1.10));
  if(volt_sensor > 200)
  {
    corriente = (corriente+volt_sensor);
    N = N + 2;
    Irms = corriente/N;
  }
  else
  {
    Irms = Irms;
  }
  mpu.dmp_read_fifo(); // funcion que evalua si existen datos nuevos en el sensor y llama a la
  // función mostrar_valores
}

```

Cabe mencionar que como el sensor de corriente no envía valores lineales sino, lo hace en forma de una semionda es necesario realizar un constante promedio de todos los valores recibidos, siempre y cuando superen un valor lógico para poder ser promediados.

De esta forma se garantiza que los valores de “0” arrojados por el sensor de corriente debido a la corrección de semionda que se hizo con el amplificador no interfieran en la medida real del sensor.

2.8.2.4. Configuración para mostrar valores en Arduino IDE

Finalmente, es necesario configurar una última función en el programa de Arduino, esta función denominada “mostrar_valores” es llamada cada vez que el sensor MPU6050 detecta si hay valores disponibles.

En esta sección se hacen los cálculos y conversiones que logran que las señales enviadas por el MPU6050 a través de I2C sean interpretadas y puestas en dimensiones fáciles de interpretar por el operario del HMI. Además, de corregir y mejorar el desempeño que tiene el encoder del Eje X debido a su conexión a pines que no son capaces de detectar interrupciones, el código a implementar se puede observar en la

Figura 49

Función mostrar_valores parte 1

```
// mostrar_valores funcion que es llamada cada vez que hay datos disponibles desde el sensor
void mostrar_valores (int16_t *gyro, int16_t *accel, int32_t *quat, uint32_t *timestamp) {
  uint8_t SpamDelay = 100;      // demora para escribir en monitor serie de 100 mseg
  Quaternion q;                 // variable necesaria para calculos posteriores
  VectorFloat gravity;          // variable necesaria para calculos posteriores
  float ypr[3] = { 0, 0, 0 };    // array para almacenar valores de yaw, pitch, roll
  float xyz[3] = { 0, 0, 0 };    // array para almacenar valores convertidos a grados de yaw, pitch, roll
  spamtimer(SpamDelay) {       // si han transcurrido al menos 100 mseg entonces proceder
    mpu.GetQuaternion(&q, quat); // funcion para obtener valor para calculo posterior
    mpu.GetGravity(&gravity, &q); // funcion para obtener valor para calculo posterior
    mpu.GetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity); // funcion obtiene valores de yaw, ptich, roll
    mpu.ConvertToDegrees(ypr, xyz);

    if(contadorX != 0)
    {
      correccionX = correccionX + contadorX;
      Nx++;
    }
    else
    {
      correccionX = 0;
      Nx = 1;
    }
  }
}
```

Luego de realizar todos los cálculos que se mencionaron anteriormente, es importante mandar a escribir en el monitor serial todos los datos obtenidos de cada uno de los sensores, exactamente en el orden indicado en la Figura 50.

Figura 50

Función mostrar_valores parte 2

```

Serial.printfloatx(F(""), correccionX/Nx, 0, 0, F(",")); // muestra en monitor serie los datos corregidos del encoder X
Serial.printfloatx(F(""), contadorY, 0, 0, F(",")); // muestra en monitor serie los datos del encoder Y
Serial.printfloatx(F(""), (10000*(xyz[1]-0.14)), 0, 0, F(",")); // muestra en monitor serie desviación de eje x
Serial.printfloatx(F(""), (10000*(xyz[2]-0.13)), 0, 0, F(",")); // muestra en monitor serie desviación de eje y
Serial.printfloatx(F(""), Irms, 0, 0, F(",")); // muestra en monitor serie los valores de la corriente
Serial.println(); // salto de línea

contadorX = EncX.readAndReset(); // resetea a 0 los datos del encoder X para una nueva medición
contadorY = EncY.readAndReset(); // resetea a 0 los datos del encoder X para una nueva medición
}
}

```

CAPÍTULO III

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de todas las pruebas necesarias para verificar el correcto funcionamiento del sistema implementado.

3.1.Resultados de implementación

Una vez realizado todo el cableado y conexión de los diferentes sensores, se ha procedido a conectar el Arduino a la computadora para poder observar en la HMI, corregido el problema de comunicación que había entre el Giroscopio y el Arduino, se observó que el sistema funcionaba de mejor manera, aunque no tanto como se esperaba, este problema fue resuelto con la implementación de una fuente externa para la alimentación eléctrica de los sensores.

Realizado los cambios anteriormente mencionados, se vuelve a comprobar la comunicación entre el sistema y la computadora, comprobando que la comunicación se hace adecuadamente y que los sensores responden como se esperaba, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento.

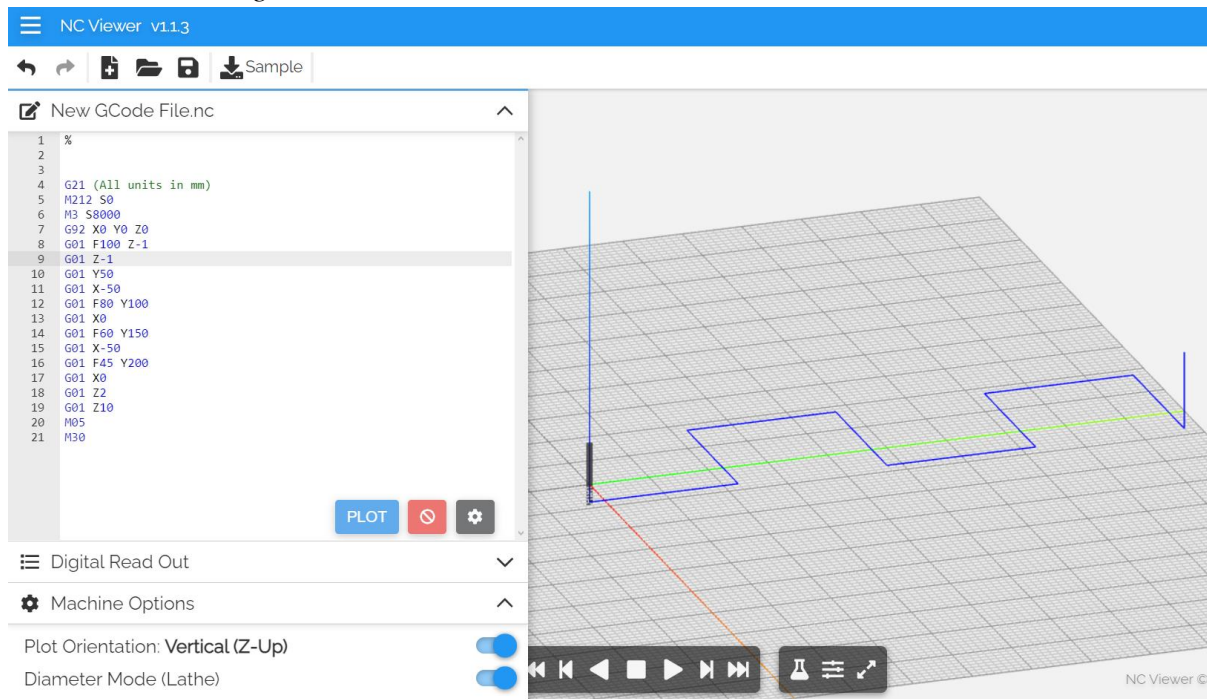
3.2.Validación de resultados

Una vez concluida la implementación de todos los sensores se ha procedido a validar cada uno de los sensores por separado, en primer lugar, se ha empezado a evaluar el desempeño del sensor de corriente, en tres ocasiones: con la máquina únicamente encendida, con uno de los ejes en funcionamiento, un mecanizado completo, para ello se ha usado como referencia el valor proporcionado por una pinza amperimétrica para la obtención del valor de la corriente.

Para la evaluación del mecanizado completo, se ha escrito un pequeño código con la ayuda de la herramienta online NC Viewer, la cual se muestra en la Figura 51, el código

detallado se puede observar en el Anexo 3: Código G del mecanizado para pruebas de funcionamiento.

Figura 51
Simulación de código mediante NC Viewer



Evaluando el código en el simulador, se procede a enviar la orden de mecanizado a la máquina, y en la Figura 52 se puede observar el mecanizado.

Figura 52
Prueba de corte en distintas velocidades



Los resultados de las mediciones del sensor de corriente se presentan a continuación en la Tabla 18.

Tabla 18

Tabla de resultados: Sensor de corriente

Prueba	Valor Pinza Amperimétrica	Valor medido en promedio	Porcentaje de falla	Observaciones
1	27,6	26,06	5,58%	Los valores tomados desde el sistema no se encuentran cerca a los valores originales.
	54	49,86	7,67%	
	117,6	113,48	3,50%	
2	27,6	26,84	2,75%	Los valores se acercan considerablemente al parámetro original, todos son aceptables excepto uno. Pero por la naturaleza del proceso se considera ese error porcentual como un valor válido.
	54	53,76	0,44%	
	117,6	112,75	4,12%	

Comprobado el funcionamiento del sensor de corriente se puede observar que las mediciones proporcionadas por el sensor están bastante cerca de las mediciones proporcionadas por la pinza, por lo que se puede concluir que el sensor cumple con las necesidades del tema, posteriormente se ha procedido a evaluar el desempeño de los encoders, para ello se ha usado el mismo programa que se ha presentado en la sección anterior en donde se han programado distintas velocidades cada cierto tramo del programa para evaluar la respuesta de los sensores frente a cada una de ellas.

Los datos obtenidos de todas las pruebas con los encoders se presentan a continuación en la Tabla 19, como se observa en la tabla, para validar la medición de los encoders, se ha calculado la velocidad de mecanizado basado en el desplazamiento de la herramienta, corroborando de esta forma cual es la velocidad real a la que se desplaza la herramienta.

Para esta prueba lo que se ha hecho es medir el desplazamiento que tiene la máquina, y medir el instante de tiempo que se demora, para luego poder determinar la velocidad a la que se mueve con la fórmula básica de la velocidad.

Tabla 19*Tabla de resultados: Encoders*

Prueba	Valor de Código G	Velocidad de Referencia de la máquina	Valor medido promedio (Eje X)	Valor medido promedio (Eje Y)	Porcentaje de falla (Eje X)	Porcentaje de falla (Eje Y)	Porcentaje de falla (Eje Y)
1	100	100,98	96,35	97,2	4,59%	3,74%	La medición de los encoders se aleja considerablemente de la medida real.
	80	80,64	76,31	72,84	5,37%	9,67%	
	60	60,61	62,35	56,73	2,87%	6,40%	
	45	45,47	50,7	44,67	11,50%	1,76%	
2	100	100,98	100,95	99	0,03%	1,96%	Los encoders han reducido su error considerablemente pero aún hay mediciones bastante equivocadas.
	80	80,64	78,5	82,03	2,65%	1,73%	
	60	60,61	59,1	62,62	2,49%	3,31%	
	45	45,47	46,74	49,67	2,80%	9,24%	
3	100	100,98	99,93	99,64	1,04%	1,33%	La medición tomada por los encoders ha reducido su error, y la velocidad mostrada por los mismos se encuentra considerablemente apegada a la velocidad real de la máquina.
	80	80,64	81,81	79,21	1,45%	1,77%	
	60	60,61	60,61	60,12	0,00%	0,81%	
	45	45,47	45,75	44,68	0,62%	1,74%	

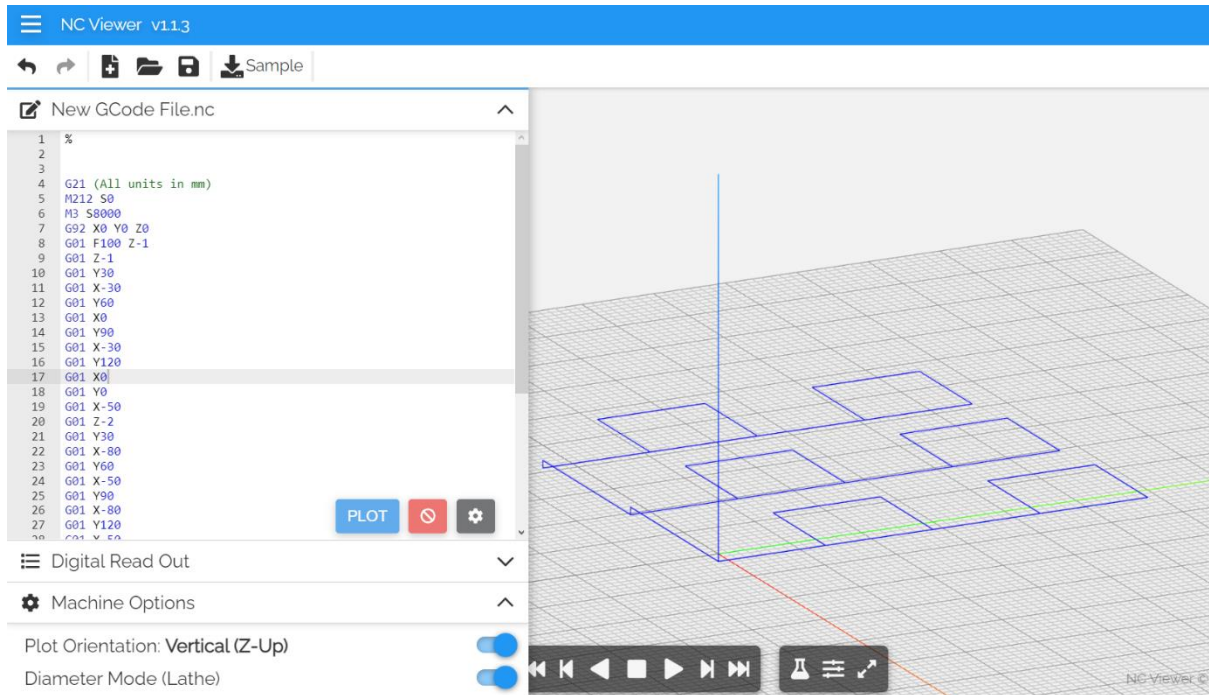
Se puede concluir, por lo tanto, que los encoders tienen un desempeño bastante bueno, apegándose a la velocidad real de la mesa y con un error mínimo que puede ser despreciable.

Finalmente, se procede a evaluar el desempeño del Giroscopio, debido a la naturaleza del sensor, no es posible comprobar con alguna referencia, por lo que se ha escrito un programa en donde se realizarán mecanizados con diferentes distancias de inserción de la herramienta, en donde se comprobará que, a mayor inserción de la herramienta, el ángulo de deformación será mayor.

Para ello al igual que con los sensores anteriores se ha escrito un programa en donde se ha hecho ciclos cortos con la misma velocidad, haciendo que, en cada ciclo, la herramienta profundice un poco más, la simulación de NC Viewer se puede observar en la Figura 53 y el código se muestra detalladamente en el Anexo 3: Código G del mecanizado para pruebas de funcionamiento.

Figura 53

Simulación de código G para prueba de Giroscopio



Luego se procedió a ingresar el código ya simulado en la máquina CNC, el mecanizado de ésta se puede observar en la Figura 54.

Figura 54

Prueba de corte en distintas inserciones



Hecho esto, los resultados obtenidos de la prueba para el Giroscopio se presentan a continuación en la Tabla 20.

Tabla 20

Tabla de resultados: Giroscopio

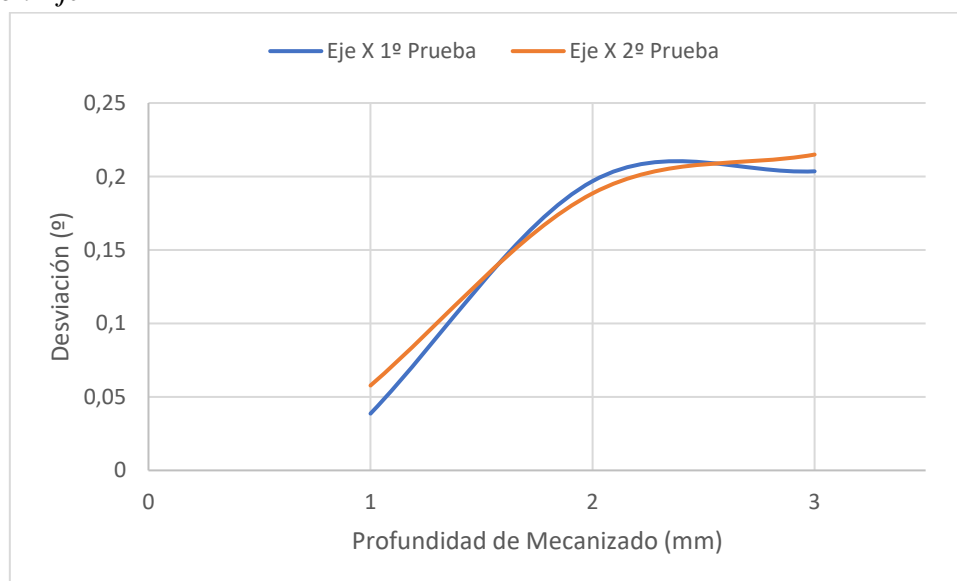
Prueba	Profundidad de mecanizado	Desviación promedio en grados (Eje X)	Desviación promedio en grados (Eje Y)	Observaciones
1	1mm	0,03865	0,08582	A la profundidad de 1mm, la herramienta no sufre prácticamente ninguna desviación, por lo que el mecanizado es el óptimo.
	1mm	0,05776	0,03091	
2	2mm	0,2368	0,1731	Con 2 mm de profundidad, la desviación en la herramienta comienza a notarse y el mecanizado se vuelve menos aceptable.
	2mm	0,1985	0,1721	
3	3mm	0,2035	0,4094	A los 3 mm de profundidad, la máquina empieza a vibrar demasiado, generando mayor esfuerzo en la herramienta y por lo tanto desviando considerablemente la herramienta como se puede observar en los datos obtenidos.
	3mm	0,2049	0,344	

De los datos obtenidos en las pruebas, se ha procedido a realizar una gráfica en donde se podrá observar cual es la curva de desviación que presenta la herramienta de acuerdo con la profundidad de mecanizado.

En la Figura 55 se puede observar la gráfica en donde se muestra la desviación que presenta la herramienta con respecto al Eje X de la máquina CNC.

Figura 55

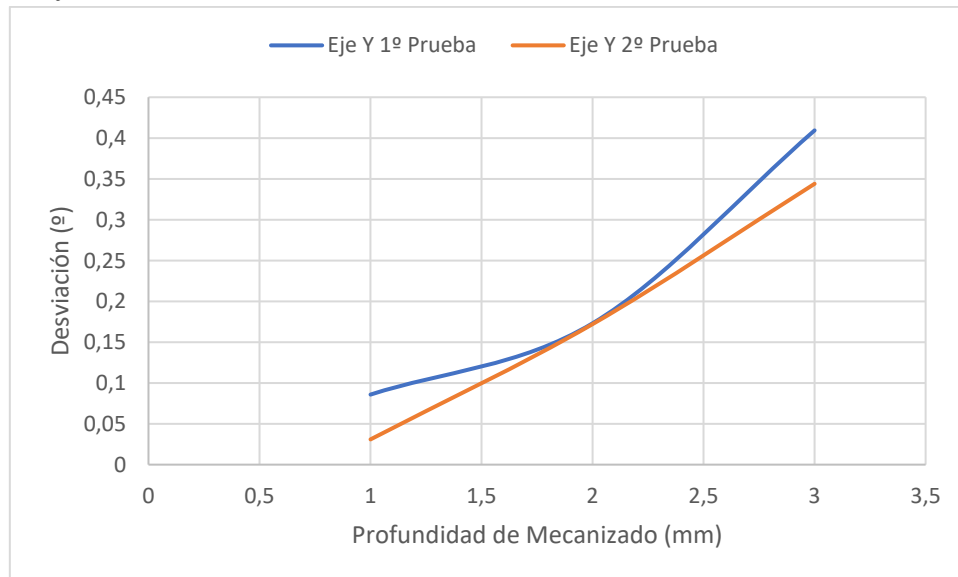
Desviación Eje X



De igual forma en la Figura 56 se puede observar la gráfica en donde se observa el comportamiento que presenta la desviación de la herramienta de acuerdo con la profundidad de inserción de la herramienta en el mecanizado.

Figura 56

Desviación Eje Y



De estas gráficas se puede observar que el sensor presenta un comportamiento lineal, frente a las diferentes profundidades de inserción de la herramienta tal y como se esperaba de acuerdo con lo observado en la hoja de datos del sensor, pues mientras mayor sea la profundidad de mecanizado, si se mantiene la misma velocidad de avance y la misma revolución del husillo, el esfuerzo realizado por la herramienta será mayor y por lo tanto se desviará más.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Luego de las investigaciones realizadas se ha podido determinar que las variables más importantes en el mecanizado y por lo tanto aquellas que se van a digitalizar vienen a ser: la fuerza ejercida por la herramienta, el desplazamiento o la velocidad de desplazamiento de la herramienta y la corriente consumida por la máquina para así obtener los parámetros de corte adecuados.
- Para esta tesis se ha seleccionado los Encoders Singswise 360R/P los cuales poseen una resolución de 360 pulsos por revolución, un Acelerómetro y Giroscopio MPU6050 con una resolución de lectura de 16 bits y además un Sensor de corriente SCT-013-030.
- La HMI se ha diseñado de acuerdo con las pautas establecidas en la norma ISO 9126 siguiendo los criterios para un correcto diseño, garantizando la Usabilidad, Navegabilidad y demás conceptos presentes en la norma.
- Luego de las pruebas realizadas se ha logrado establecer un correcto funcionamiento de todos los sensores implementados, garantizando que las mediciones tengan un error mínimo tanto en el sensor de corriente como en los encoders y así mismo, garantizando que el giroscopio presente curvas de fuerzas apegándose al comportamiento mencionado en la hoja de datos.

4.2.Recomendaciones

- Realizar las pruebas de mecanizado de tal forma que el avance e inserción de la herramienta siempre se encuentren dentro de los rangos establecidos, ya que mecanizados fuera de los rangos pueden ocasionar demasiadas vibraciones y afectar al rendimiento de los sensores.
- Verificar siempre las distancias efectivas de los protocolos de comunicación, ya que distancias demasiado largas o cables que presenten demasiada resistencia eléctrica pueden provocar que la comunicación no se realice de manera adecuada.
- Si la comunicación entre el computador y la tarjeta de adquisición de datos no se realiza, es importante verificar que el cable USB se encuentre correctamente conectado y el sensor MPU6050 se encuentre encendido.
- Al realizar pruebas excesivamente largas, se debe realizar un filtro de la información por posibles valores erróneos que se hayan almacenado dentro de la hoja de cálculo provista por la HMI.
- Se recomienda implementar un sensor capaz de detectar el consumo energético que presenta únicamente el husillo, para de esta forma tener un filtro y datos aún más precisos de cuanto se consume en realizar el mecanizado.
- En implementaciones futuras, evitar el uso de cable sólido para realizar la comunicación entre sensores y tarjeta de adquisición ya que este cable es susceptible a quebrarse con movimientos bruscos, puede ser reemplazado por cable flexible.
- Se podría además aumentar la cantidad de sensores orientados a la detección del esfuerzo que genera la herramienta, para tener datos mucho más precisos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Guerrer and F. Acuña, “Diseño de un sistema de control numérico computarizado (CNC), para una fresadora de madera de tres dimensiones,” Tesis, 2018. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/2151/1/91801.pdf>
- [2] R. Gudiño, “La Aportación de pequeñas y medianas empresas (PYMES) en la economía ecuatoriana.” 2017. Accessed: Apr. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.uv.mx/iiesca/files/2018/03/14CA201702.pdf>
- [3] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Cuarta. 2002. Accessed: Apr. 17, 2022. [Online]. Available: https://books.google.es/books?id=gilYI9_KKAoC&dq=manufactura&lr=&hl=e s&source=gbs_navlinks_s
- [4] O. Eraso Guerrero, “PROCESOS DE MANUFACTURA,” Tesis, UNAD, 2008. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38884536/procesos_de_manufactura-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1649950990&Signature=NjFsJZFW8k6Tb~1WO0fteb0DY3C01pMAWeHQ5OvLUTRP6bCyqGA2Mfba5ZU1QgcGIWbgZmSwhvOsXvl2x2nCFSA3Nqjt6wH02ru8tUOK7nEvg8zkYBA-f1rqC1Y8NE2lduerim9b7~VSbzzULjXVagALLwVLmmEsXqgJG4ZPxYuZ6misV4xnjN7V2JwqH1zSiWMf9ZIWITuzmXwDsWacfjIId9GIL1NU-CKevxcnz1Ugk~ItIjuw~Fk2p24wwGb6yjlKG-81HJWnGPPQcCV8NSvPxOXsnArTtHP4aaNmZmwIDmRzh-ItUCmj~rYusXLW4Nd2zOmW5jZ1pgpVLSEKSQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [5] F. González Correa, “MANUFACTURA ESBELTA (LEAN MANUFACTURING). PRINCIPALES HERRAMIENTAS,” *Revista Panorama Administrativo Año*, vol. 1, no. 2, pp. 85–112, 2007, Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/raites/article/view/77>
- [6] V. Ibarra Balderas and L. Ballesteros Medina, “Manufactura Esbelta,” *Conciencia Tecnológica*, no. 53, 2017, Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94453640004>

- [7] H. A. Inbacuán Tamba, “Máquina de control numérico computacional para corte de planchas de aluminio por desbaste de material: Implementación,” Tesis, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2019. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9368>
- [8] J. Criollo, “Máquina CNC para placas electrónicas, proceso de fresado y taladrado.,” Tesis, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2019. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9395>
- [9] J. J. Peters, *Introducción al Control Numérico Computarizado*. [Online]. Available: [https://wiki.ead.pucv.cl/Introducción_al_control_numérico_computarizado_\(CNC\)](https://wiki.ead.pucv.cl/Introducción_al_control_numérico_computarizado_(CNC))
- [10] K. Maji, “Cortadora láser CNC,” Tesis, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2018. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8278>
- [11] Inc. Hypertherm, “Software CAM,” 2022. <https://www.hypertherm.com/es/learn/cutting-education/cam-software/>
- [12] J. Gaibor Puente and C. Carrión Paladines, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA CNC PARA LA FABRICACIÓN DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO PARA COMPONENTES SMD,” Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2015. [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4965>
- [13] M. Sanabria, “Optimización de máquinas reconfigurables CNC por medio de interfaz de control inteligente,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 33, pp. 141–154, Oct. 2020, doi: 10.18845/tm.v33i7.5489.
- [14] W. Hernandez L, “Estudio experimental del desgaste del flanco y de las fuerzas de corte en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 1045,” Tesis (Doctoral), Universidad de Holguin.
- [15] A. C. Néri, “PARÂMETROS DE CORTE NA USINAGEM DE MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO,” Tesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- [16] U. Zuperl, F. Cus, and E. Kiker, “Intelligent Adaptive Cutting Force Control in End-Milling,” *Technical Gazette*, vol. 13, no. 2, pp. 15–22, 2006.

- [17] M. López de Lacalle, Lamikis M, and S. G, *Mecanizado de alto rendimiento*, 1st ed. BilBao: Izaro, 2004.
- [18] ingemecánica, “Fundamentos de los Procesos de Mecanizado.” <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn38.html>
- [19] M. P. Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna*, Tercera edición. C. D. México: Mc GrawHill, 2007. [Online]. Available: https://www.academia.edu/33002366/Fundamentos_de_manufactura_moderna_3edi_Groover
- [20] Kendu, “Catálogo de parámetros de corte Katalog,” Kendu, Vasco, 2014.
- [21] E. Reyes Flores, “Tipos de Sensores,” *Con-Ciencia Serrana*, vol. 1, no. 2, pp. 31–33, 2019, [Online]. Available: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/ixtlahuaco/issue/archive>
- [22] R. Pallás Areny, *Sensores y acondicionadores de señal*, 4a Edición. 2005.
- [23] J. O. Ignacio Torres, B. Cruz Muñoz Física, and C. Villegas, “Criterios para la instrumentacion de un magneómetro hall en corriente continua,” *Scientia et Technica Año XIII*, vol. 37, 2007.
- [24] L. Martínez León, “Sensores de fibra óptica codificados en frecuencia: medida de voltaje y corriente,” Tesis Doctoral, Universidad de Valencia, Valencia, 2002.
- [25] M. Velasco Caminero, “Estudio de sondas de corriente Rogowski para su empleo en sistemas de monitorización de eficiencia energética,” Tesis, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2021.
- [26] Istec International, “Sensores para medir velocidad,” Oct. 19, 2021. <https://esp.cbmconnect.com/sensores-para-medir-la-velocidad/#:~:text=Un%20sensor%20de%20efecto%20Hall%20mide%20los%20cambios%20en%20el,señal%20de%20onda%20cuadrada%20clara.>
- [27] Servo Motors Adjust, “Resolver & Feedback.” <https://www.servomotorsadjust.com/resolver-feedback/>
- [28] M. Santos Peñas and G. Farias Castro, “Laboratorios virtuales de procesamiento de señales,” *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 7, no. 1, pp. 91–100, 2010, doi: 10.4995/RIAI.2010.01.09.
- [29] A. v Oppenheim and A. S. Willsky, *Señales y Sistemas*, 2da Edición. México: Prentice Hall.

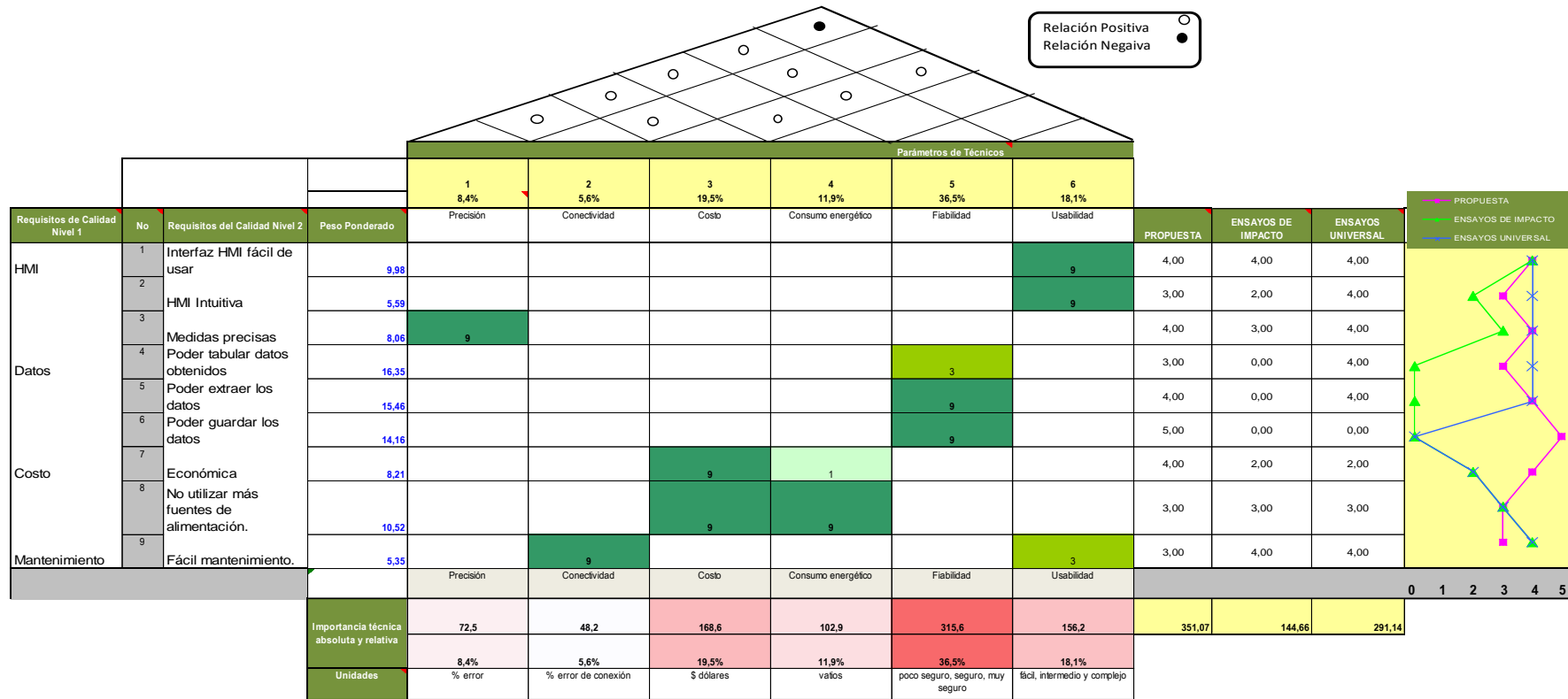
- [30] J. Gutiérrez Montiel, “Aplicaciones. Analógico-Digital.” <https://app.emaze.com/@AOWRFQQIO#/1>
- [31] J. Mayné, “Sensores, acondicionadores y procesadores de señal.,” Madrid, 2003.
- [32] J. L. Naranjo Bucheli and L. M. Velásquez Garrido, “Diseño e implementación de un módulo didáctico con sistema HMI para el análisis y estudio de sensores y transductores de proximidad analógicos por medio de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI y controlada por el software Labview,” Tesis de Licenciatura, 2014.
- [33] R. Rubio Hernandez, “Optimización de parámetros de corte y detección de desgaste en herramienta de corte para un proceso de mecanizado a alta velocidad utilizando redes neuronales y algoritmos genéricos,” Tesis, Tecnológico de Monterrey, Monterrey, 2011. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/570746/DocsTec_11722.pdf?se.
- [34] J. Grueso Delgado, “Implementación de una interfaz HMI para la operación del módulo control de procesos del laboratorio de robótica,” Tesis, Universidad de La Salle, Bogotá, 2008. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion/55
- [35] P. Rodríguez, “Diseño de Interfaces Hombre - Máquina (HMI),” Universidad Austral de Chile, Valdivia. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/619/620/621/3620.pdf>
- [36] Monografias.com S. A., “Automatización industrial. Interfaz hombre-máquina.” <https://www.monografias.com/trabajos105/automatizacion-industrial-interfaz-hombre-maquina/automatizacion-industrial-interfaz-hombre-maquina>
- [37] P. A. Daneri, *PLC: automatización y control industrial*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Hispano Americana HASA, 2009. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/66558>
- [38] R. Míreles Muños, “IMPLEMENTACION DEL DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (Q.F.D),” Tesis, Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, 2007.
- [39] C. Riba, *Diseño Concurrente*. España, 2002.
- [40] L. Miles, “Techniques of Value Analysis and Engineering,” *Value Foundation*, no. Third Edition, 1989.

- [41] D. A. Corzo Ponce and M. Á. Cuatín Estacio, “DISEÑO DE UNA MÁQUINA SEMIAUTOMÁTICA PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES Y BLOQUES,” Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4299>
- [42] R. Olivo and M. Arecia, “Estudio del consumo energético en la planta de producción Carvajal Empaques,” Tesis de Grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2018.
- [43] Digi-Key Electronics, “Sensores de corriente CT, C/CT y ZCT,” 1995. <https://www.digikey.com/es/product-highlight/k/kemet/ct-c-ct-and-zct-series-current-sensors>
- [44] Siriorred, “Sensores Efecto Hall,” 2022. <https://www.siriorred.com/sensor-hall-lazo-abierto-hk-ky01.html>
- [45] Control para la industria S. A., “Encoder Absoluto Diámetro 50mm,” 2022. <https://www.cpi.com.ar/productos/e6c3-a-encoder-absoluto-diametro-50mm/>
- [46] RCC Industrial Solutions, “Resolvers brushless y synchro.” <http://rccindustrial.com/resolvers-brushless-y-synchro/>
- [47] sensoresdepresión.top, “Analizar los elementos de las galgas extensometricas de los aparatos para medicion de presion.” <https://www.sensoresdepresion.top/2020/01/analizar-los-elementos-de-las-galgas-extensometricas-de-los-aparatos-para-medicion-de-presion.html>
- [48] VIRTUALEXPO GROUP, “Tarjeta de adquisición analógica,” 2022. <https://www.directindustry.es/prod/measurement-computing/product-28254-1013675.html>
- [49] Tribalyte Technologies, “Arduino vs Raspberry Pi,” Jul. 07, 2021. <https://tech.tribalyte.eu/blog-arduino-vs-raspberry-pi>
- [50] Elettronica Veneta, “Panel operador táctil.” <https://www.elettronicaveneta.com/es/prodotto/panel-operador-tactil-2/>
- [51] Schneider Electric Japan Holdings Ltd., “Software for remote viewing of HMI from Desktop PC - Pro-face Remote HMI Client for Win,” 1996. https://www.proface.com/en/product/soft/remotehmi_client/top
- [52] R. O. Antolinez Díaz and J. L. Ruda Cleves, “Almacenamiento en la nube,” *Universidad Piloto de Colombia*, Feb. 2014.

- [53] Y. Fernández Romero and I. García Pombo, “Interfaz USB,” *Telemática*, vol. 10, no. 1, Sep. 2012.
- [54] Ó. Torrente Artero, *ARDUINO. Curso práctico de formación*. 2013.
- [55] C. Martínez and M. Hidalgo, “Arduino,” *EduBasica*.
<http://platea.pntic.mec.es/~mhidalgo/edubasica/01arduino/arduino01.html>
- [56] el OCTAVO BIT, “Placas de Arduino oficiales y no oficiales,” Jun. 20, 2020.
<https://eloctavobit.com/placas-de-arduino-oficiales-y-no-oficiales/>
- [57] UNIT Electronics, “LM358N Amplificador Operacional PDIP–8,” 2016.
<https://uelectronics.com/producto/lm358n-amplificador-operacional-pdip-8/>
- [58] A. Barón Cuevas, “Monitorización de la energía consumida mediante Raspberry Pi para sistema domótico,” Tesis de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, 2017.
- [59] D. S. Fedorov, A. Y. Ivoylov, V. A. Zhmud, and V. G. Trubin, “Using of Measuring System MPU6050 for the Determination of the Angular Velocities and Linear Accelerations,” *Automatics & Software Enginery*, vol. 1, no. 11, pp. 76–81, 2015.
- [60] National Instruments, “Multisim,” 2022. <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/software-products/download.multisim.html#452133>
- [61] National Instruments, “Ultiboard,” 2022. <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/software-products/download.ultiboard.html#452132>
- [62] Mercado Libre, “Acople Flexible,” 2022.
<https://electronica.mercadolibre.com.ec/acople-flexible>
- [63] F. I. León Araujo, “Diseño, construcción e implementación de un sistema para el manejo de un periférico de los ascensores del edificio PACO mediante comunicación serial y protocolo MODBUS RTU,” Tesis de Grado, Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2006. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/368>

6.ANEXOS

6.1.Anexo 1. Casa de la Calidad



6.2. Anexo 2: Código implementado en Arduino

```
#include <Encoder.h>           // incluye librería para encoders
#include "Simple_MPU6050.h"     // incluye libreria Simple_MPU6050

//Variables para el sensado de los encoders
Encoder EncY(3, 4); // Entradas de encoder X
Encoder EncX(5, 6); // Entradas de encoder Y
long contadorX;
long contadorY;
long correccionX;
int Nx;

//Variables para el censado de la corriente
float volt_sensor;
float corriente;
float Irms;
float N;

// Datos de giroscopio
Simple_MPU6050 mpu; // crea objeto con nombre mpu
#define OFFSETS -2726, -860, 692, -47, 85, 83

#define spantimer(t) for (static uint32_t SpamTimer; (uint32_t)(millis() - SpamTimer) >= (t);
SpamTimer = millis())
// spantimer funcion para generar demora al escribir en monitor serie sin usar delay()

#define printfloatx(Name,Variable,Spaces,Precision,EndTxt) print(Name); { char S[(Spaces +
Precision + 3)];Serial.print(F(" ")); Serial.print(dtostrf((float)Variable,Spaces,Precision
,S));}Serial.print(EndTxt);
// printfloatx funcion para mostrar en monitor serie datos para evitar el uso se multiples print()
```

```

void setup() {
  uint8_t val;
  #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE // activacion de bus I2C
  a 400 Khz
  Wire.begin();
  Wire.setClock(400000);
  #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
  Fastwire::setup(400, true);
  #endif

  Serial.begin(9600); // inicializacion de monitor serie a 115200 bps
  while (!Serial); // espera a enumeracion en caso de modelos con USB nativo // si
  existen OFFSETS
  mpu.SetAddress(0x68).load_DMP_Image(OFFSETS); // inicializacion de sensor
  //mpu.SetAddress(0x68).CalibrateMPU().load_DMP_Image();
  mpu.on_FIFO(mostrar_valores); // llamado a funcion mostrar_valores si memoria FIFO
  tiene valores

}

void loop() {
  analogReference(DEFAULT);
  contadorX = EncX.read();
  contadorY = EncY.read();
  analogReference(INTERNAL);
  volt_sensor = 30.00*(analogRead(A0) * (1.10));
  if(volt_sensor > 200)
  {
    corriente = (corriente+volt_sensor);
    N = N + 2;
    Irms = corriente/N;
  }
}

```



```

else
{
    Irms = Irms;
}
mpu.dmp_read_fifo(); // funcion que evalua si existen datos nuevos en el sensor y llama
}

// mostrar_valores funcion que es llamada cada vez que hay datos disponibles desde el sensor
void mostrar_valores (int16_t *gyro, int16_t *accel, int32_t *quat, uint32_t *timestamp) {
    uint8_t SpamDelay = 100; // demora para escribir en monitor serie de 100 mseg
    Quaternion q; // variable necesaria para calculos posteriores
    VectorFloat gravity; // variable necesaria para calculos posteriores
    float ypr[3] = { 0, 0, 0 }; // array para almacenar valores de yaw, pitch, roll
    float xyz[3] = { 0, 0, 0 }; // array para almacenar valores convertidos a grados de yaw, pitch,
roll
    spantimer(SpamDelay) { // si han transcurrido al menos 100 mseg entonces proceder
        mpu.GetQuaternion(&q, quat); // funcion para obtener valor para calculo posterior
        mpu.GetGravity(&gravity, &q); // funcion para obtener valor para calculo posterior
        mpu.GetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity); // funcion obtiene valores de yaw, ptich, roll
        mpu.ConvertToDegrees(ypr, xyz);

        if(contadorX != 0)
        {
            correccionX = correccionX + contadorX;
            Nx++;
        }
        else
        {
            correccionX = 0;
            Nx = 1;
        }
    }
}

```

```
Serial.printf(" ", correccionX/Nx, 0, 0, F(", ")); // muestra en monitor serie los
datos corregidos del encoder X
Serial.printf(" ", contadorY, 0, 0, F(", ")); // muestra en monitor serie los datos
del encoder Y
Serial.printf(" ", (10000*(xyz[1]-0.14)), 0, 0, F(", ")); // muestra en monitor serie
desviación de eje x
Serial.printf(" ", (10000*(xyz[2]-0.13)), 0, 0, F(", ")); // muestra en monitor serie
desviación de eje y
Serial.printf(" ", Irms, 0, 0, F(", ")); // muestra en monitor serie los valores
de la corriente
Serial.println(); // salto de linea

    contadorX = EncX.readAndReset(); // resetea a 0 los datos del encoder
X para una nueva medición
    contadorY = EncY.readAndReset(); // resetea a 0 los datos del encoder
X para una nueva medición
}
}
```

6.3.Anexo 3: Código G del mecanizado para pruebas de funcionamiento

6.3.1. Pruebas a distintas velocidades

%

G21 (All units in mm)

M212 S0

M3 S8000

G92 X0 Y0 Z0

G01 F100 Z-3

G01 Z-3

G01 Y50

G01 X-50

G01 F80 Y100

G01 X0

G01 F60 Y150

G01 X-50

G01 F45 Y200

G01 X0

G01 Y0

G01 Z2

G01 Z10

M05

M30

6.3.2. Pruebas a distintas inserciones

%

G21 (All units in mm)

M212 S0

M3 S8000

G92 X0 Y0 Z0

G01 F100 Z-1

G01 Z-1

G01 Y30

G01 X-30

G01 Y60
G01 X0
G01 Y90
G01 X-30
G01 Y120
G01 X0
G01 Z2
G01 Z10
G00 Y0
G01 X-50
G01 Z-2
G01 Y30
G01 X-80
G01 Y60
G01 X-50
G01 Y90
G01 X-80
G01 Y120
G01 X-50
G01 Z2
G01 Z10
G00 Y0
G01 X-100
G01 Z-2
G01 Y30
G01 X-130
G01 Y60
G01 X-100
G01 Y90
G01 X-130
G01 Y120
G01 X-1000
G01 Z2

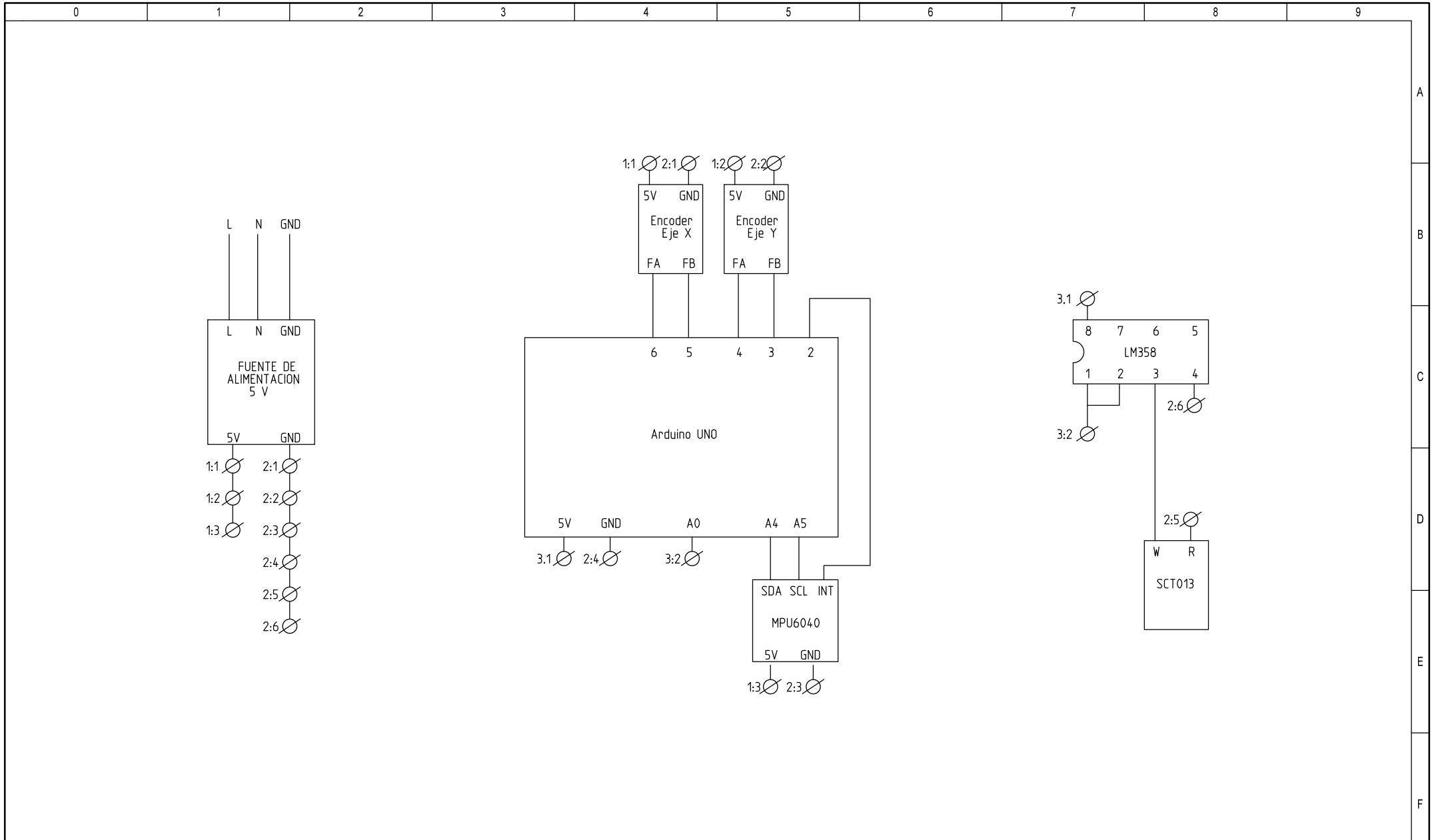
G01 Z10

G00 Y0

M05

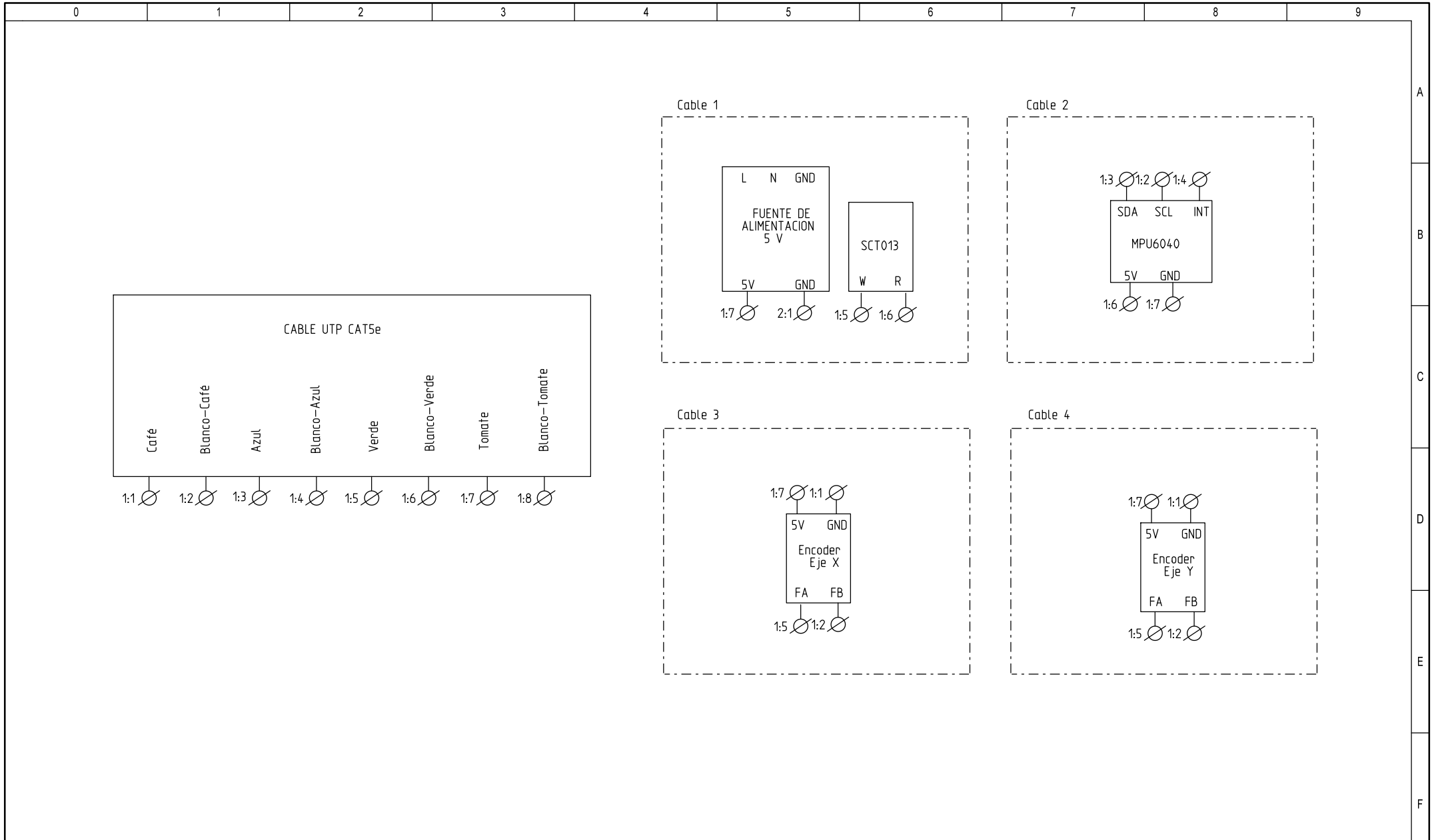
M30

6.4. Anexo 4: Planos eléctricos



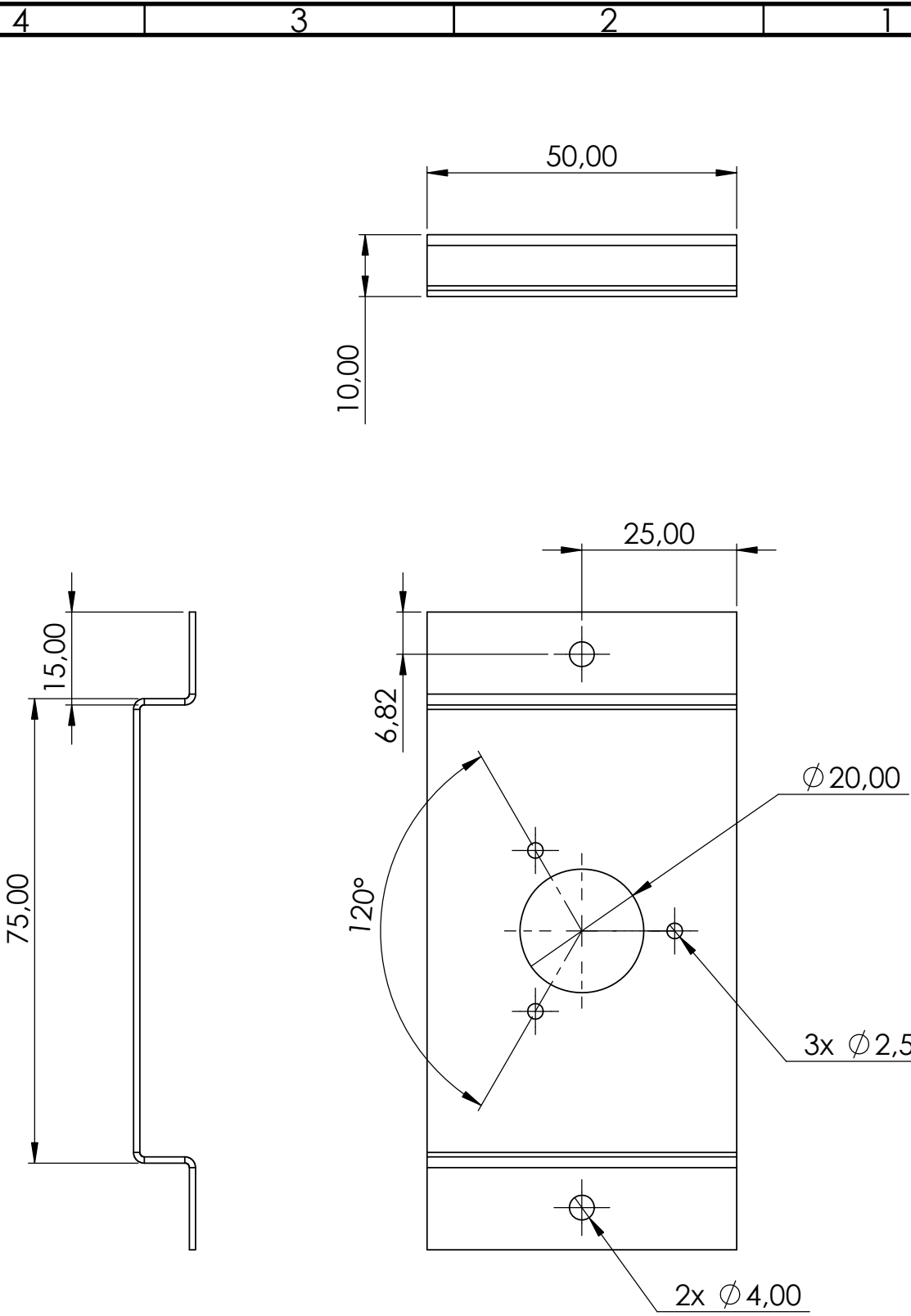
	Fecha:	Firma:	Proyecto:	Escala:
Elaborado por:	29/08/2022		Diseño de una interfaz hombre máquina para la medición y control de parámetros de corte en una máquina CNC	No aplica
Revisado por:	29/08/2022		Dibujo:	Dibujo:
Ing. Cosme Mejía			Diagrama Eléctrico	1/2

6.5. Anexo 5: Distribución de los colores en cable UTP

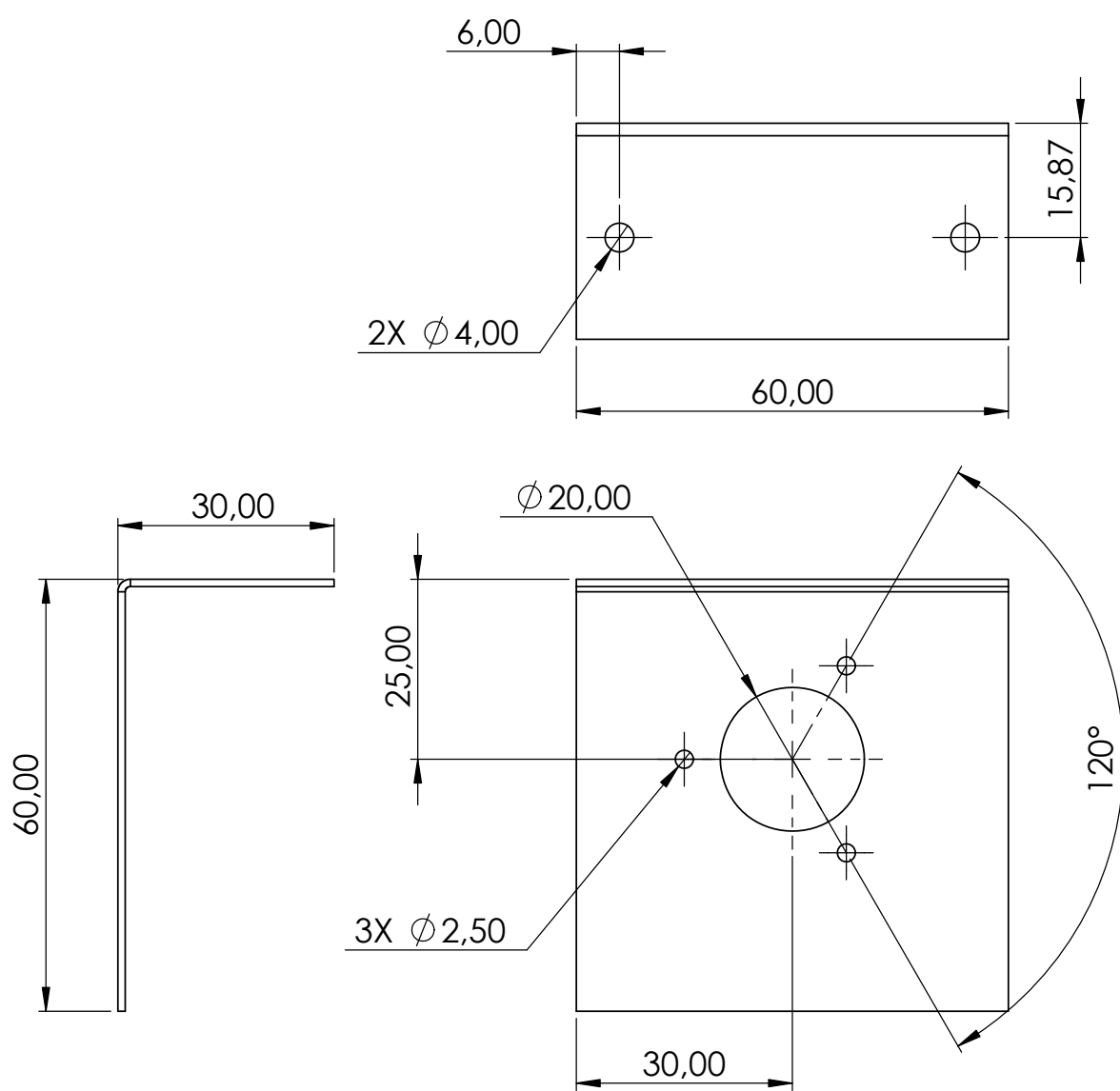


	Fecha:	Firma:	Proyecto:	Escala:
Elaborado por:	29/08/2022		Diseño de una interfaz hombre máquina para la medición y control de parámetros de corte en una máquina CNC	No aplica
Revisado por:	29/08/2022		Dibujo: Conexios a cable UTP	Dibujo: 2/2

6.6. Anexo 6: Planos



FICA CIME	PROYECTO DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC				ESCALA 1:1	
	CODIGO SOPORTE ENCODER X					
	MATERIAL TOL	DISEÑO NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22	HOJA A4		
	TRATAMIENTO GALV	DIBUJÓ NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22			
	RECUBRIMIENTO ZINC G40	REVISÓ ING. COSME MEJÍA				
CANTIDAD 1	APROBÓ ING. COSME MEJÍA					

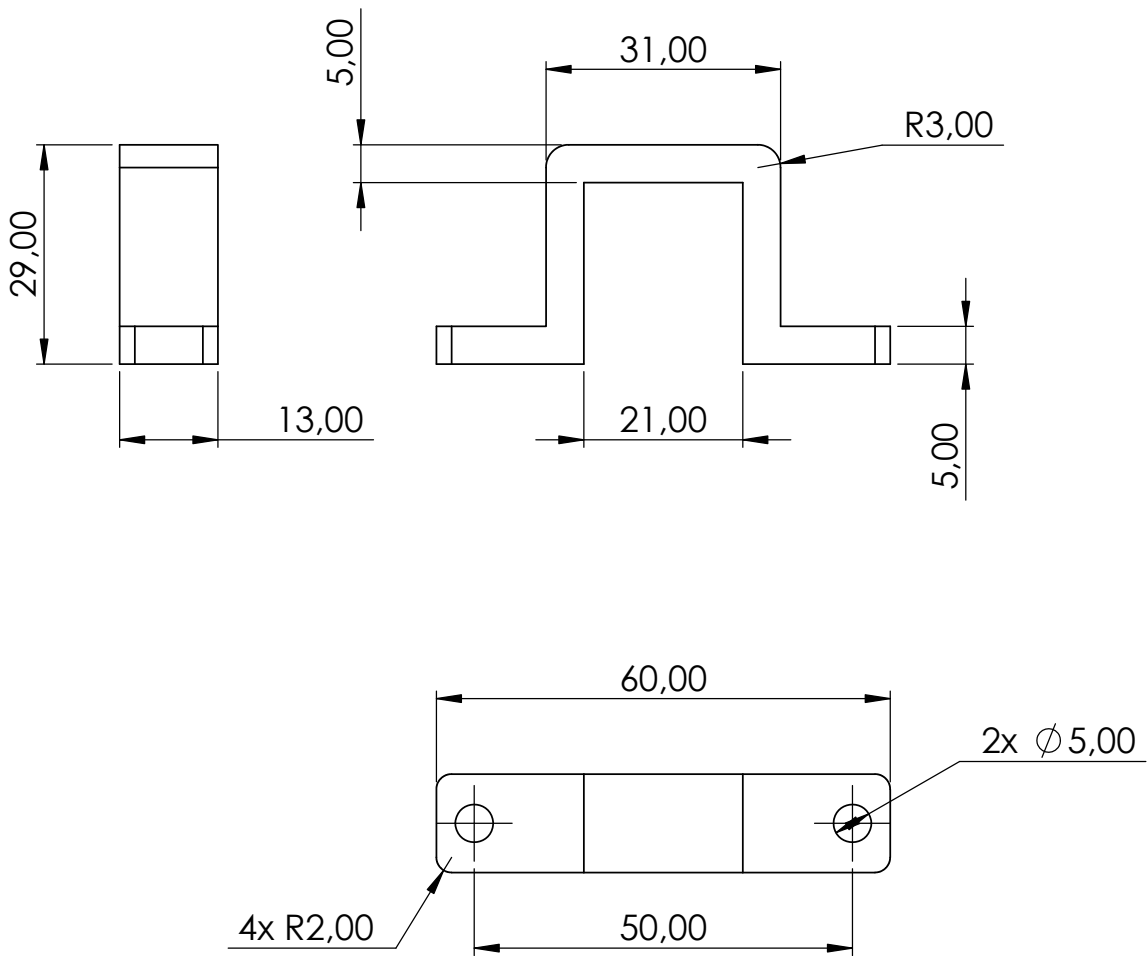


PROYECTO		DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC			ESCALA 1:1	
CODIGO		SOPORTE ENCODER Y				
MATERIAL	TOL	DISEÑO	NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22	HOJA A4	
TRATAMIENTO	GALV	DIBUJÓ	NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22		
RECUBRIMIENTO	ZINC G40	REVISÓ	ING. COSME MEJÍA			
CANTIDAD	1	APROBÓ	ING. COSME MEJÍA			

FICA CIME

A

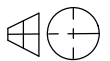
A



PROYECTO

DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC

ESCALA
1:1



CODIGO

SOPORTE SCT-013

MATERIAL

PLA

DISEÑO

NOBOA RIVERA JASON ADEL

29-08-22

HOJA

TRATAMIENTO

-

DIBUJÓ

NOBOA RIVERA JASON ADEL

29-08-22

A4

FICA

CIME

RECUBRIMIENTO

-

REVISÓ

ING. COSME MEJÍA

CANTIDAD

1

APROBÓ

ING. COSME MEJÍA

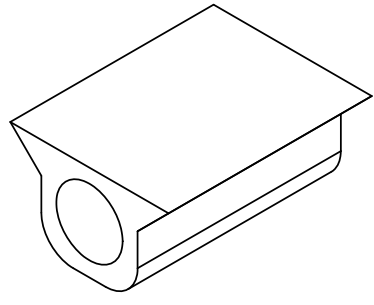
4 3 2 1

F

F

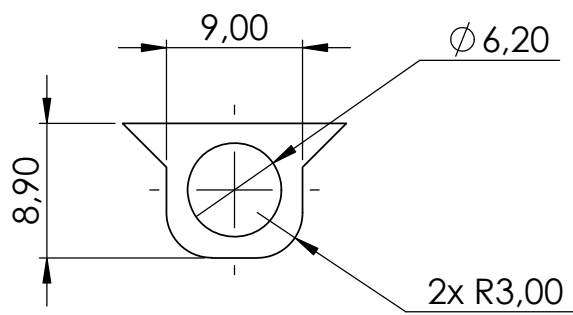
E

E



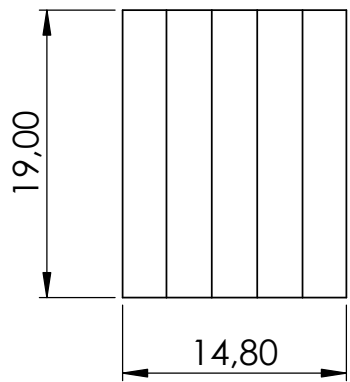
D

D



C

C



B

B

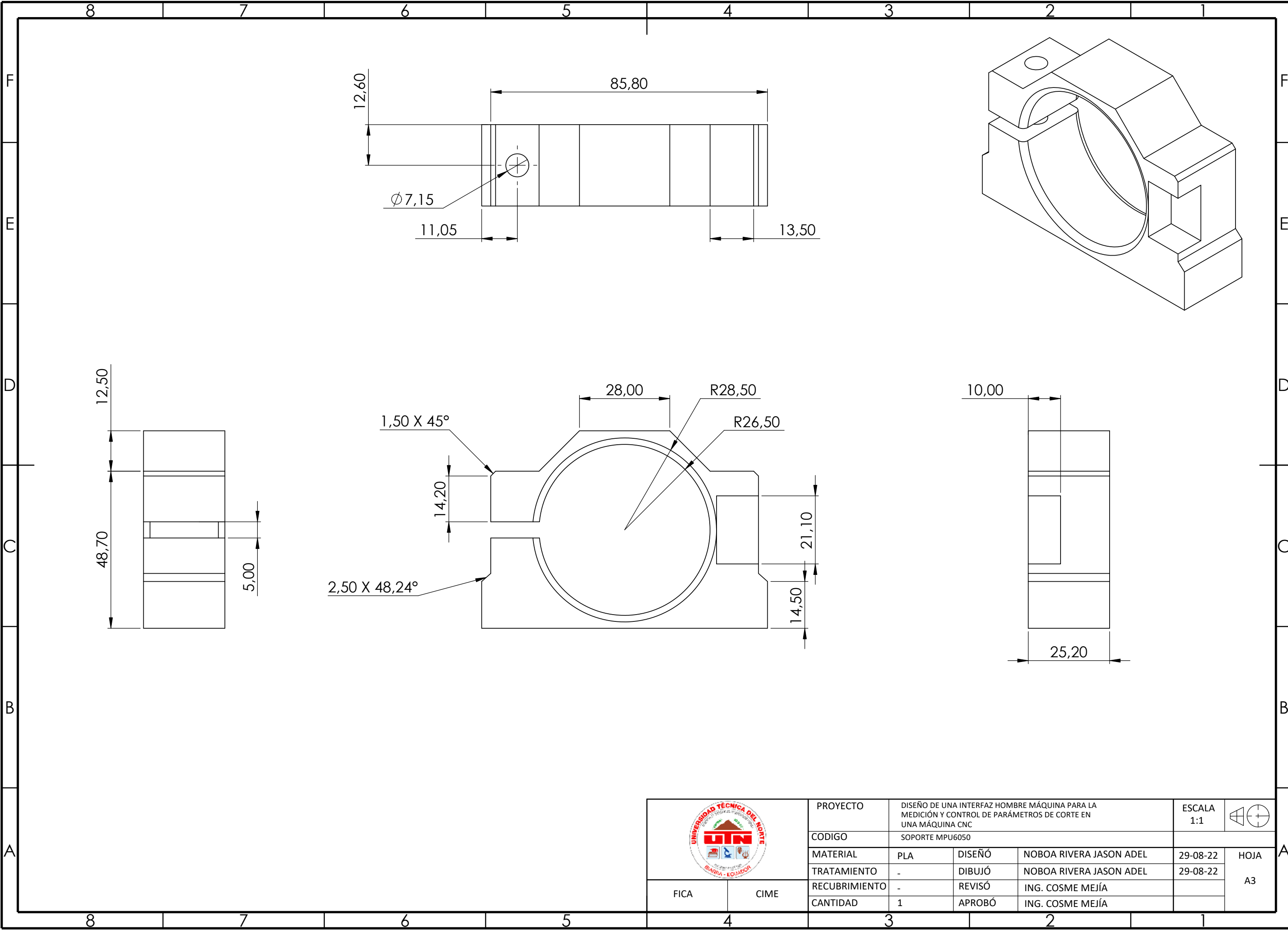
A


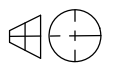
A

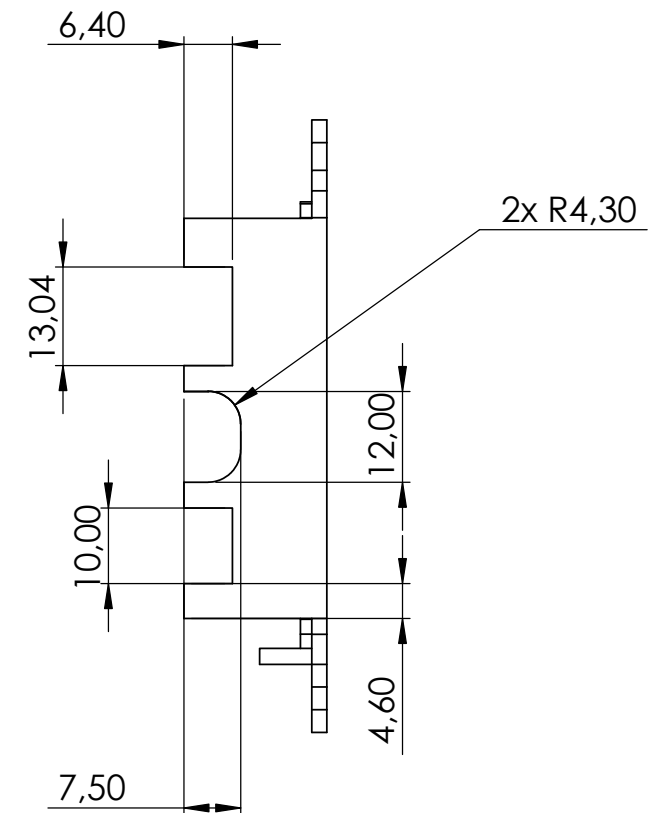
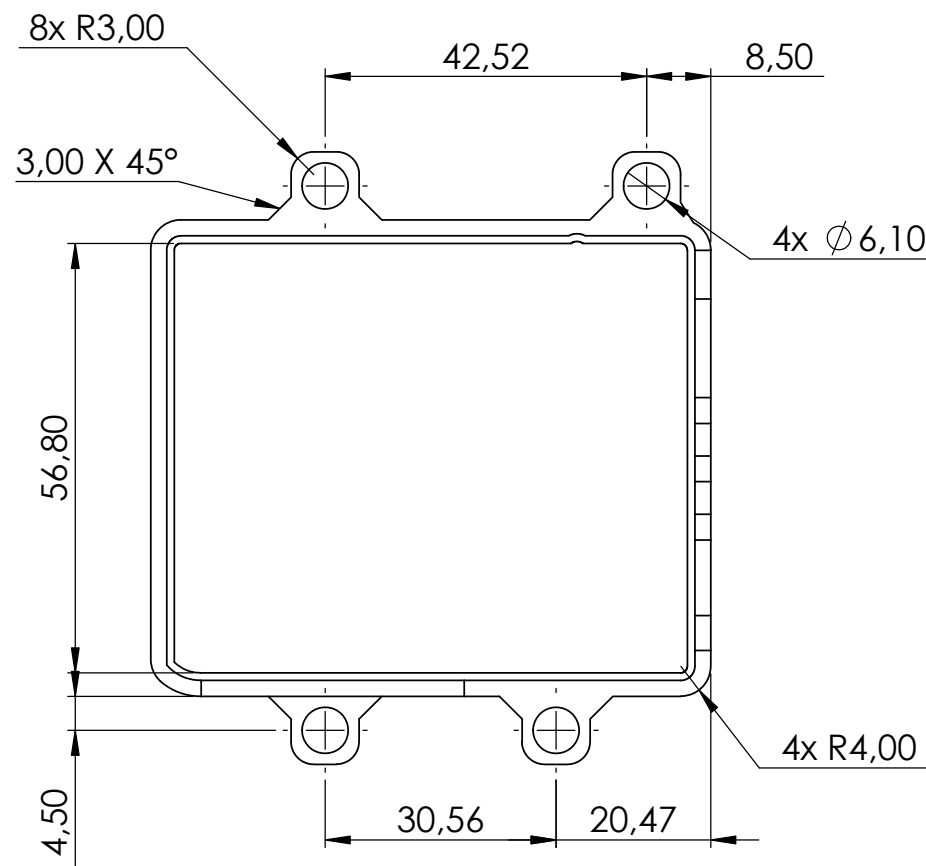
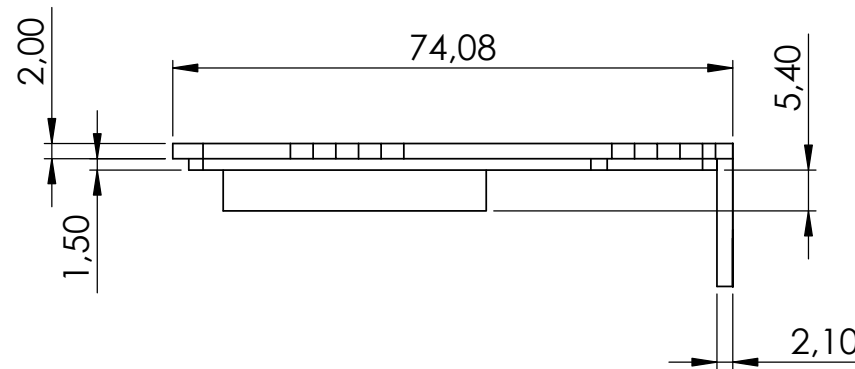
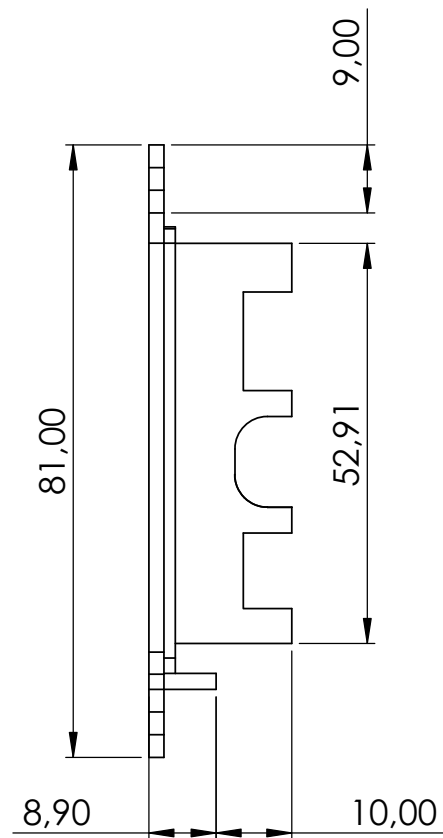


PROYECTO DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC		ESCALA			
		2:1			
CODIGO		COLUMNA			
MATERIAL	PLA	DISEÑO	NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22	HOJA A4
TRATAMIENTO	-	DIBUJÓ	NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22	
RECUBRIMIENTO	-	REVISÓ	ING. COSME MEJÍA		
CANTIDAD	4	APROBÓ	ING. COSME MEJÍA		

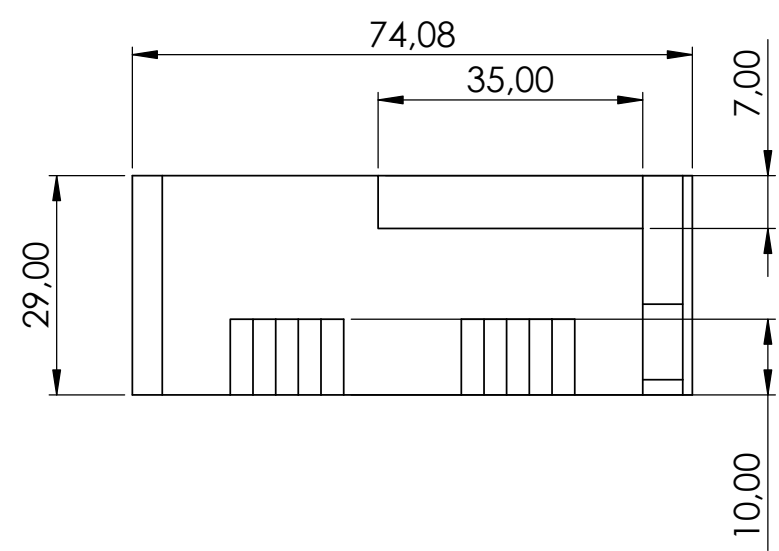
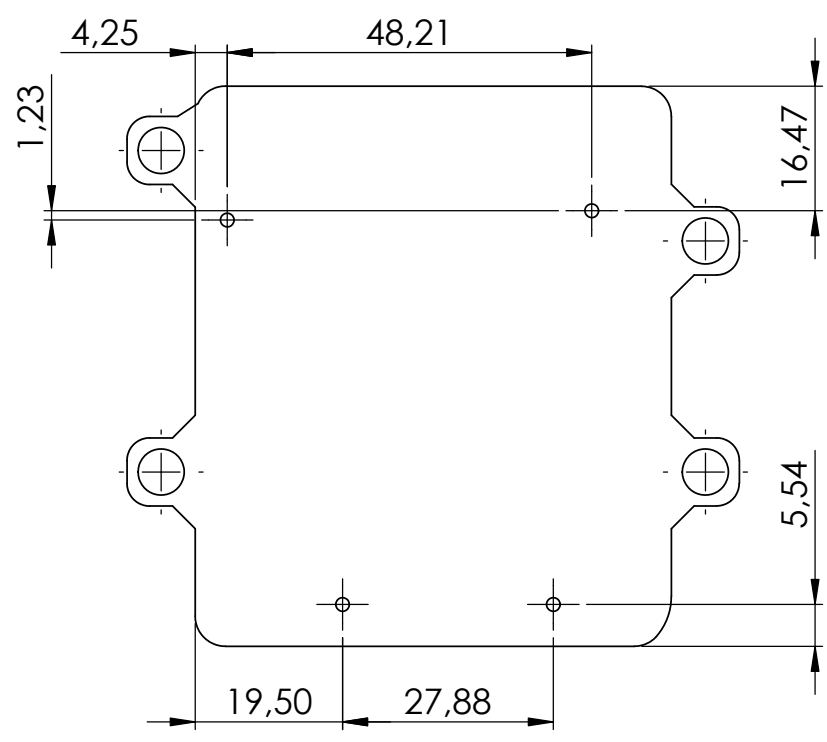
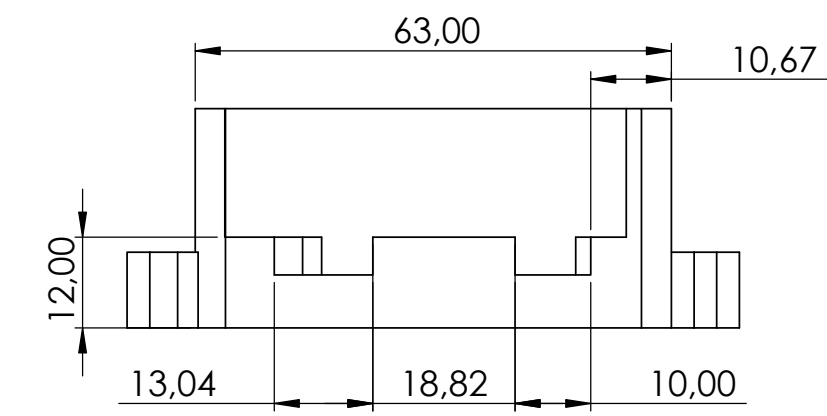
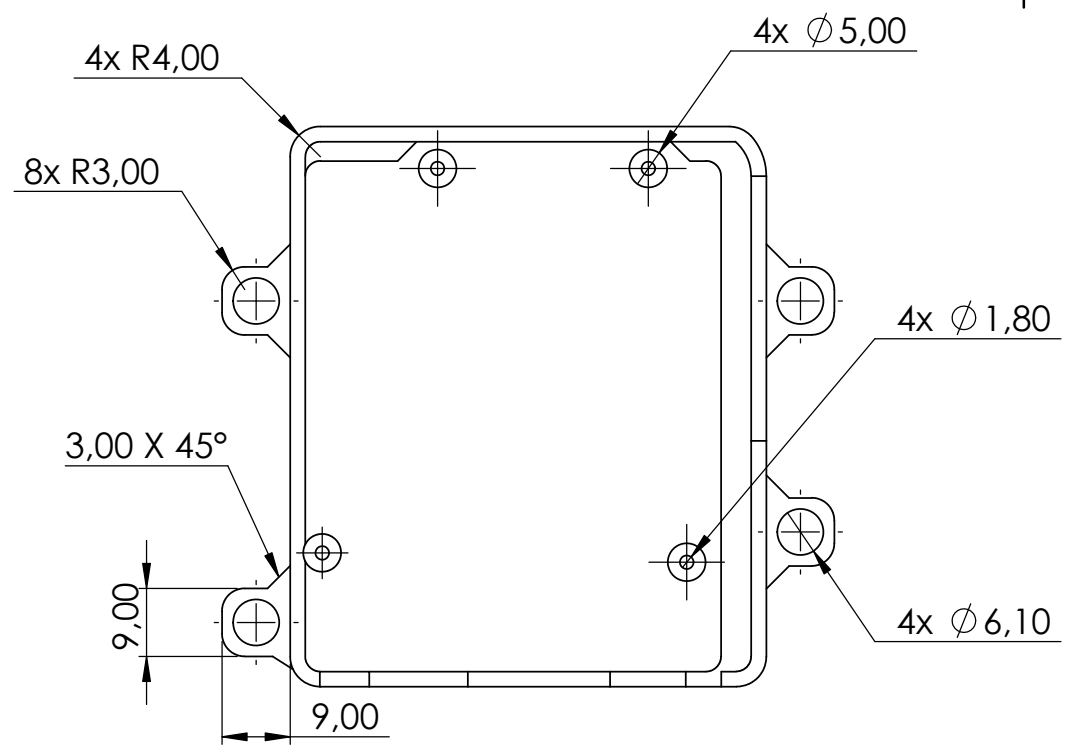
4 3 2 1



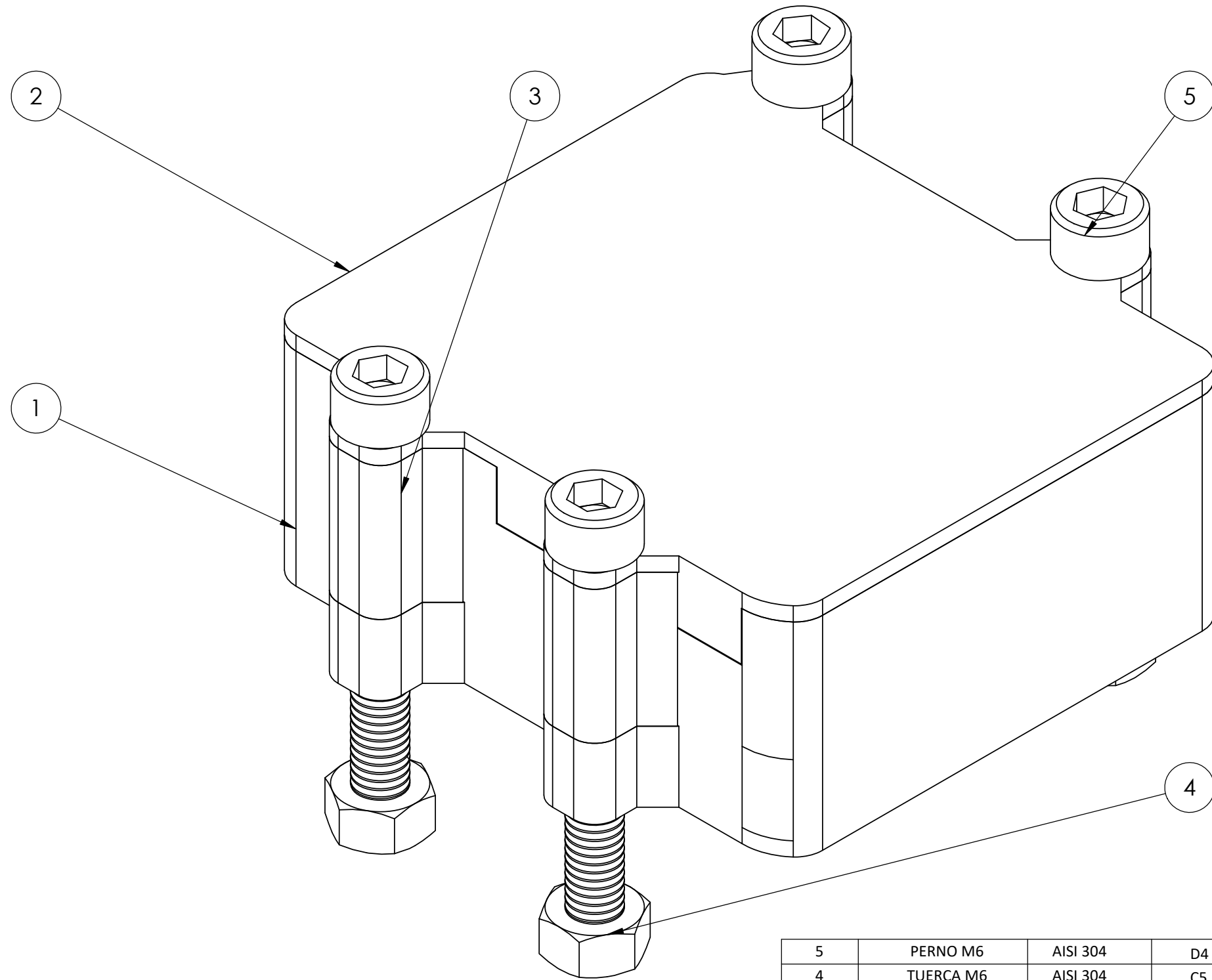
	PROYECTO DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC			ESCALA 1:1	
	CODIGO SOPORTE MPU6050				
	MATERIAL PLA	DISEÑO NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22	HOJA A3	
	TRATAMIENTO -	DIBUJÓ NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22		
	RECUBRIMIENTO -	REVISÓ ING. COSME MEJÍA			
CANTIDAD 1	APROBÓ ING. COSME MEJÍA				
FICA	CIME				



	PROYECTO DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC			ESCALA 1:1	
	CODIGO TAPA ARDUINO				
FICA CIME	MATERIAL PLA	DISEÑO NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22	HOJA A3	
	TRATAMIENTO -	DIBUJÓ NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22		
	RECUBRIMIENTO -	REVISÓ ING. COSME MEJÍA			
	CANTIDAD 1	APROBÓ ING. COSME MEJÍA			



	PROYECTO DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC			ESCALA 1:1	
	CODIGO BASE ARDUINO				
	MATERIAL PLA	DISEÑO NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22	HOJA A3	
	TRATAMIENTO -	DIBUJÓ NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22		
	RECUBRIMIENTO -	REVISÓ ING. COSME MEJÍA			
CANTIDAD 1	APROBÓ ING. COSME MEJÍA				
FICA	CIME				



5	PERNO M6	AISI 304	D4	4	PERNO M6	M6X50mm
4	TUERCA M6	AISI 304	C5	4	TUERCA M6	
3	COLUMNA	PLA	D6	4	COLUMNA	
2	TAPA ARDUINO	PLA	D5	1	TAPA ARDUINO	
1	BASE ARDUINO	PLA	D5	1	BASE ARDUINO	
N° DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	MATERIAL	ZONA	CANTIDAD	CODIGO	OBSERVACIONES
	PROYECTO	DISEÑO DE UNA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DE CORTE EN UNA MÁQUINA CNC			ESCALA 2:1 	
	CODIGO	CARCASA				
	PESO	111 gr	DISEÑO	NOBOA RIVERA JASON ADEL	29-08-22	HOJA A3
	LARGO	81 mm	DIBUJÓ	NOBOA RIVER JASON ADEL	29-08-22	
	FICA	CIME	ANCHO	74.08 mm	REVISÓ	ING. COSME MEJÍA
		ALTO	56 mm	APROBÓ	ING. COSME MEJÍA	

6.7. Anexo 7: Hojas de datos

0.333V Split core current transformer



model: SCT013

Characteristics:

Split core, 0.333V output, Built-in with sampling resistance, leading wire 1 metre, standardΦ3.5 three core plug output, (Patent no.: ZL 2015 3 0060067.X)



Technical index:

- Suspended mounting, output with cable
- Operation temperature: $-25^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$
- Storage temperature: $-30^{\circ}\text{C} \sim +90^{\circ}\text{C}$
- work voltage: $\leq 660\text{V}$
- Work frequency: 50Hz-1KHz
- Dielectric strength: 3.5KV 50Hz 1min

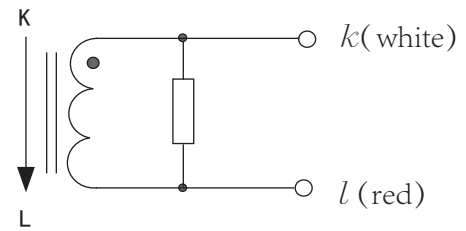
Technical Parameters table:

Rated Input(Effective value)	10 20 30 50 80 100 A
measurement range	20%~120% A
Rated output	0.333 V
Auaccuracy	1 %
Linearity	1 %
frequency	50~1K Hz
weight	50 g

Order Format: **model** **Input** **output** **Auaccuracy**
 SCT013/xxA/0.333V/1%

Noted: The rated current $\leq 100\text{A}$ are the standard product

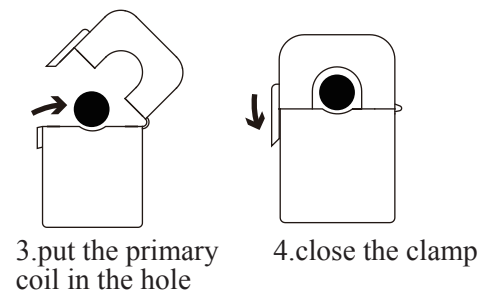
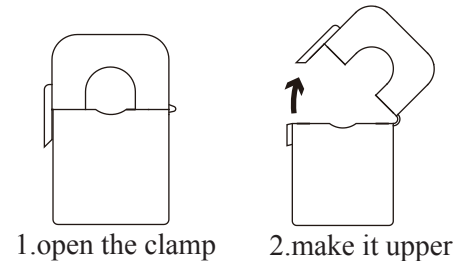
Wiring schematic:



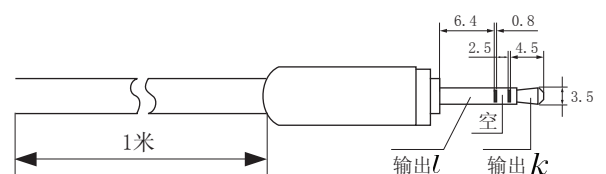
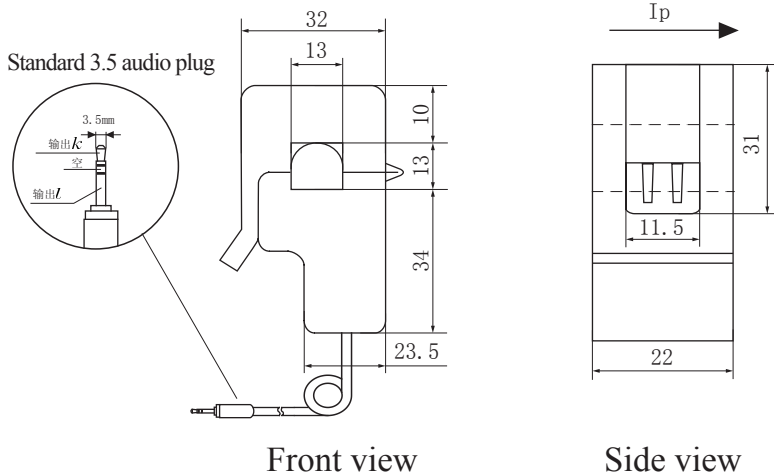
Voltage output type : Built-in with sampling resistance
 Voltage output type : not allowed secondary short circuit.
 When the plug without audio frequency, the white line is the end of the same name

Installation Diagram

Primary coil through hole method



Outline size: (in:mm):



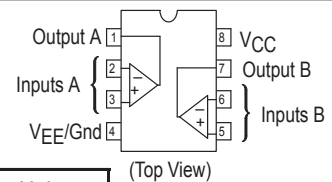
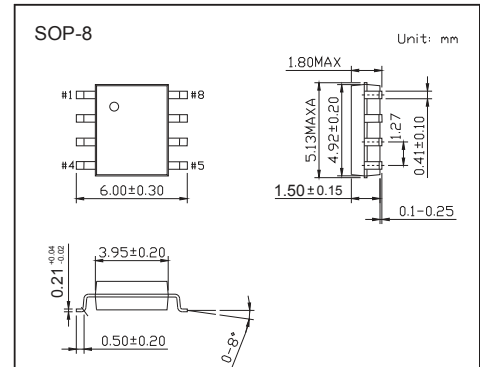
Standard three core plug schematic diagram

Single Supply Dual Operational Amplifiers

LM358 (KM358)

Features

- Short Circuit Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V
- Low Input Bias Currents
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Single and Split Supply Operation



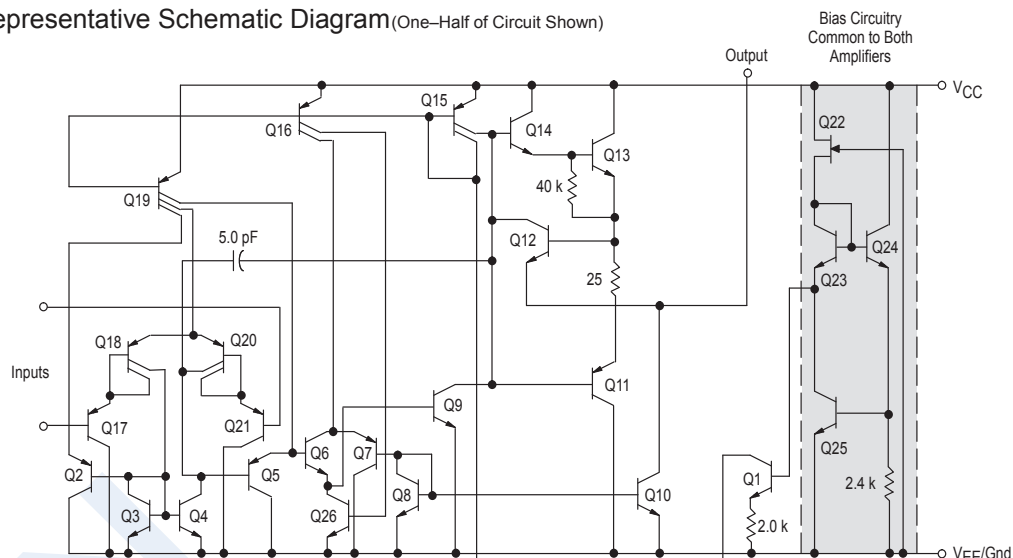
Absolute Maximum Ratings $T_a = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Power Supply Voltages			
Single Supply	V_{CC}	32	Vdc
Split Supplies	V_{CC}, V_{EE}	± 16	
Input Differential Voltage Range *1	V_{IDR}	± 32	Vdc
Input Common Mode Voltage Range *2	V_{ICR}	-0.3 to 32	Vdc
Output Short Circuit Duration	tsc	Continuous	
Junction Temperature	T_J	150	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction-to-Air	$R_{\theta JA}$	238	$^\circ\text{C/W}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +125	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to +70	$^\circ\text{C}$

*1 Split Power Supplies.

*2 For supply voltages less than 32 V the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Representative Schematic Diagram (One-Half of Circuit Shown)



LM358 (KM358)

■ Electrical Characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$ ($V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $V_{EE} = \text{Gnd}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Test conditions	Min	Typ	Max	Unit
Input Offset Voltage	V_{IO}	$V_{CC} = 5.0\text{ V}$ to 30 V , $V_{IC} = 0\text{ V}$ to $V_{CC} - 1.7\text{ V}$ $V_O \approx 1.4\text{ V}$, $R_S = 0\Omega$ $T_A = 25^\circ\text{C}$		2.0	7.0	mV
		$T_A = T_{High} *5$			9.0	
		$T_A = T_{Low} *5$			9.0	
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	$T_A = T_{High}$ to $T_{Low} *5$		7.0		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current	I_{IO}	$T_A = T_{High}$ to $T_{Low} *5$		5.0	50	nA
					150	
Input Bias Current	I_{IB}	$T_A = T_{High}$ to $T_{Low} *5$		-45	-250	nA
					-50	
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	$T_A = T_{High}$ to $T_{Low} *5$		10		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Common Mode Voltage Range *6	V_{ICR}	$V_{CC} = 30\text{ V}$	0		28.3	V
		$V_{CC} = 30\text{ V}$, $T_A = T_{High}$ to T_{Low}	0		28	
Differential Input Voltage Range	V_{IDR}				V_{CC}	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain	A_{VOL}	$R_L = 2.0\text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 15\text{ V}$, For Large V_O Swing, $T_A = T_{High}$ to T_{Low}	25	100		V/mV
			15			
Channel Separation	C_S	$1.0\text{ kHz} \leq f \leq 20\text{ kHz}$, Input Referenced		-120		dB
Common Mode Rejection	CMR	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	65	70		dB
Power Supply Rejection	PSR		65	100		dB
Output Voltage-High Limit	V_{OH}	$T_A = T_{High}$ to $T_{Low} *5$ $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{CC} = 30\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ $V_{CC} = 30\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$	3.3	3.5		V
			26			
			27	28		
Output Voltage-Low Limit	V_{OL}	$V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$ $T_A = T_{High}$ to $T_{Low} *5$		5	20	mV
Output Source Current	I_{O+}	$V_{ID} = +1.0\text{ V}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$	20	40		mA
Output Sink Current	I_{O-}	$V_{ID} = -1.0\text{ V}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$	10	20		mA
		$V_{ID} = -1.0\text{ V}$, $V_O = 200\text{ mV}$	12	50		μA
Output Short Circuit to Ground *7	I_{SC}			40	60	mA
Power Supply Current (Total Device)	I_{CC}	$T_A = T_{High}$ to $T_{Low} *5$ $V_{CC} = 30\text{ V}$, $V_O = 0\text{ V}$, $R_L = \infty$ $V_{CC} = 5\text{ V}$, $V_O = 0\text{ V}$, $R_L = \infty$		1.5	3.0	mA
				0.7	1.2	

*5 $T_{Low} = 0^\circ\text{C}$, $T_{High} = +70^\circ\text{C}$ *6 The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is $V_{CC} - 1.7\text{ V}$.

*7 Short circuits from the output to VCC can cause excessive heating and eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

■ Marking

Marking	LM358
---------	-------

LM358 (KM358)

Typical Characteristics

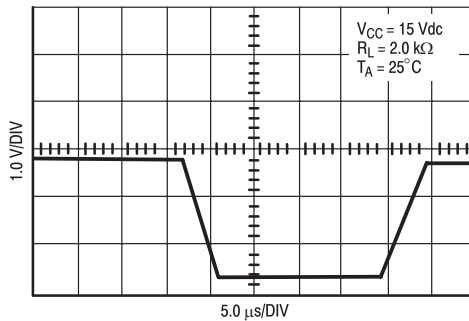


Figure 1. Large Signal Voltage Follower Response

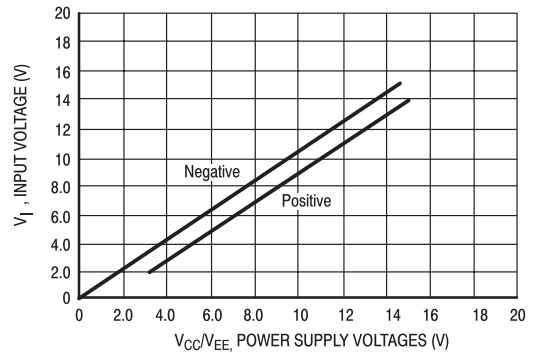


Figure 2. Input Voltage Range

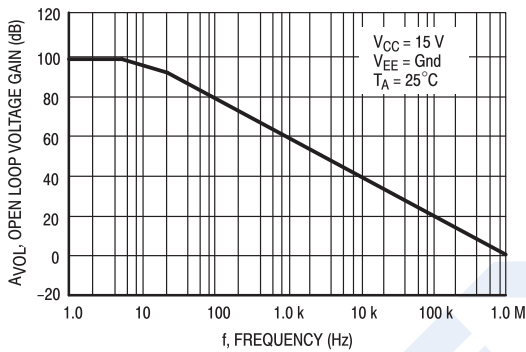


Figure 3. Large-Signal Open Loop Voltage Gain

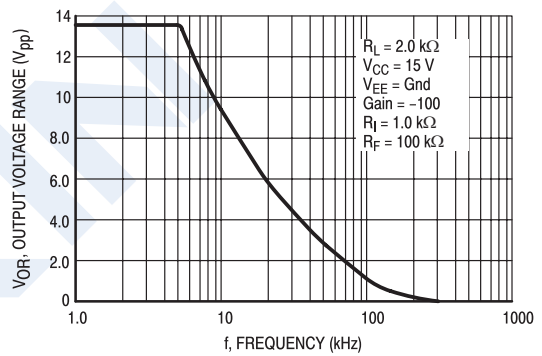


Figure 4. Large-Signal Frequency Response

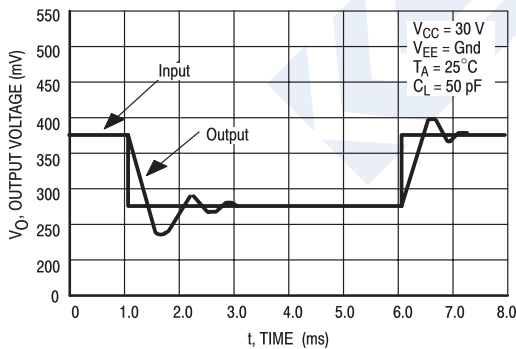


Figure 5. Small Signal Voltage Follower Pulse Response (Noninverting)

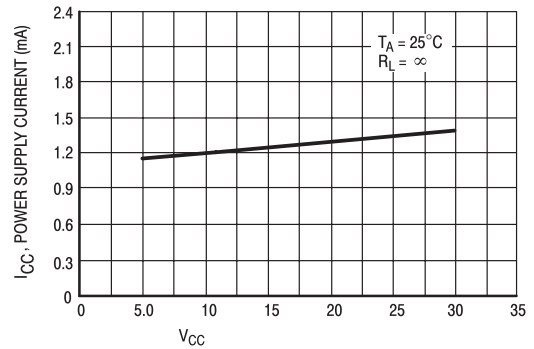


Figure 6. Power Supply Current versus Power Supply Voltage

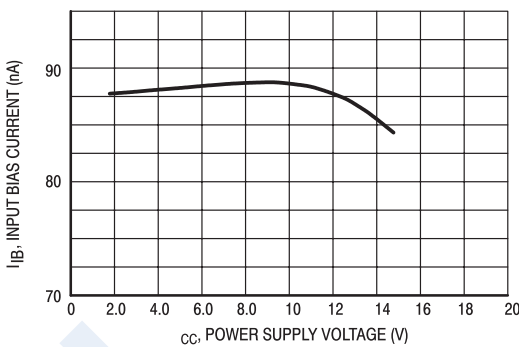


Figure 7. Input Bias Current versus Supply Voltage



InvenSense Inc.

1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A.
Tel: +1 (408) 988-7339 Fax: +1 (408) 988-8104
Website: www.invensense.com

Document Number: PS-MPU-6000A-00
Revision: 3.4
Release Date: 08/19/2013

MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4



CONTENTS

1	REVISION HISTORY	5
2	PURPOSE AND SCOPE	6
3	PRODUCT OVERVIEW	7
3.1	MPU-60X0 OVERVIEW	7
4	APPLICATIONS.....	9
5	FEATURES	10
5.1	GYROSCOPE FEATURES.....	10
5.2	ACCELEROMETER FEATURES	10
5.3	ADDITIONAL FEATURES	10
5.4	MOTIONPROCESSING.....	11
5.5	CLOCKING	11
6	ELECTRICAL CHARACTERISTICS	12
6.1	GYROSCOPE SPECIFICATIONS	12
6.2	ACCELEROMETER SPECIFICATIONS.....	13
6.3	ELECTRICAL AND OTHER COMMON SPECIFICATIONS.....	14
6.4	ELECTRICAL SPECIFICATIONS, CONTINUED	15
6.5	ELECTRICAL SPECIFICATIONS, CONTINUED	16
6.6	ELECTRICAL SPECIFICATIONS, CONTINUED	17
6.7	I ² C TIMING CHARACTERIZATION.....	18
6.8	SPI TIMING CHARACTERIZATION (MPU-6000 ONLY)	19
6.9	ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS	20
7	APPLICATIONS INFORMATION	21
7.1	PIN OUT AND SIGNAL DESCRIPTION.....	21
7.2	TYPICAL OPERATING CIRCUIT.....	22
7.3	BILL OF MATERIALS FOR EXTERNAL COMPONENTS	22
7.4	RECOMMENDED POWER-ON PROCEDURE	23
7.5	BLOCK DIAGRAM	24
7.6	OVERVIEW	24
7.7	THREE-AXIS MEMS GYROSCOPE WITH 16-BIT ADCS AND SIGNAL CONDITIONING.....	25
7.8	THREE-AXIS MEMS ACCELEROMETER WITH 16-BIT ADCS AND SIGNAL CONDITIONING	25
7.9	DIGITAL MOTION PROCESSOR	25
7.10	PRIMARY I ² C AND SPI SERIAL COMMUNICATIONS INTERFACES	25
7.11	AUXILIARY I ² C SERIAL INTERFACE	26



- 7.12 SELF-TEST27
- 7.13 MPU-60X0 SOLUTION FOR 9-AXIS SENSOR FUSION USING I²C INTERFACE28
- 7.14 MPU-6000 USING SPI INTERFACE29
- 7.15 INTERNAL CLOCK GENERATION30
- 7.16 SENSOR DATA REGISTERS30
- 7.17 FIFO30
- 7.18 INTERRUPTS30
- 7.19 DIGITAL-OUTPUT TEMPERATURE SENSOR31
- 7.20 BIAS AND LDO31
- 7.21 CHARGE PUMP31
- 8 PROGRAMMABLE INTERRUPTS.....32**
- 9 DIGITAL INTERFACE33**
 - 9.1 I²C AND SPI (MPU-6000 ONLY) SERIAL INTERFACES33
 - 9.2 I²C INTERFACE33
 - 9.3 I²C COMMUNICATIONS PROTOCOL.....33
 - 9.4 I²C TERMS36
 - 9.5 SPI INTERFACE (MPU-6000 ONLY)37
- 10 SERIAL INTERFACE CONSIDERATIONS (MPU-6050)38**
 - 10.1 MPU-6050 SUPPORTED INTERFACES.....38
 - 10.2 LOGIC LEVELS38
 - 10.3 LOGIC LEVELS DIAGRAM FOR AUX_VDDIO = 0.....39
- 11 ASSEMBLY40**
 - 11.1 ORIENTATION OF AXES40
 - 11.2 PACKAGE DIMENSIONS41
 - 11.3 PCB DESIGN GUIDELINES42
 - 11.4 ASSEMBLY PRECAUTIONS43
 - 11.5 STORAGE SPECIFICATIONS.....46
 - 11.6 PACKAGE MARKING SPECIFICATION.....46
 - 11.7 TAPE & REEL SPECIFICATION47
 - 11.8 LABEL48
 - 11.9 PACKAGING.....49
 - 11.10 REPRESENTATIVE SHIPPING CARTON LABEL.....50
- 12 RELIABILITY51**
 - 12.1 QUALIFICATION TEST POLICY51



12.2 QUALIFICATION TEST PLAN51
13 ENVIRONMENTAL COMPLIANCE.....52



1 Revision History

Revision Date	Revision	Description
11/24/2010	1.0	Initial Release
05/19/2011	2.0	For Rev C parts. Clarified wording in sections (3.2, 5.1, 5.2, 6.1-6.4, 6.6, 6.9, 7, 7.1-7.6, 7.11, 7.12, 7.14, 8, 8.2-8.4, 10.3, 10.4, 11, 12.2)
07/28/2011	2.1	Edited supply current numbers for different modes (section 6.4)
08/05/2011	2.2	Unit of measure for accelerometer sensitivity changed from LSB/mg to LSB/g
10/12/2011	2.3	Updated accelerometer self test specifications in Table 6.2. Updated package dimensions (section 11.2). Updated PCB design guidelines (section 11.3)
10/18/2011	3.0	For Rev D parts. Updated accelerometer specifications in Table 6.2. Updated accelerometer specification note (sections 8.2, 8.3, & 8.4). Updated qualification test plan (section 12.2).
10/24/2011	3.1	Edits for clarity Changed operating voltage range to 2.375V-3.46V Added accelerometer Intelligence Function increment value of 1mg/LSB (Section 6.2) Updated absolute maximum rating for acceleration (any axis, unpowered) from 0.3ms to 0.2ms (Section 6.9) Modified absolute maximum rating for Latch-up to Level A and $\pm 100\text{mA}$ (Section 6.9, 12.2)
11/16/2011	3.2	Updated self-test response specifications for Revision D parts dated with date code 1147 (YYWW) or later. Edits for clarity Added Gyro self-test (sections 5.1, 6.1, 7.6, 7.12) Added Min/Max limits to Accel self-test response (section 6.2) Updated Accelerometer low power mode operating currents (Section 6.3) Added gyro self test to block diagram (section 7.5) Updated packaging labels and descriptions (sections 11.8 & 11.9)
5/16/2012	3.3	Updated Gyro and Accelerometer self test information (sections 6.1, 6.2, 7.12) Updated latch-up information (Section 6.9) Updated programmable interrupts information (Section 8) Changed shipment information from maximum of 3 reels (15K units) per shipper box to 5 reels (25K units) per shipper box (Section 11.7) Updated packing shipping and label information (Sections 11.8, 11.9) Updated reliability references (Section 12.2)
8/19/2013	3.4	Updates section 4



2 Purpose and Scope

This product specification provides advanced information regarding the electrical specification and design related information for the MPU-6000™ and MPU-6050™ MotionTracking™ devices, collectively called the MPU-60X0™ or MPU™.

Electrical characteristics are based upon design analysis and simulation results only. Specifications are subject to change without notice. Final specifications will be updated based upon characterization of production silicon. For references to register map and descriptions of individual registers, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document.

The self-test response specifications provided in this document pertain to Revision D parts with date codes of 1147 (YYWW) or later. Please see Section 11.6 for package marking description details.

3 Product Overview

3.1 MPU-60X0 Overview

MotionInterface™ is becoming a “must-have” function being adopted by smartphone and tablet manufacturers due to the enormous value it adds to the end user experience. In smartphones, it finds use in applications such as gesture commands for applications and phone control, enhanced gaming, augmented reality, panoramic photo capture and viewing, and pedestrian and vehicle navigation. With its ability to precisely and accurately track user motions, MotionTracking technology can convert handsets and tablets into powerful 3D intelligent devices that can be used in applications ranging from health and fitness monitoring to location-based services. Key requirements for MotionInterface enabled devices are small package size, low power consumption, high accuracy and repeatability, high shock tolerance, and application specific performance programmability – all at a low consumer price point.

The MPU-60X0 is the world’s first integrated 6-axis MotionTracking device that combines a 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, and a Digital Motion Processor™ (DMP) all in a small 4x4x0.9mm package. With its dedicated I²C sensor bus, it directly accepts inputs from an external 3-axis compass to provide a complete 9-axis MotionFusion™ output. The MPU-60X0 MotionTracking device, with its 6-axis integration, on-board MotionFusion™, and run-time calibration firmware, enables manufacturers to eliminate the costly and complex selection, qualification, and system level integration of discrete devices, guaranteeing optimal motion performance for consumers. The MPU-60X0 is also designed to interface with multiple non-inertial digital sensors, such as pressure sensors, on its auxiliary I²C port. The MPU-60X0 is footprint compatible with the MPU-30X0 family.

The MPU-60X0 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyroscope outputs and three 16-bit ADCs for digitizing the accelerometer outputs. For precision tracking of both fast and slow motions, the parts feature a user-programmable gyroscope full-scale range of ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ (dps) and a user-programmable accelerometer full-scale range of $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, and $\pm 16g$.

An on-chip 1024 Byte FIFO buffer helps lower system power consumption by allowing the system processor to read the sensor data in bursts and then enter a low-power mode as the MPU collects more data. With all the necessary on-chip processing and sensor components required to support many motion-based use cases, the MPU-60X0 uniquely enables low-power MotionInterface applications in portable applications with reduced processing requirements for the system processor. By providing an integrated MotionFusion output, the DMP in the MPU-60X0 offloads the intensive MotionProcessing computation requirements from the system processor, minimizing the need for frequent polling of the motion sensor output.

Communication with all registers of the device is performed using either I²C at 400kHz or SPI at 1MHz (MPU-6000 only). For applications requiring faster communications, the sensor and interrupt registers may be read using SPI at 20MHz (MPU-6000 only). Additional features include an embedded temperature sensor and an on-chip oscillator with $\pm 1\%$ variation over the operating temperature range.

By leveraging its patented and volume-proven Nasiri-Fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the MPU-60X0 package size down to a revolutionary footprint of 4x4x0.9mm (QFN), while providing the highest performance, lowest noise, and the lowest cost semiconductor packaging required for handheld consumer electronic devices. The part features a robust 10,000g shock tolerance, and has programmable low-pass filters for the gyroscopes, accelerometers, and the on-chip temperature sensor.

For power supply flexibility, the MPU-60X0 operates from VDD power supply voltage range of 2.375V-3.46V. Additionally, the MPU-6050 provides a VLOGIC reference pin (in addition to its analog supply pin: VDD), which sets the logic levels of its I²C interface. The VLOGIC voltage may be $1.8V \pm 5\%$ or VDD.

The MPU-6000 and MPU-6050 are identical, except that the MPU-6050 supports the I²C serial interface only, and has a separate VLOGIC reference pin. The MPU-6000 supports both I²C and SPI interfaces and has a single supply pin, VDD, which is both the device’s logic reference supply and the analog supply for the part. The table below outlines these differences:

**MPU-6000/MPU-6050 Product Specification**Document Number: PS-MPU-6000A-00
Revision: 3.4
Release Date: 08/19/2013**Primary Differences between MPU-6000 and MPU-6050**

Part / Item	MPU-6000	MPU-6050
VDD	2.375V-3.46V	2.375V-3.46V
VLOGIC	n/a	1.71V to VDD
Serial Interfaces Supported	I ² C, SPI	I ² C
Pin 8	/CS	VLOGIC
Pin 9	AD0/SDO	AD0
Pin 23	SCL/SCLK	SCL
Pin 24	SDA/SDI	SDA



4 Applications

- *BlurFree*[™] technology (for Video/Still Image Stabilization)
- *AirSign*[™] technology (for Security/Authentication)
- *TouchAnywhere*[™] technology (for “no touch” UI Application Control/Navigation)
- *MotionCommand*[™] technology (for Gesture Short-cuts)
- Motion-enabled game and application framework
- InstantGesture[™] iG[™] gesture recognition
- Location based services, points of interest, and dead reckoning
- Handset and portable gaming
- Motion-based game controllers
- 3D remote controls for Internet connected DTVs and set top boxes, 3D mice
- Wearable sensors for health, fitness and sports
- Toys

5 Features

5.1 Gyroscope Features

The triple-axis MEMS gyroscope in the MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyroscopes) with a user-programmable full-scale range of ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$
- External sync signal connected to the FSYNC pin supports image, video and GPS synchronization
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of gyros
- Enhanced bias and sensitivity temperature stability reduces the need for user calibration
- Improved low-frequency noise performance
- Digitally-programmable low-pass filter
- Gyroscope operating current: 3.6mA
- Standby current: 5 μ A
- Factory calibrated sensitivity scale factor
- User self-test

5.2 Accelerometer Features

The triple-axis MEMS accelerometer in MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output triple-axis accelerometer with a programmable full scale range of $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ and $\pm 16g$
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of accelerometers while requiring no external multiplexer
- Accelerometer normal operating current: 500 μ A
- Low power accelerometer mode current: 10 μ A at 1.25Hz, 20 μ A at 5Hz, 60 μ A at 20Hz, 110 μ A at 40Hz
- Orientation detection and signaling
- Tap detection
- User-programmable interrupts
- High-G interrupt
- User self-test

5.3 Additional Features

The MPU-60X0 includes the following additional features:

- 9-Axis MotionFusion by the on-chip Digital Motion Processor (DMP)
- Auxiliary master I²C bus for reading data from external sensors (e.g., magnetometer)
- 3.9mA operating current when all 6 motion sensing axes and the DMP are enabled
- VDD supply voltage range of 2.375V-3.46V
- Flexible VLOGIC reference voltage supports multiple I²C interface voltages (MPU-6050 only)
- Smallest and thinnest QFN package for portable devices: 4x4x0.9mm
- Minimal cross-axis sensitivity between the accelerometer and gyroscope axes
- 1024 byte FIFO buffer reduces power consumption by allowing host processor to read the data in bursts and then go into a low-power mode as the MPU collects more data
- Digital-output temperature sensor
- User-programmable digital filters for gyroscope, accelerometer, and temp sensor
- 10,000 g shock tolerant
- 400kHz Fast Mode I²C for communicating with all registers
- 1MHz SPI serial interface for communicating with all registers (MPU-6000 only)
- 20MHz SPI serial interface for reading sensor and interrupt registers (MPU-6000 only)



- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant

5.4 MotionProcessing

- Internal Digital Motion Processing™ (DMP™) engine supports 3D MotionProcessing and gesture recognition algorithms
- The MPU-60X0 collects gyroscope and accelerometer data while synchronizing data sampling at a user defined rate. The total dataset obtained by the MPU-60X0 includes 3-Axis gyroscope data, 3-Axis accelerometer data, and temperature data. The MPU's calculated output to the system processor can also include heading data from a digital 3-axis third party magnetometer.
- The FIFO buffers the complete data set, reducing timing requirements on the system processor by allowing the processor burst read the FIFO data. After burst reading the FIFO data, the system processor can save power by entering a low-power sleep mode while the MPU collects more data.
- Programmable interrupt supports features such as gesture recognition, panning, zooming, scrolling, tap detection, and shake detection
- Digitally-programmable low-pass filters
- Low-power pedometer functionality allows the host processor to sleep while the DMP maintains the step count.

5.5 Clocking

- On-chip timing generator $\pm 1\%$ frequency variation over full temperature range
- Optional external clock inputs of 32.768kHz or 19.2MHz



6 Electrical Characteristics

6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
GYROSCOPE SENSITIVITY						
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s	
	FS_SEL=1		±500		°/s	
	FS_SEL=2		±1000		°/s	
	FS_SEL=3		±2000		°/s	
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)	
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C	-3		+3	%	
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature			±2		%	
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		0.2		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)						
Initial ZRO Tolerance	25°C		±20		°/s	
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±20		°/s	
Power-Supply Sensitivity (1-10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		°/s	
Linear Acceleration Sensitivity	Static		0.1		°/s/g	
SELF-TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	1
GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE	FS_SEL=0					
Total RMS Noise	DLPCFG=2 (100Hz)		0.05		°/s-rms	
Low-frequency RMS noise	Bandwidth 1Hz to10Hz		0.033		°/s-rms	
Rate Noise Spectral Density	At 10Hz		0.005		°/s/√Hz	
GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES						
X-Axis		30	33	36	kHz	
Y-Axis		27	30	33	kHz	
Z-Axis		24	27	30	kHz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		256	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
	Programmable	4		8,000	Hz	
GYROSCOPE START-UP TIME	DLPCFG=0					
ZRO Settling (from power-on)	to ±1°/s of Final		30		ms	

1. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*



6.2 Accelerometer Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
ZERO-G OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	1
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35			
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
SELF TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		μg/√Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		260	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT			32		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning
2. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*



6.3 Electrical and Other Common Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
TEMPERATURE SENSOR						
Range			-40 to +85		°C	
Sensitivity	Untrimmed		340		LSB/°C	
Temperature Offset	35°C		-521		LSB	
Linearity	Best fit straight line (-40°C to +85°C)		±1		°C	
VDD POWER SUPPLY						
Operating Voltages		2.375		3.46	V	
Normal Operating Current	Gyroscope + Accelerometer + DMP		3.9		mA	
	Gyroscope + Accelerometer (DMP disabled)		3.8		mA	
	Gyroscope + DMP (Accelerometer disabled)		3.7		mA	
	Gyroscope only (DMP & Accelerometer disabled)		3.6		mA	
	Accelerometer only (DMP & Gyroscope disabled)		500		µA	
Accelerometer Low Power Mode Current	1.25 Hz update rate		10		µA	
	5 Hz update rate		20		µA	
	20 Hz update rate		70		µA	
	40 Hz update rate		140		µA	
Full-Chip Idle Mode Supply Current			5		µA	
Power Supply Ramp Rate	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value			100	ms	
VLOGIC REFERENCE VOLTAGE						
Voltage Range	MPU-6050 only	1.71		VDD	V	
Power Supply Ramp Rate	VLOGIC must be ≤VDD at all times			3	ms	
Normal Operating Current	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value		100		µA	
TEMPERATURE RANGE						
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-40		+85	°C	



6.4 Electrical Specifications, Continued

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, TA = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
SERIAL INTERFACE						
SPI Operating Frequency, All Registers Read/Write	MPU-6000 only, Low Speed Characterization		100 ±10%		kHz	
	MPU-6000 only, High Speed Characterization		1 ±10%		MHz	
SPI Operating Frequency, Sensor and Interrupt Registers Read Only	MPU-6000 only		20 ±10%		MHz	
	All registers, Fast-mode			400	kHz	
I ² C Operating Frequency	All registers, Standard-mode			100	kHz	
I²C ADDRESS						
	AD0 = 0		1101000			
	AD0 = 1		1101001			
DIGITAL INPUTS (SDI/SDA, AD0, SCLK/SCL, FSYNC, /CS, CLKIN)						
V _{IH} , High Level Input Voltage	MPU-6000	0.7*VDD			V	
	MPU-6050	0.7*VLOGIC			V	
V _{IL} , Low Level Input Voltage	MPU-6000			0.3*VDD	V	
	MPU-6050			0.3*VLOGIC	V	
C _i , Input Capacitance			< 5		pF	
DIGITAL OUTPUT (SDO, INT)						
V _{OH} , High Level Output Voltage	R _{LOAD} =1MΩ; MPU-6000	0.9*VDD			V	
	R _{LOAD} =1MΩ; MPU-6050	0.9*VLOGIC			V	
V _{OL1} , LOW-Level Output Voltage	R _{LOAD} =1MΩ; MPU-6000			0.1*VDD	V	
	R _{LOAD} =1MΩ; MPU-6050			0.1*VLOGIC	V	
V _{OL,INT1} , INT Low-Level Output Voltage	OPEN=1, 0.3mA sink Current			0.1	V	
Output Leakage Current	OPEN=1		100		nA	
t _{INT} , INT Pulse Width	LATCH_INT_EN=0		50		μs	



6.5 Electrical Specifications, Continued

Typical Operating Circuit of Section 7.2, VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

Parameters	Conditions	Typical	Units	Notes
Primary I²C I/O (SCL, SDA)				
V _{IL} , LOW-Level Input Voltage	MPU-6000	-0.5 to 0.3*VDD	V	
V _{IH} , HIGH-Level Input Voltage	MPU-6000	0.7*VDD to VDD + 0.5V	V	
V _{hys} , Hysteresis	MPU-6000	0.1*VDD	V	
V _{IL} , LOW Level Input Voltage	MPU-6050	-0.5V to 0.3*VLOGIC	V	
V _{IH} , HIGH-Level Input Voltage	MPU-6050	0.7*VLOGIC to VLOGIC + 0.5V	V	
V _{hys} , Hysteresis	MPU-6050	0.1*VLOGIC	V	
V _{OL1} , LOW-Level Output Voltage	3mA sink current	0 to 0.4	V	
I _{OL} , LOW-Level Output Current	V _{OL} = 0.4V	3	mA	
	V _{OL} = 0.6V	5	mA	
Output Leakage Current		100	nA	
t _{of} , Output Fall Time from V _{IHmax} to V _{ILmax}	C _b bus capacitance in pF	20+0.1C _b to 250	ns	
C _I , Capacitance for Each I/O pin		< 10	pF	
Auxiliary I²C I/O (AUX_CL, AUX_DA)				
MPU-6050: AUX_VDDIO=0				
V _{IL} , LOW-Level Input Voltage		-0.5V to 0.3*VLOGIC	V	
V _{IH} , HIGH-Level Input Voltage		0.7*VLOGIC to VLOGIC + 0.5V	V	
V _{hys} , Hysteresis		0.1*VLOGIC	V	
V _{OL1} , LOW-Level Output Voltage	VLOGIC > 2V; 1mA sink current	0 to 0.4	V	
V _{OL3} , LOW-Level Output Voltage	VLOGIC < 2V; 1mA sink current	0 to 0.2*VLOGIC	V	
I _{OL} , LOW-Level Output Current	V _{OL} = 0.4V	1	mA	
	V _{OL} = 0.6V	1	mA	
Output Leakage Current		100	nA	
t _{of} , Output Fall Time from V _{IHmax} to V _{ILmax}	C _b bus capacitance in pF	20+0.1C _b to 250	ns	
C _I , Capacitance for Each I/O pin		< 10	pF	



6.6 Electrical Specifications, Continued

Typical Operating Circuit of Section 7.2, VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

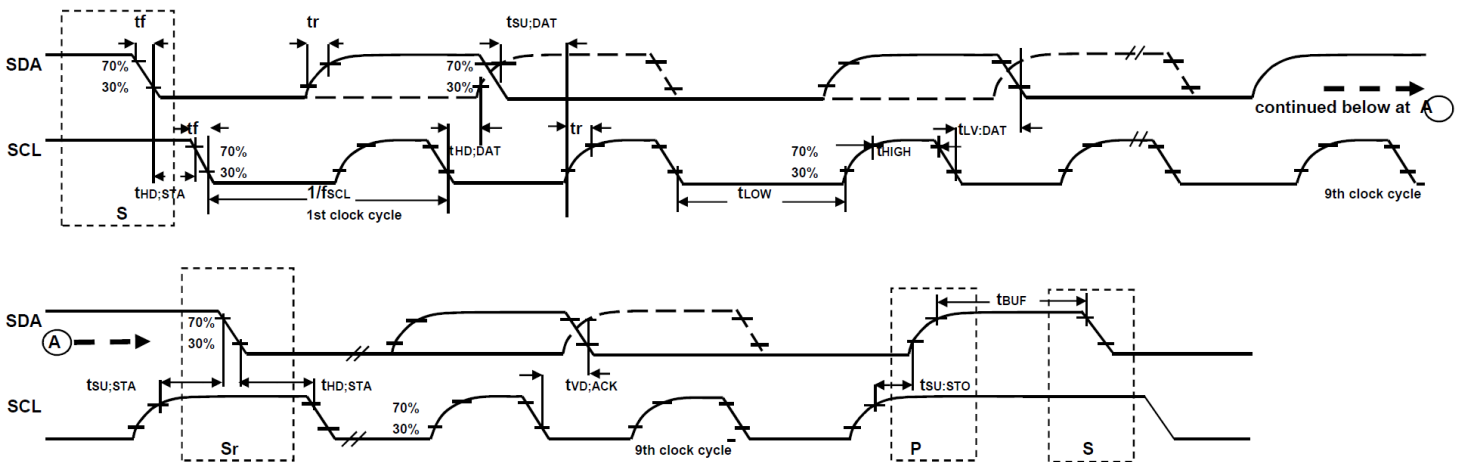
Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
INTERNAL CLOCK SOURCE	CLK_SEL=0,1,2,3					
Gyroscope Sample Rate, Fast	DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8		kHz	
Gyroscope Sample Rate, Slow	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1		kHz	
Accelerometer Sample Rate			1		kHz	
Clock Frequency Initial Tolerance	CLK_SEL=0, 25°C	-5		+5	%	
	CLK_SEL=1,2,3; 25°C	-1		+1	%	
Frequency Variation over Temperature	CLK_SEL=0		-15 to +10		%	
	CLK_SEL=1,2,3		±1		%	
PLL Settling Time	CLK_SEL=1,2,3		1	10	ms	
EXTERNAL 32.768kHz CLOCK	CLK_SEL=4					
External Clock Frequency			32.768		kHz	
External Clock Allowable Jitter	Cycle-to-cycle rms		1 to 2		µs	
Gyroscope Sample Rate, Fast	DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8.192		kHz	
Gyroscope Sample Rate, Slow	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1.024		kHz	
Accelerometer Sample Rate			1.024		kHz	
PLL Settling Time			1	10	ms	
EXTERNAL 19.2MHz CLOCK	CLK_SEL=5					
External Clock Frequency			19.2		MHz	
Gyroscope Sample Rate	Full programmable range	3.9		8000	Hz	
Gyroscope Sample Rate, Fast Mode	DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8		kHz	
Gyroscope Sample Rate, Slow Mode	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1		kHz	
Accelerometer Sample Rate			1		kHz	
PLL Settling Time			1	10	ms	

6.7 I²C Timing Characterization

Typical Operating Circuit of Section 7.2, VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
I²C TIMING						
I²C FAST-MODE						
f _{SCL} , SCL Clock Frequency				400	kHz	
t _{HD,STA} , (Repeated) START Condition Hold Time		0.6			μs	
t _{LOW} , SCL Low Period		1.3			μs	
t _{HIGH} , SCL High Period		0.6			μs	
t _{SU,STA} , Repeated START Condition Setup Time		0.6			μs	
t _{HD,DAT} , SDA Data Hold Time		0			μs	
t _{SU,DAT} , SDA Data Setup Time		100			ns	
t _r , SDA and SCL Rise Time	C _b bus cap. from 10 to 400pF	20+0.1C _b		300	ns	
t _f , SDA and SCL Fall Time	C _b bus cap. from 10 to 400pF	20+0.1C _b		300	ns	
t _{SU,STO} , STOP Condition Setup Time		0.6			μs	
t _{BUF} , Bus Free Time Between STOP and START Condition		1.3			μs	
C _b , Capacitive Load for each Bus Line			< 400		pF	
t _{VD,DAT} , Data Valid Time				0.9	μs	
t _{VD,ACK} , Data Valid Acknowledge Time				0.9	μs	

Note: Timing Characteristics apply to both Primary and Auxiliary I²C Bus

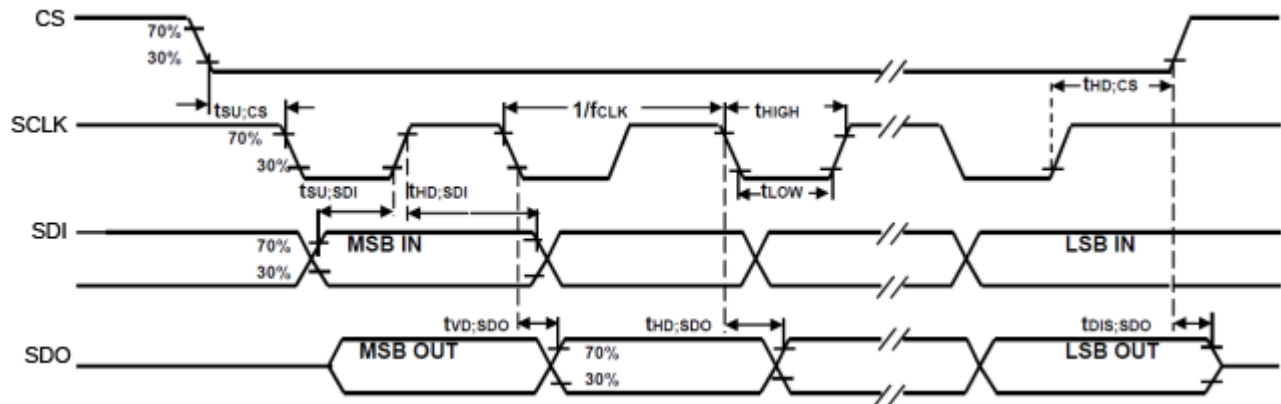


I²C Bus Timing cycle Diagram

6.8 SPI Timing Characterization (MPU-6000 only)

Typical Operating Circuit of Section 7.2, VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C, unless otherwise noted.

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
SPI TIMING						
f _{SCLK} , SCLK Clock Frequency				1	MHz	
t _{LOW} , SCLK Low Period		400			ns	
t _{HIGH} , SCLK High Period		400			ns	
t _{SU,CS} , CS Setup Time		8			ns	
t _{HD,CS} , CS Hold Time		500			ns	
t _{SU,SDI} , SDI Setup Time		11			ns	
t _{HD,SDI} , SDI Hold Time		7			ns	
t _{VD,SDO} , SDO Valid Time	C _{load} = 20pF			100	ns	
t _{HD,SDO} , SDO Hold Time	C _{load} = 20pF	4			ns	
t _{DIS,SDO} , SDO Output Disable Time				10	ns	



SPI Bus Timing Diagram



6.9 Absolute Maximum Ratings

Stress above those listed as “Absolute Maximum Ratings” may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these conditions is not implied. Exposure to the absolute maximum ratings conditions for extended periods may affect device reliability.

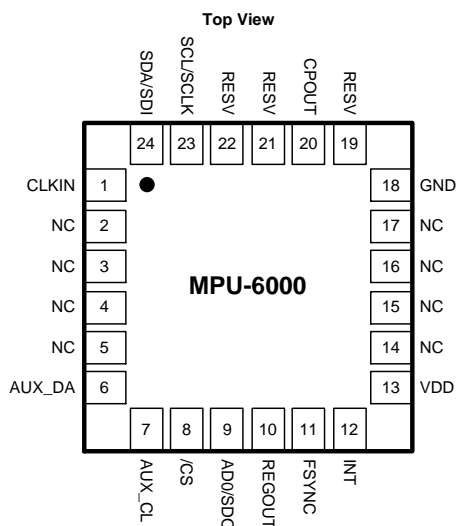
Parameter	Rating
Supply Voltage, VDD	-0.5V to +6V
VLOGIC Input Voltage Level (MPU-6050)	-0.5V to VDD + 0.5V
REGOUT	-0.5V to 2V
Input Voltage Level (CLKIN, AUX_DA, AD0, FSYNC, INT, SCL, SDA)	-0.5V to VDD + 0.5V
CPOUT (2.5V ≤ VDD ≤ 3.6V)	-0.5V to 30V
Acceleration (Any Axis, unpowered)	10,000g for 0.2ms
Operating Temperature Range	-40°C to +105°C
Storage Temperature Range	-40°C to +125°C
Electrostatic Discharge (ESD) Protection	2kV (HBM); 250V (MM)
Latch-up	JEDEC Class II (2), 125°C ±100mA



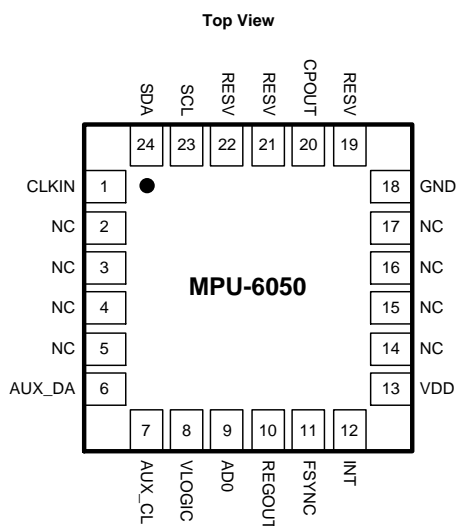
7 Applications Information

7.1 Pin Out and Signal Description

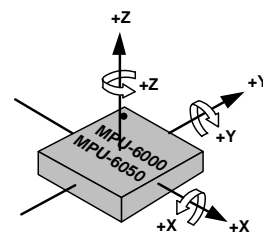
Pin Number	MPU-6000	MPU-6050	Pin Name	Pin Description
1	Y	Y	CLKIN	Optional external reference clock input. Connect to GND if unused.
6	Y	Y	AUX_DA	I ² C master serial data, for connecting to external sensors
7	Y	Y	AUX_CL	I ² C Master serial clock, for connecting to external sensors
8	Y		/CS	SPI chip select (0=SPI mode)
8		Y	VLOGIC	Digital I/O supply voltage
9	Y		AD0 / SDO	I ² C Slave Address LSB (AD0); SPI serial data output (SDO)
9		Y	AD0	I ² C Slave Address LSB (AD0)
10	Y	Y	REGOUT	Regulator filter capacitor connection
11	Y	Y	FSYNC	Frame synchronization digital input. Connect to GND if unused.
12	Y	Y	INT	Interrupt digital output (totem pole or open-drain)
13	Y	Y	VDD	Power supply voltage and Digital I/O supply voltage
18	Y	Y	GND	Power supply ground
19, 21	Y	Y	RESV	Reserved. Do not connect.
20	Y	Y	CPOUT	Charge pump capacitor connection
22	Y	Y	RESV	Reserved. Do not connect.
23	Y		SCL / SCLK	I ² C serial clock (SCL); SPI serial clock (SCLK)
23		Y	SCL	I ² C serial clock (SCL)
24	Y		SDA / SDI	I ² C serial data (SDA); SPI serial data input (SDI)
24		Y	SDA	I ² C serial data (SDA)
2, 3, 4, 5, 14, 15, 16, 17	Y	Y	NC	Not internally connected. May be used for PCB trace routing.



QFN Package
24-pin, 4mm x 4mm x 0.9mm

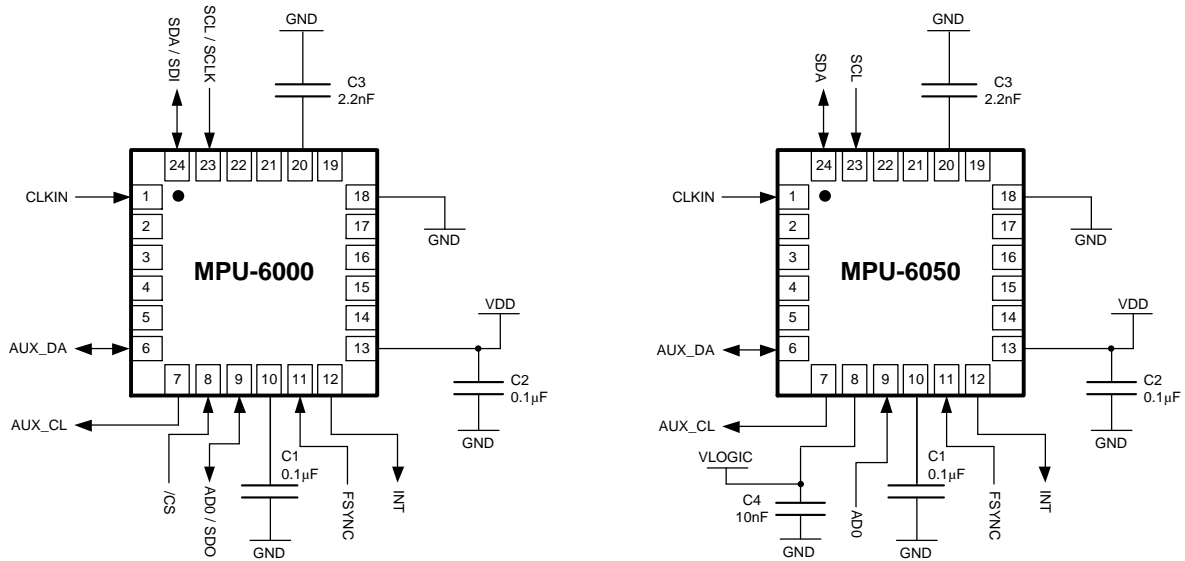


QFN Package
24-pin, 4mm x 4mm x 0.9mm



Orientation of Axes of Sensitivity and
Polarity of Rotation

7.2 Typical Operating Circuit



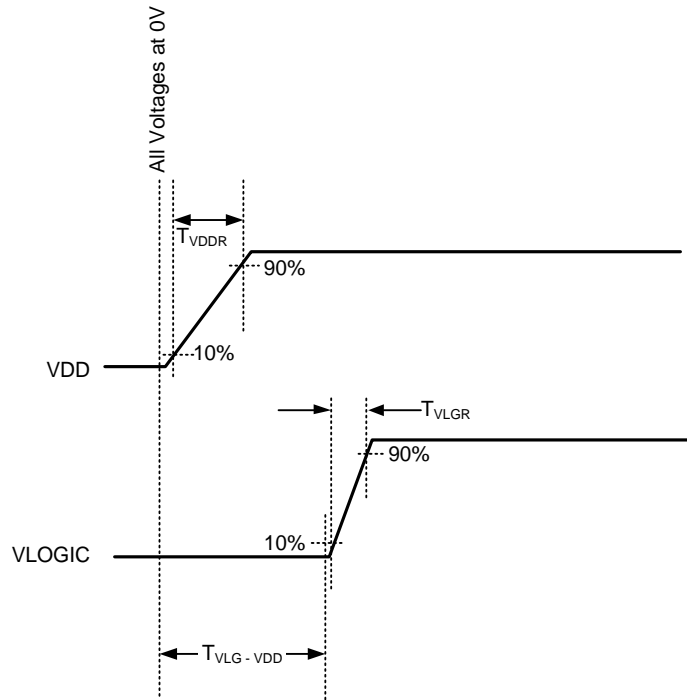
Typical Operating Circuits

7.3 Bill of Materials for External Components

Component	Label	Specification	Quantity
Regulator Filter Capacitor (Pin 10)	C1	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 2V	1
VDD Bypass Capacitor (Pin 13)	C2	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 4V	1
Charge Pump Capacitor (Pin 20)	C3	Ceramic, X7R, 2.2nF ±10%, 50V	1
VLOGIC Bypass Capacitor (Pin 8)	C4*	Ceramic, X7R, 10nF ±10%, 4V	1

* MPU-6050 Only.

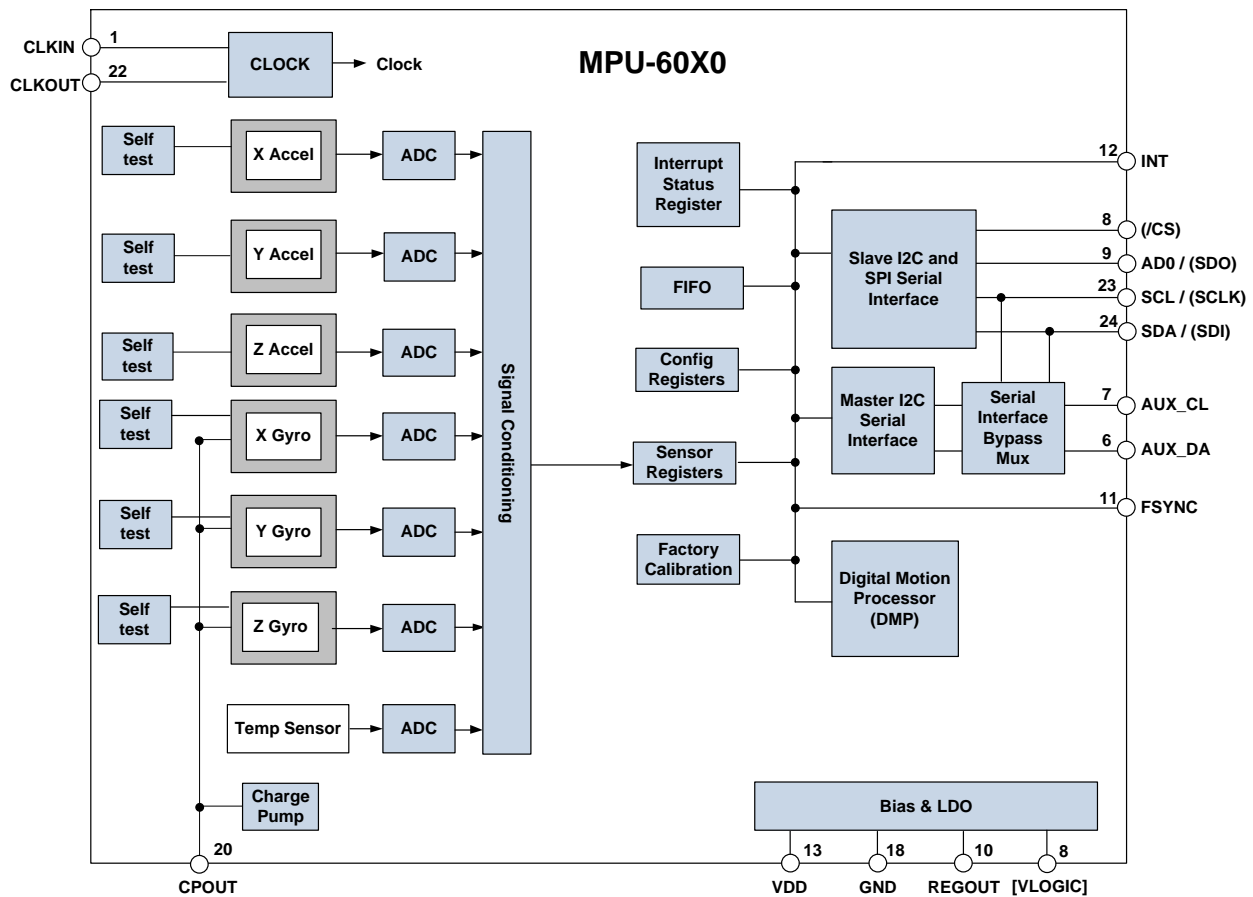
7.4 Recommended Power-on Procedure



Power-Up Sequencing

1. VLOGIC amplitude must always be \leq VDD amplitude
2. T_{VDDR} is VDD rise time: Time for VDD to rise from 10% to 90% of its final value
3. T_{VDDR} is \leq 100ms
4. T_{VLGR} is VLOGIC rise time: Time for VLOGIC to rise from 10% to 90% of its final value
5. T_{VLGR} is \leq 3ms
6. $T_{VLG-VDD}$ is the delay from the start of VDD ramp to the start of VLOGIC rise
7. $T_{VLG-VDD}$ is \geq 0
8. VDD and VLOGIC must be monotonic ramps

7.5 Block Diagram



Note: Pin names in round brackets () apply only to MPU-6000
 Pin names in square brackets [] apply only to MPU-6050

7.6 Overview

The MPU-60X0 is comprised of the following key blocks and functions:

- Three-axis MEMS rate gyroscope sensor with 16-bit ADCs and signal conditioning
- Three-axis MEMS accelerometer sensor with 16-bit ADCs and signal conditioning
- Digital Motion Processor (DMP) engine
- Primary I²C and SPI (MPU-6000 only) serial communications interfaces
- Auxiliary I²C serial interface for 3rd party magnetometer & other sensors
- Clocking
- Sensor Data Registers
- FIFO
- Interrupts
- Digital-Output Temperature Sensor
- Gyroscope & Accelerometer Self-test
- Bias and LDO
- Charge Pump



7.7 Three-Axis MEMS Gyroscope with 16-bit ADCs and Signal Conditioning

The MPU-60X0 consists of three independent vibratory MEMS rate gyroscopes, which detect rotation about the X-, Y-, and Z- Axes. When the gyros are rotated about any of the sense axes, the Coriolis Effect causes a vibration that is detected by a capacitive pickoff. The resulting signal is amplified, demodulated, and filtered to produce a voltage that is proportional to the angular rate. This voltage is digitized using individual on-chip 16-bit Analog-to-Digital Converters (ADCs) to sample each axis. The full-scale range of the gyro sensors may be digitally programmed to ± 250 , ± 500 , ± 1000 , or ± 2000 degrees per second (dps). The ADC sample rate is programmable from 8,000 samples per second, down to 3.9 samples per second, and user-selectable low-pass filters enable a wide range of cut-off frequencies.

7.8 Three-Axis MEMS Accelerometer with 16-bit ADCs and Signal Conditioning

The MPU-60X0's 3-Axis accelerometer uses separate proof masses for each axis. Acceleration along a particular axis induces displacement on the corresponding proof mass, and capacitive sensors detect the displacement differentially. The MPU-60X0's architecture reduces the accelerometers' susceptibility to fabrication variations as well as to thermal drift. When the device is placed on a flat surface, it will measure 0g on the X- and Y-axes and +1g on the Z-axis. The accelerometers' scale factor is calibrated at the factory and is nominally independent of supply voltage. Each sensor has a dedicated sigma-delta ADC for providing digital outputs. The full scale range of the digital output can be adjusted to $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, or $\pm 16g$.

7.9 Digital Motion Processor

The embedded Digital Motion Processor (DMP) is located within the MPU-60X0 and offloads computation of motion processing algorithms from the host processor. The DMP acquires data from accelerometers, gyroscopes, and additional 3rd party sensors such as magnetometers, and processes the data. The resulting data can be read from the DMP's registers, or can be buffered in a FIFO. The DMP has access to one of the MPU's external pins, which can be used for generating interrupts.

The purpose of the DMP is to offload both timing requirements and processing power from the host processor. Typically, motion processing algorithms should be run at a high rate, often around 200Hz, in order to provide accurate results with low latency. This is required even if the application updates at a much lower rate; for example, a low power user interface may update as slowly as 5Hz, but the motion processing should still run at 200Hz. The DMP can be used as a tool in order to minimize power, simplify timing, simplify the software architecture, and save valuable MIPS on the host processor for use in the application.

7.10 Primary I²C and SPI Serial Communications Interfaces

The MPU-60X0 communicates to a system processor using either a SPI (MPU-6000 only) or an I²C serial interface. The MPU-60X0 always acts as a slave when communicating to the system processor. The LSB of the of the I²C slave address is set by pin 9 (AD0).

The logic levels for communications between the MPU-60X0 and its master are as follows:

- MPU-6000: The logic level for communications with the master is set by the voltage on VDD
- MPU-6050: The logic level for communications with the master is set by the voltage on VLOGIC

For further information regarding the logic levels of the MPU-6050, please refer to Section 10.



7.11 Auxiliary I²C Serial Interface

The MPU-60X0 has an auxiliary I²C bus for communicating to an off-chip 3-Axis digital output magnetometer or other sensors. This bus has two operating modes:

- I²C Master Mode: The MPU-60X0 acts as a master to any external sensors connected to the auxiliary I²C bus
- Pass-Through Mode: The MPU-60X0 directly connects the primary and auxiliary I²C buses together, allowing the system processor to directly communicate with any external sensors.

Auxiliary I²C Bus Modes of Operation:

- I²C Master Mode: Allows the MPU-60X0 to directly access the data registers of external digital sensors, such as a magnetometer. In this mode, the MPU-60X0 directly obtains data from auxiliary sensors, allowing the on-chip DMP to generate sensor fusion data without intervention from the system applications processor.

For example, In I²C Master mode, the MPU-60X0 can be configured to perform burst reads, returning the following data from a magnetometer:

- X magnetometer data (2 bytes)
- Y magnetometer data (2 bytes)
- Z magnetometer data (2 bytes)

The I²C Master can be configured to read up to 24 bytes from up to 4 auxiliary sensors. A fifth sensor can be configured to work single byte read/write mode.

- Pass-Through Mode: Allows an external system processor to act as master and directly communicate to the external sensors connected to the auxiliary I²C bus pins (AUX_DA and AUX_CL). In this mode, the auxiliary I²C bus control logic (3rd party sensor interface block) of the MPU-60X0 is disabled, and the auxiliary I²C pins AUX_DA and AUX_CL (Pins 6 and 7) are connected to the main I²C bus (Pins 23 and 24) through analog switches.

Pass-Through Mode is useful for configuring the external sensors, or for keeping the MPU-60X0 in a low-power mode when only the external sensors are used.

In Pass-Through Mode the system processor can still access MPU-60X0 data through the I²C interface.

Auxiliary I²C Bus IO Logic Levels

- MPU-6000: The logic level of the auxiliary I²C bus is VDD
- MPU-6050: The logic level of the auxiliary I²C bus can be programmed to be either VDD or VLOGIC

For further information regarding the MPU-6050's logic levels, please refer to Section 10.2.



7.12 Self-Test

Please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document for more details on self test.

Self-test allows for the testing of the mechanical and electrical portions of the sensors. The self-test for each measurement axis can be activated by means of the gyroscope and accelerometer self-test registers (registers 13 to 16).

When self-test is activated, the electronics cause the sensors to be actuated and produce an output signal. The output signal is used to observe the self-test response.

The self-test response is defined as follows:

Self-test response = Sensor output with self-test enabled – Sensor output without self-test enabled

The self-test response for each accelerometer axis is defined in the accelerometer specification table (Section 6.2), while that for each gyroscope axis is defined in the gyroscope specification table (Section 6.1).

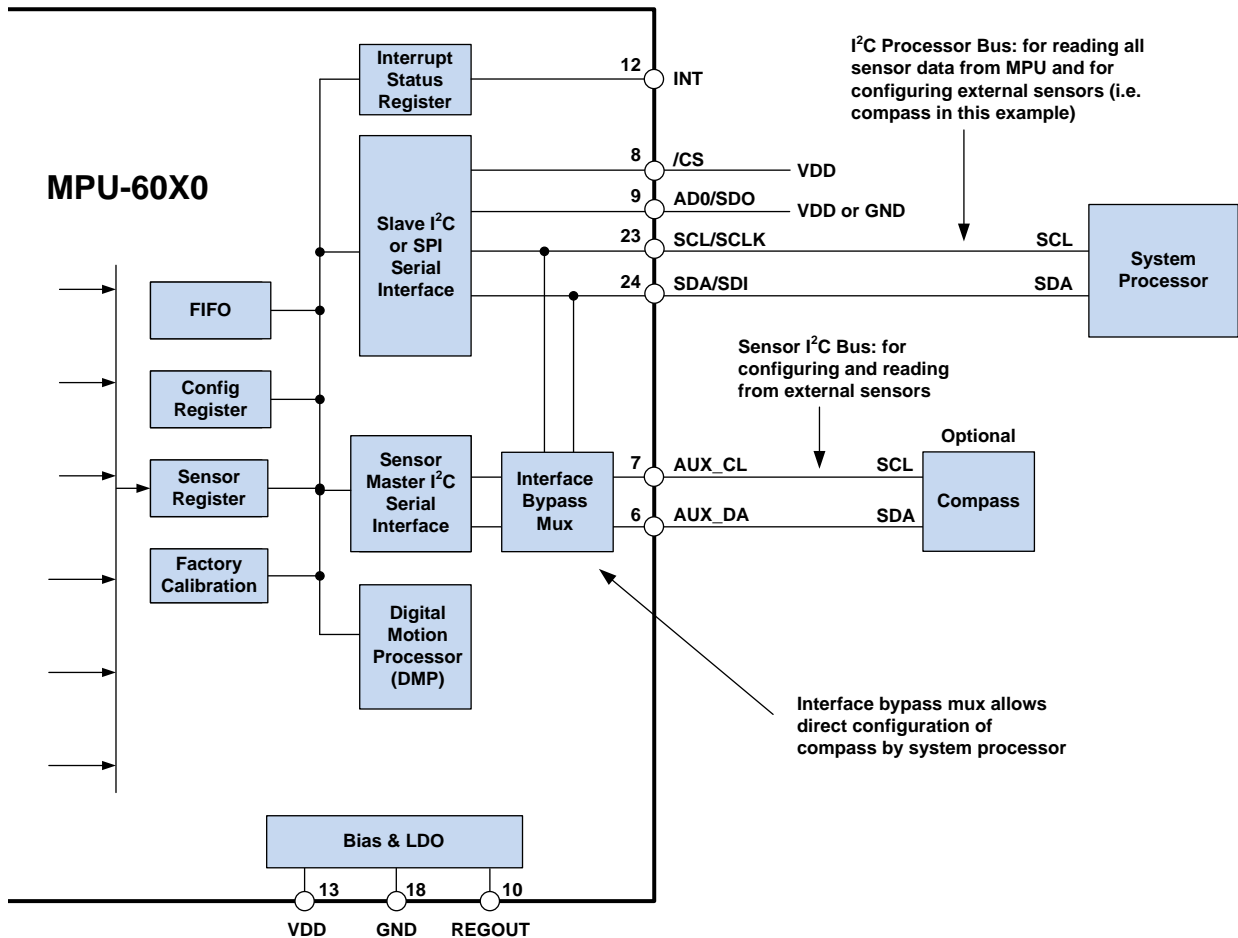
When the value of the self-test response is within the min/max limits of the product specification, the part has passed self test. When the self-test response exceeds the min/max values, the part is deemed to have failed self-test. Code for operating self test code is included within the MotionApps software provided by InvenSense.

7.13 MPU-60X0 Solution for 9-axis Sensor Fusion Using I²C Interface

In the figure below, the system processor is an I²C master to the MPU-60X0. In addition, the MPU-60X0 is an I²C master to the optional external compass sensor. The MPU-60X0 has limited capabilities as an I²C Master, and depends on the system processor to manage the initial configuration of any auxiliary sensors. The MPU-60X0 has an interface bypass multiplexer, which connects the system processor I²C bus pins 23 and 24 (SDA and SCL) directly to the auxiliary sensor I²C bus pins 6 and 7 (AUX_DA and AUX_CL).

Once the auxiliary sensors have been configured by the system processor, the interface bypass multiplexer should be disabled so that the MPU-60X0 auxiliary I²C master can take control of the sensor I²C bus and gather data from the auxiliary sensors.

For further information regarding I²C master control, please refer to Section 10.



7.14 MPU-6000 Using SPI Interface

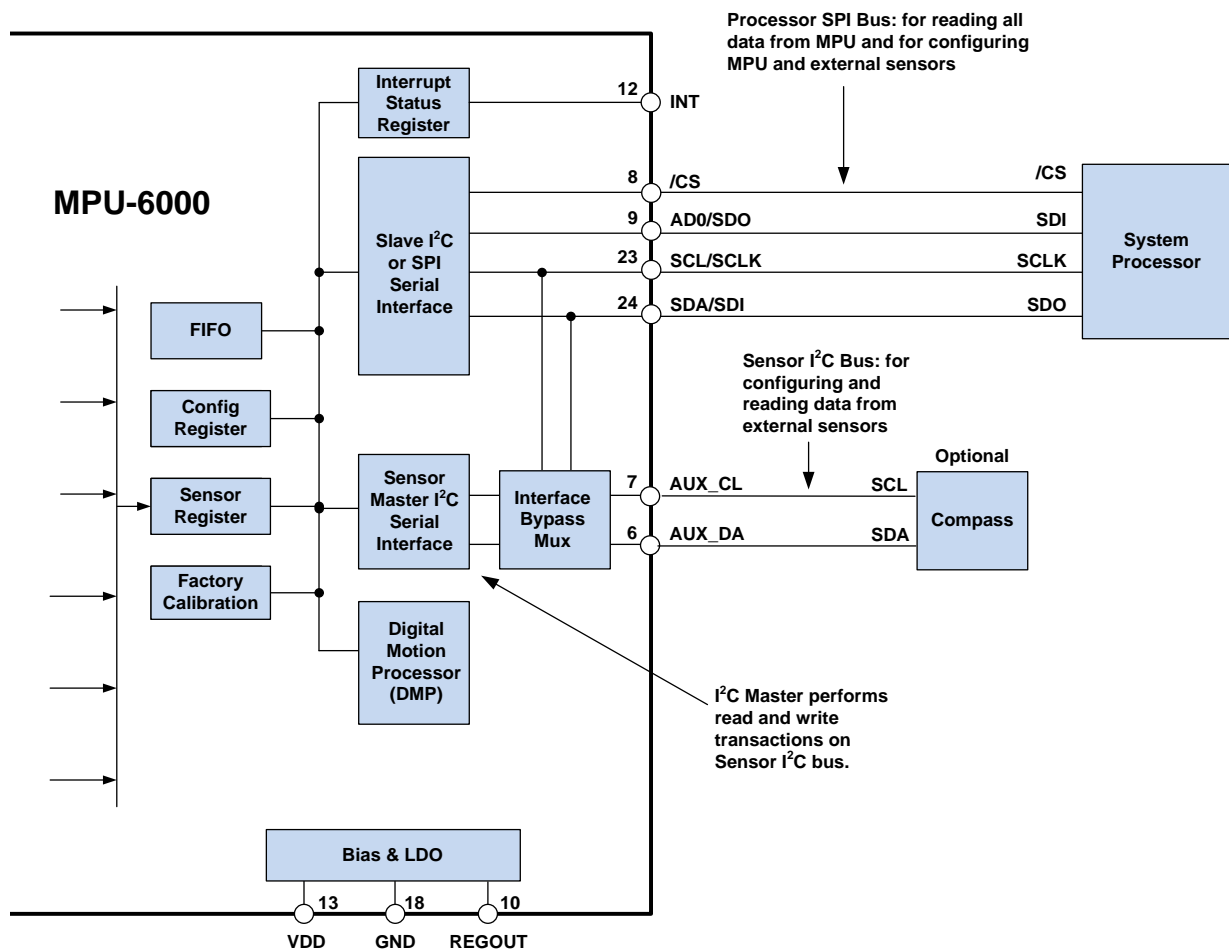
In the figure below, the system processor is an SPI master to the MPU-6000. Pins 8, 9, 23, and 24 are used to support the /CS, SDO, SCLK, and SDI signals for SPI communications. Because these SPI pins are shared with the I²C slave pins (9, 23 and 24), the system processor cannot access the auxiliary I²C bus through the interface bypass multiplexer, which connects the processor I²C interface pins to the sensor I²C interface pins.

Since the MPU-6000 has limited capabilities as an I²C Master, and depends on the system processor to manage the initial configuration of any auxiliary sensors, another method must be used for programming the sensors on the auxiliary sensor I²C bus pins 6 and 7 (AUX_DA and AUX_CL).

When using SPI communications between the MPU-6000 and the system processor, configuration of devices on the auxiliary I²C sensor bus can be achieved by using I²C Slaves 0-4 to perform read and write transactions on any device and register on the auxiliary I²C bus. The I²C Slave 4 interface can be used to perform only single byte read and write transactions.

Once the external sensors have been configured, the MPU-6000 can perform single or multi-byte reads using the sensor I²C bus. The read results from the Slave 0-3 controllers can be written to the FIFO buffer as well as to the external sensor registers.

For further information regarding the control of the MPU-60X0's auxiliary I²C interface, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document.



7.15 Internal Clock Generation

The MPU-60X0 has a flexible clocking scheme, allowing a variety of internal or external clock sources to be used for the internal synchronous circuitry. This synchronous circuitry includes the signal conditioning and ADCs, the DMP, and various control circuits and registers. An on-chip PLL provides flexibility in the allowable inputs for generating this clock.

Allowable internal sources for generating the internal clock are:

- An internal relaxation oscillator
- Any of the X, Y, or Z gyros (MEMS oscillators with a variation of $\pm 1\%$ over temperature)

Allowable external clocking sources are:

- 32.768kHz square wave
- 19.2MHz square wave

Selection of the source for generating the internal synchronous clock depends on the availability of external sources and the requirements for power consumption and clock accuracy. These requirements will most likely vary by mode of operation. For example, in one mode, where the biggest concern is power consumption, the user may wish to operate the Digital Motion Processor of the MPU-60X0 to process accelerometer data, while keeping the gyros off. In this case, the internal relaxation oscillator is a good clock choice. However, in another mode, where the gyros are active, selecting the gyros as the clock source provides for a more accurate clock source.

Clock accuracy is important, since timing errors directly affect the distance and angle calculations performed by the Digital Motion Processor (and by extension, by any processor).

There are also start-up conditions to consider. When the MPU-60X0 first starts up, the device uses its internal clock until programmed to operate from another source. This allows the user, for example, to wait for the MEMS oscillators to stabilize before they are selected as the clock source.

7.16 Sensor Data Registers

The sensor data registers contain the latest gyro, accelerometer, auxiliary sensor, and temperature measurement data. They are read-only registers, and are accessed via the serial interface. Data from these registers may be read anytime. However, the interrupt function may be used to determine when new data is available.

For a table of interrupt sources please refer to Section 8.

7.17 FIFO

The MPU-60X0 contains a 1024-byte FIFO register that is accessible via the Serial Interface. The FIFO configuration register determines which data is written into the FIFO. Possible choices include gyro data, accelerometer data, temperature readings, auxiliary sensor readings, and FSYNC input. A FIFO counter keeps track of how many bytes of valid data are contained in the FIFO. The FIFO register supports burst reads. The interrupt function may be used to determine when new data is available.

For further information regarding the FIFO, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document.

7.18 Interrupts

Interrupt functionality is configured via the Interrupt Configuration register. Items that are configurable include the INT pin configuration, the interrupt latching and clearing method, and triggers for the interrupt. Items that can trigger an interrupt are (1) Clock generator locked to new reference oscillator (used when switching clock



sources); (2) new data is available to be read (from the FIFO and Data registers); (3) accelerometer event interrupts; and (4) the MPU-60X0 did not receive an acknowledge from an auxiliary sensor on the secondary I²C bus. The interrupt status can be read from the Interrupt Status register.

For further information regarding interrupts, please refer to the MPU-60X0 Register Map and Register Descriptions document.

For information regarding the MPU-60X0's accelerometer event interrupts, please refer to Section 8.

7.19 Digital-Output Temperature Sensor

An on-chip temperature sensor and ADC are used to measure the MPU-60X0 die temperature. The readings from the ADC can be read from the FIFO or the Sensor Data registers.

7.20 Bias and LDO

The bias and LDO section generates the internal supply and the reference voltages and currents required by the MPU-60X0. Its two inputs are an unregulated VDD of 2.375 to 3.46V and a VLOGIC logic reference supply voltage of 1.71V to VDD (MPU-6050 only). The LDO output is bypassed by a capacitor at REGOUT. For further details on the capacitor, please refer to the Bill of Materials for External Components (Section 7.3).

7.21 Charge Pump

An on-board charge pump generates the high voltage required for the MEMS oscillators. Its output is bypassed by a capacitor at CPOUT. For further details on the capacitor, please refer to the Bill of Materials for External Components (Section 7.3).



8 Programmable Interrupts

The MPU-60X0 has a programmable interrupt system which can generate an interrupt signal on the INT pin. Status flags indicate the source of an interrupt. Interrupt sources may be enabled and disabled individually.

Table of Interrupt Sources

Interrupt Name	Module
FIFO Overflow	FIFO
Data Ready	Sensor Registers
I ² C Master errors: Lost Arbitration, NACKs	I ² C Master
I ² C Slave 4	I ² C Master

For information regarding the interrupt enable/disable registers and flag registers, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document. Some interrupt sources are explained below.



9 Digital Interface

9.1 I²C and SPI (MPU-6000 only) Serial Interfaces

The internal registers and memory of the MPU-6000/MPU-6050 can be accessed using either I²C at 400 kHz or SPI at 1MHz (MPU-6000 only). SPI operates in four-wire mode.

Serial Interface

Pin Number	MPU-6000	MPU-6050	Pin Name	Pin Description
8	Y		/CS	SPI chip select (0=SPI enable)
8		Y	VLOGIC	Digital I/O supply voltage. VLOGIC must be \leq VDD at all times.
9	Y		AD0 / SDO	I ² C Slave Address LSB (AD0); SPI serial data output (SDO)
9		Y	AD0	I ² C Slave Address LSB
23	Y		SCL / SCLK	I ² C serial clock (SCL); SPI serial clock (SCLK)
23		Y	SCL	I ² C serial clock
24	Y		SDA / SDI	I ² C serial data (SDA); SPI serial data input (SDI)
24		Y	SDA	I ² C serial data

Note:

To prevent switching into I²C mode when using SPI (MPU-6000), the I²C interface should be disabled by setting the *I2C_IF_DIS* configuration bit. Setting this bit should be performed immediately after waiting for the time specified by the “Start-Up Time for Register Read/Write” in Section 6.3.

For further information regarding the *I2C_IF_DIS* bit, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document.

9.2 I²C Interface

I²C is a two-wire interface comprised of the signals serial data (SDA) and serial clock (SCL). In general, the lines are open-drain and bi-directional. In a generalized I²C interface implementation, attached devices can be a master or a slave. The master device puts the slave address on the bus, and the slave device with the matching address acknowledges the master.

The MPU-60X0 always operates as a slave device when communicating to the system processor, which thus acts as the master. SDA and SCL lines typically need pull-up resistors to VDD. The maximum bus speed is 400 kHz.

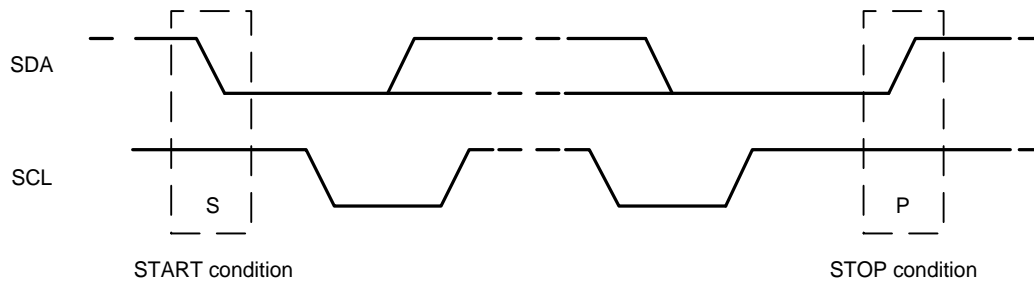
The slave address of the MPU-60X0 is b110100X which is 7 bits long. The LSB bit of the 7 bit address is determined by the logic level on pin AD0. This allows two MPU-60X0s to be connected to the same I²C bus. When used in this configuration, the address of the one of the devices should be b1101000 (pin AD0 is logic low) and the address of the other should be b1101001 (pin AD0 is logic high).

9.3 I²C Communications Protocol

START (S) and STOP (P) Conditions

Communication on the I²C bus starts when the master puts the START condition (S) on the bus, which is defined as a HIGH-to-LOW transition of the SDA line while SCL line is HIGH (see figure below). The bus is considered to be busy until the master puts a STOP condition (P) on the bus, which is defined as a LOW to HIGH transition on the SDA line while SCL is HIGH (see figure below).

Additionally, the bus remains busy if a repeated START (Sr) is generated instead of a STOP condition.

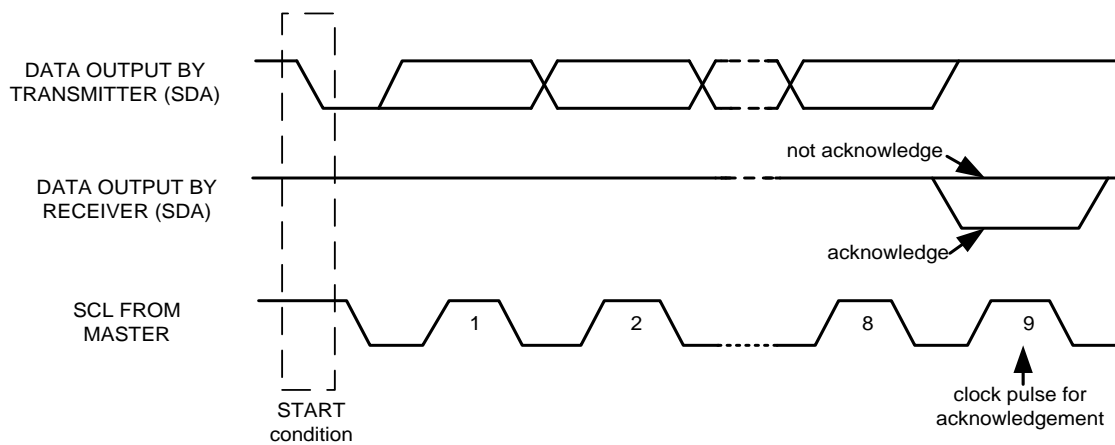


START and STOP Conditions

Data Format / Acknowledge

I²C data bytes are defined to be 8-bits long. There is no restriction to the number of bytes transmitted per data transfer. Each byte transferred must be followed by an acknowledge (ACK) signal. The clock for the acknowledge signal is generated by the master, while the receiver generates the actual acknowledge signal by pulling down SDA and holding it low during the HIGH portion of the acknowledge clock pulse.

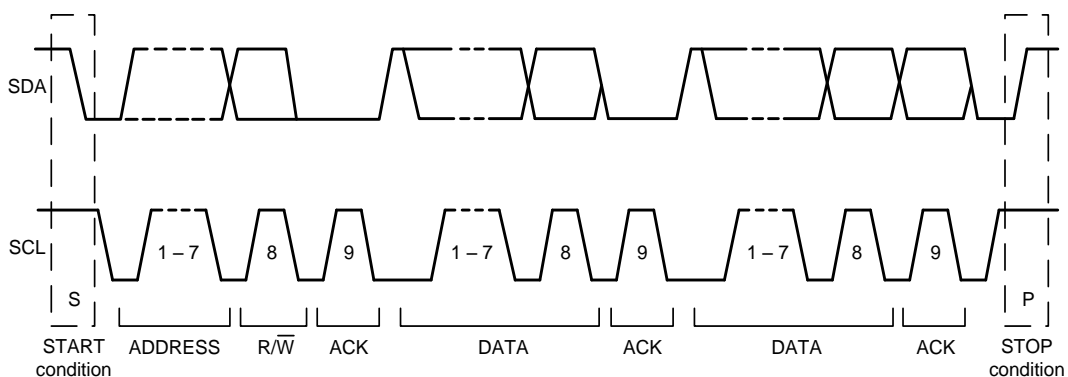
If a slave is busy and cannot transmit or receive another byte of data until some other task has been performed, it can hold SCL LOW, thus forcing the master into a wait state. Normal data transfer resumes when the slave is ready, and releases the clock line (refer to the following figure).



Acknowledge on the I²C Bus

Communications

After beginning communications with the START condition (S), the master sends a 7-bit slave address followed by an 8th bit, the read/write bit. The read/write bit indicates whether the master is receiving data from or is writing to the slave device. Then, the master releases the SDA line and waits for the acknowledge signal (ACK) from the slave device. Each byte transferred must be followed by an acknowledge bit. To acknowledge, the slave device pulls the SDA line LOW and keeps it LOW for the high period of the SCL line. Data transmission is always terminated by the master with a STOP condition (P), thus freeing the communications line. However, the master can generate a repeated START condition (Sr), and address another slave without first generating a STOP condition (P). A LOW to HIGH transition on the SDA line while SCL is HIGH defines the stop condition. All SDA changes should take place when SCL is low, with the exception of start and stop conditions.



Complete I²C Data Transfer

To write the internal MPU-60X0 registers, the master transmits the start condition (S), followed by the I²C address and the write bit (0). At the 9th clock cycle (when the clock is high), the MPU-60X0 acknowledges the transfer. Then the master puts the register address (RA) on the bus. After the MPU-60X0 acknowledges the reception of the register address, the master puts the register data onto the bus. This is followed by the ACK signal, and data transfer may be concluded by the stop condition (P). To write multiple bytes after the last ACK signal, the master can continue outputting data rather than transmitting a stop signal. In this case, the MPU-60X0 automatically increments the register address and loads the data to the appropriate register. The following figures show single and two-byte write sequences.

Single-Byte Write Sequence

Master	S	AD+W		RA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK	

Burst Write Sequence

Master	S	AD+W		RA		DATA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK		ACK	



To read the internal MPU-60X0 registers, the master sends a start condition, followed by the I²C address and a write bit, and then the register address that is going to be read. Upon receiving the ACK signal from the MPU-60X0, the master transmits a start signal followed by the slave address and read bit. As a result, the MPU-60X0 sends an ACK signal and the data. The communication ends with a not acknowledge (NACK) signal and a stop bit from master. The NACK condition is defined such that the SDA line remains high at the 9th clock cycle. The following figures show single and two-byte read sequences.

Single-Byte Read Sequence

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		

Burst Read Sequence

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			ACK		NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		DATA		

9.4 I²C Terms

Signal	Description
S	Start Condition: SDA goes from high to low while SCL is high
AD	Slave I ² C address
W	Write bit (0)
R	Read bit (1)
ACK	Acknowledge: SDA line is low while the SCL line is high at the 9 th clock cycle
NACK	Not-Acknowledge: SDA line stays high at the 9 th clock cycle
RA	MPU-60X0 internal register address
DATA	Transmit or received data
P	Stop condition: SDA going from low to high while SCL is high

9.5 SPI Interface (MPU-6000 only)

SPI is a 4-wire synchronous serial interface that uses two control lines and two data lines. The MPU-6000 always operates as a Slave device during standard Master-Slave SPI operation.

With respect to the Master, the Serial Clock output (SCLK), the Serial Data Output (SDO) and the Serial Data Input (SDI) are shared among the Slave devices. Each SPI slave device requires its own Chip Select (/CS) line from the master.

/CS goes low (active) at the start of transmission and goes back high (inactive) at the end. Only one /CS line is active at a time, ensuring that only one slave is selected at any given time. The /CS lines of the non-selected slave devices are held high, causing their SDO lines to remain in a high-impedance (high-z) state so that they do not interfere with any active devices.

SPI Operational Features

1. Data is delivered MSB first and LSB last
2. Data is latched on the rising edge of SCLK
3. Data should be transitioned on the falling edge of SCLK
4. The maximum frequency of SCLK is 1MHz
5. SPI read and write operations are completed in 16 or more clock cycles (two or more bytes). The first byte contains the SPI Address, and the following byte(s) contain(s) the SPI data. The first bit of the first byte contains the Read/Write bit and indicates the Read (1) or Write (0) operation. The following 7 bits contain the Register Address. In cases of multiple-byte Read/Writes, data is two or more bytes:

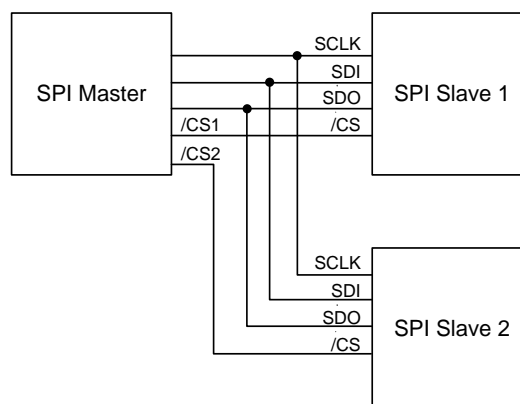
SPI Address format

MSB							LSB
R/W	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0

SPI Data format

MSB							LSB
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

6. Supports Single or Burst Read/Writes.



Typical SPI Master / Slave Configuration



10 Serial Interface Considerations (MPU-6050)

10.1 MPU-6050 Supported Interfaces

The MPU-6050 supports I²C communications on both its primary (microprocessor) serial interface and its auxiliary interface.

10.2 Logic Levels

The MPU-6050's I/O logic levels are set to be VLOGIC, as shown in the table below. AUX_VDDIO must be set to 0.

I/O Logic Levels vs. AUX_VDDIO

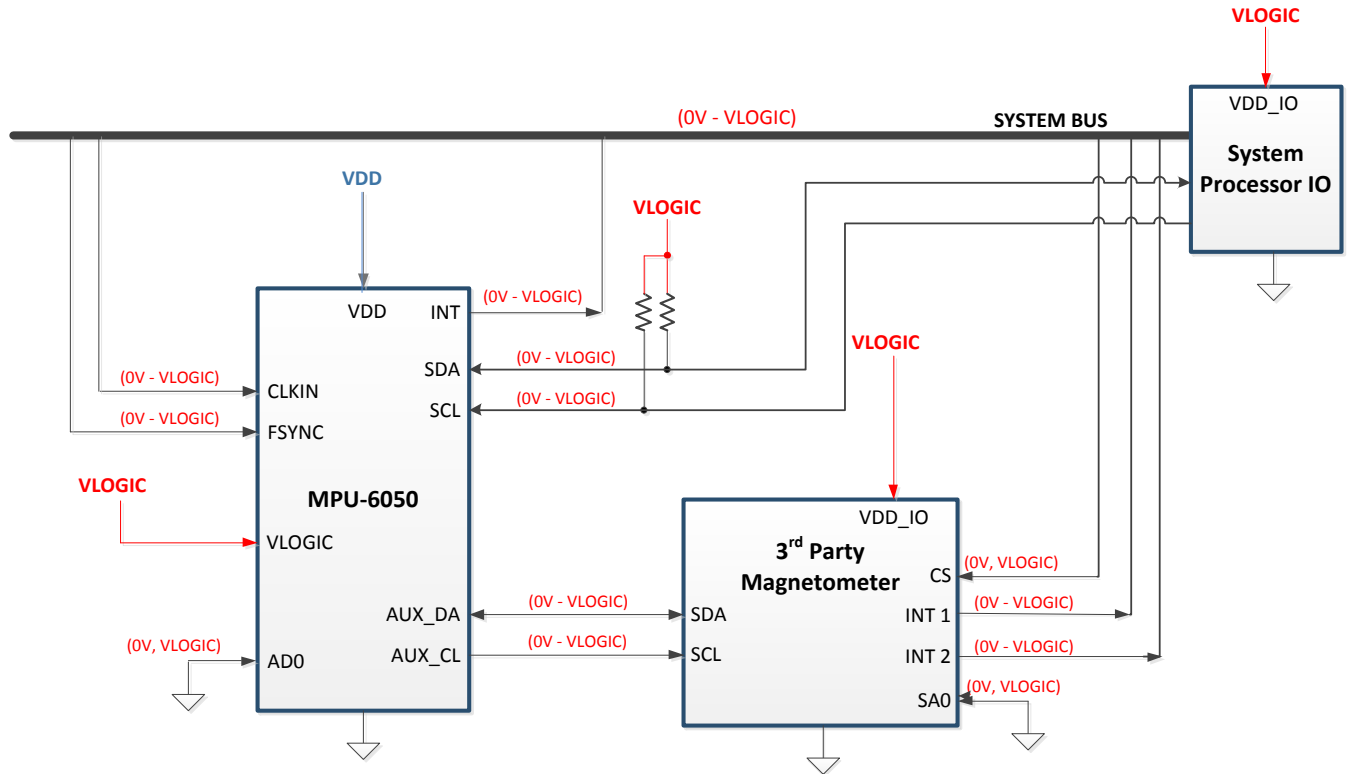
AUX_VDDIO	MICROPROCESSOR LOGIC LEVELS (Pins: SDA, SCL, AD0, CLKIN, INT)	AUXILLARY LOGIC LEVELS (Pins: AUX_DA, AUX_CL)
0	VLOGIC	VLOGIC

Note: The power-on-reset value for *AUX_VDDIO* is 0.

When *AUX_VDDIO* is set to 0 (its power-on-reset value), VLOGIC is the power supply voltage for both the microprocessor system bus and the auxiliary I²C bus, as shown in the figure of Section 10.3.

10.3 Logic Levels Diagram for AUX_VDDIO = 0

The figure below depicts a sample circuit with a third party magnetometer attached to the auxiliary I²C bus. It shows logic levels and voltage connections for AUX_VDDIO = 0. Note: Actual configuration will depend on the auxiliary sensors used.



I/O Levels and Connections for AUX_VDDIO = 0

Notes:

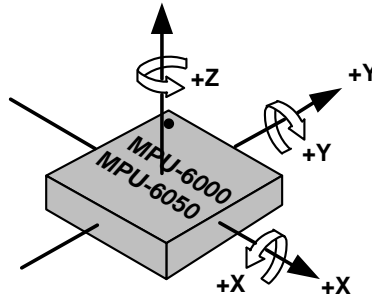
1. AUX_VDDIO determines the IO voltage levels of AUX_DA and AUX_CL (0 = set output levels relative to VLOGIC)
2. All other MPU-6050 logic IOs are referenced to VLOGIC.

11 Assembly

This section provides general guidelines for assembling InvenSense Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) gyros packaged in Quad Flat No leads package (QFN) surface mount integrated circuits.

11.1 Orientation of Axes

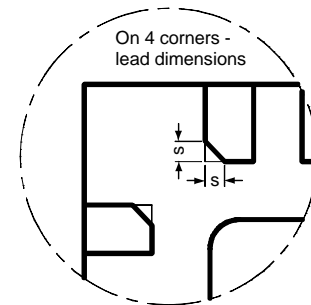
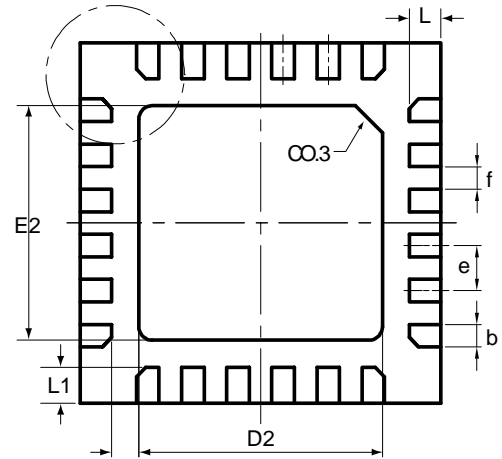
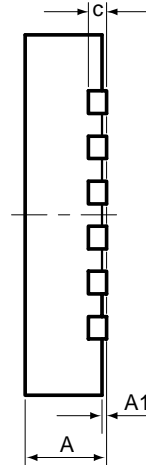
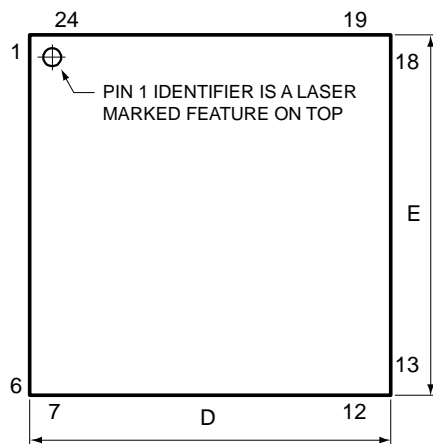
The diagram below shows the orientation of the axes of sensitivity and the polarity of rotation. Note the pin 1 identifier (•) in the figure.



Orientation of Axes of Sensitivity and
Polarity of Rotation

11.2 Package Dimensions

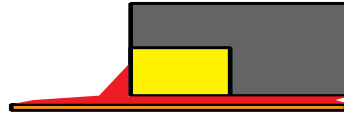
24 Lead QFN (4x4x0.9) mm NiPdAu Lead-frame finish



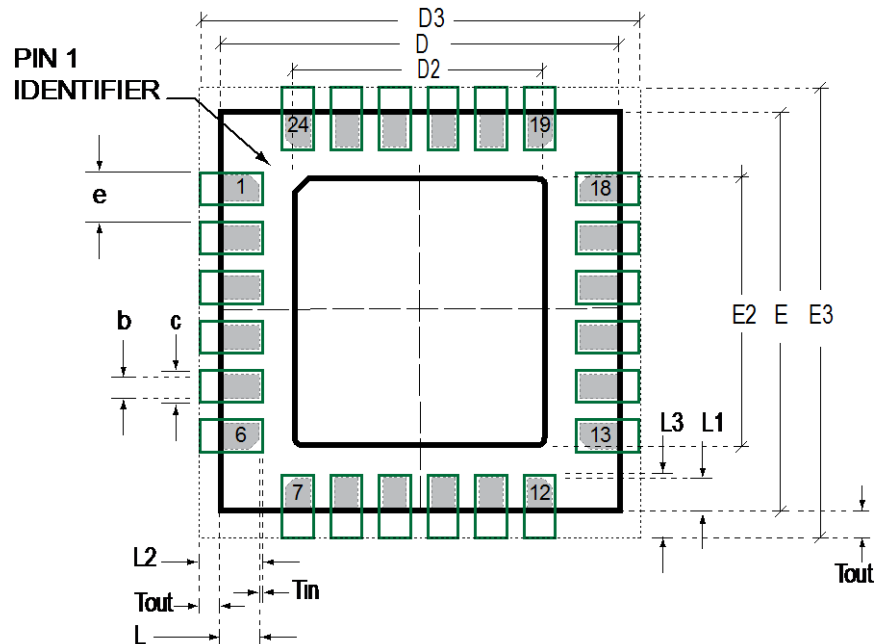
SYMBOLS	DIMENSIONS IN MILLIMETERS		
	MIN	NOM	MAX
A	0.85	0.90	0.95
A1	0.00	0.02	0.05
b	0.18	0.25	0.30
c	---	0.20 REF	---
D	3.90	4.00	4.10
D2	2.65	2.70	2.75
E	3.90	4.00	4.10
E2	2.55	2.60	2.65
e	---	0.50	---
f (e-b)	---	0.25	---
K	0.25	0.30	0.35
L	0.30	0.35	0.40
L1	0.35	0.40	0.45
s	0.05	---	0.15

11.3 PCB Design Guidelines

The Pad Diagram using a JEDEC type extension with solder rising on the outer edge is shown below. The Pad Dimensions Table shows pad sizing (mean dimensions) recommended for the MPU-60X0 product.



JEDEC type extension with solder rising on outer edge


PCB Layout Diagram

SYMBOLS	DIMENSIONS IN MILLIMETERS	NOM
Nominal Package I/O Pad Dimensions		
e	Pad Pitch	0.50
b	Pad Width	0.25
L	Pad Length	0.35
L1	Pad Length	0.40
D	Package Width	4.00
E	Package Length	4.00
D2	Exposed Pad Width	2.70
E2	Exposed Pad Length	2.60
I/O Land Design Dimensions (Guidelines)		
D3	I/O Pad Extent Width	4.80
E3	I/O Pad Extent Length	4.80
c	Land Width	0.35
Tout	Outward Extension	0.40
Tin	Inward Extension	0.05
L2	Land Length	0.80
L3	Land Length	0.85

PCB Dimensions Table (for PCB Lay-out Diagram)

11.4 Assembly Precautions

11.4.1 Gyroscope Surface Mount Guidelines

InvenSense MEMS Gyros sense rate of rotation. In addition, gyroscopes sense mechanical stress coming from the printed circuit board (PCB). This PCB stress can be minimized by adhering to certain design rules:

When using MEMS gyroscope components in plastic packages, PCB mounting and assembly can cause package stress. This package stress in turn can affect the output offset and its value over a wide range of temperatures. This stress is caused by the mismatch between the Coefficient of Linear Thermal Expansion (CTE) of the package material and the PCB. Care must be taken to avoid package stress due to mounting.

Traces connected to pads should be as symmetric as possible. Maximizing symmetry and balance for pad connection will help component self alignment and will lead to better control of solder paste reduction after reflow.

Any material used in the surface mount assembly process of the MEMS gyroscope should be free of restricted RoHS elements or compounds. Pb-free solders should be used for assembly.

11.4.2 Exposed Die Pad Precautions

The MPU-60X0 has very low active and standby current consumption. The exposed die pad is not required for heat sinking, and should not be soldered to the PCB. Failure to adhere to this rule can induce performance changes due to package thermo-mechanical stress. There is no electrical connection between the pad and the CMOS.

11.4.3 Trace Routing

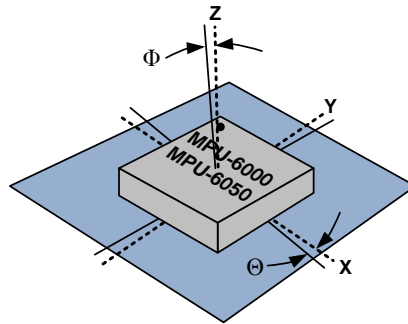
Routing traces or vias under the gyro package such that they run under the exposed die pad is prohibited. Routed active signals may harmonically couple with the gyro MEMS devices, compromising gyro response. These devices are designed with the drive frequencies as follows: X = $33\pm 3\text{KHz}$, Y = $30\pm 3\text{KHz}$, and Z = $27\pm 3\text{KHz}$. To avoid harmonic coupling don't route active signals in non-shielded signal planes directly below, or above the gyro package. Note: For best performance, design a ground plane under the e-pad to reduce PCB signal noise from the board on which the gyro device is mounted. If the gyro device is stacked under an adjacent PCB board, design a ground plane directly above the gyro device to shield active signals from the adjacent PCB board.

11.4.4 Component Placement

Do not place large insertion components such as keyboard or similar buttons, connectors, or shielding boxes at a distance of less than 6 mm from the MEMS gyro. Maintain generally accepted industry design practices for component placement near the MPU-60X0 to prevent noise coupling and thermo-mechanical stress.

11.4.5 PCB Mounting and Cross-Axis Sensitivity

Orientation errors of the gyroscope and accelerometer mounted to the printed circuit board can cause cross-axis sensitivity in which one gyro or accel responds to rotation or acceleration about another axis, respectively. For example, the X-axis gyroscope may respond to rotation about the Y or Z axes. The orientation mounting errors are illustrated in the figure below.



Package Gyro & Accel Axes (- - -) Relative to PCB Axes (———) with Orientation Errors (Θ and Φ)

The table below shows the cross-axis sensitivity as a percentage of the gyroscope or accelerometer's sensitivity for a given orientation error, respectively.

Orientation Error (θ or Φ)	Cross-Axis Sensitivity ($\sin\theta$ or $\sin\Phi$)
0°	0%
0.5°	0.87%
1°	1.75%

The specifications for cross-axis sensitivity in Section 6.1 and Section 6.2 include the effect of the die orientation error with respect to the package.

11.4.6 MEMS Handling Instructions

MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) are a time-proven, robust technology used in hundreds of millions of consumer, automotive and industrial products. MEMS devices consist of microscopic moving mechanical structures. They differ from conventional IC products, even though they can be found in similar packages. Therefore, MEMS devices require different handling precautions than conventional ICs prior to mounting onto printed circuit boards (PCBs).

The MPU-60X0 has been qualified to a shock tolerance of 10,000g. InvenSense packages its gyroscopes as it deems proper for protection against normal handling and shipping. It recommends the following handling precautions to prevent potential damage.

- Do not drop individually packaged gyroscopes, or trays of gyroscopes onto hard surfaces. Components placed in trays could be subject to g-forces in excess of 10,000g if dropped.
- Printed circuit boards that incorporate mounted gyroscopes should not be separated by manually snapping apart. This could also create g-forces in excess of 10,000g.
- Do not clean MEMS gyroscopes in ultrasonic baths. Ultrasonic baths can induce MEMS damage if the bath energy causes excessive drive motion through resonant frequency coupling.

11.4.7 ESD Considerations

Establish and use ESD-safe handling precautions when unpacking and handling ESD-sensitive devices.

- Store ESD sensitive devices in ESD safe containers until ready for use. The Tape-and-Reel moisture-sealed bag is an ESD approved barrier. The best practice is to keep the units in the original moisture sealed bags until ready for assembly.

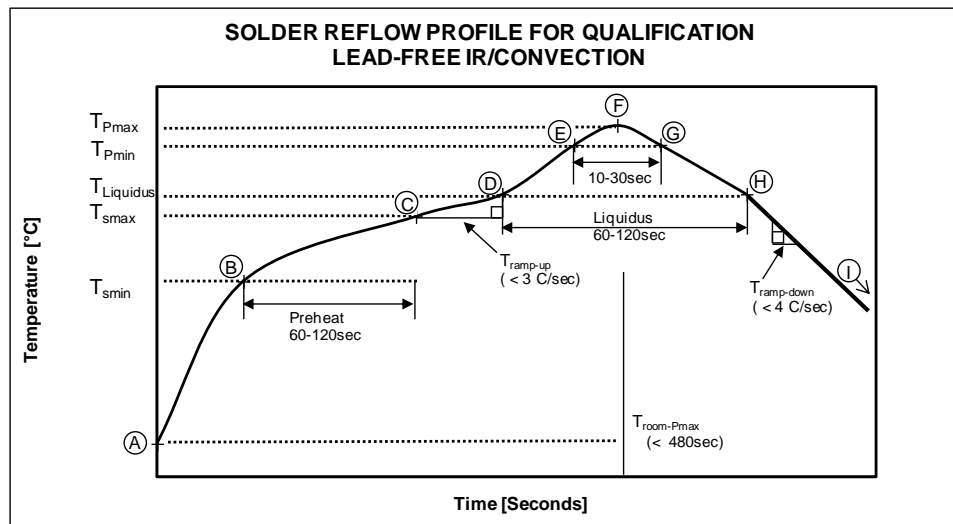
Restrict all device handling to ESD protected work areas that measure less than 200V static charge. Ensure that all workstations and personnel are properly grounded to prevent ESD.

11.4.8 Reflow Specification

Qualification Reflow: The MPU-60X0 was qualified in accordance with IPC/JEDEC J-STD-020D.1. This standard classifies proper packaging, storage and handling in order to avoid subsequent thermal and mechanical damage during the solder reflow attachment phase of PCB assembly.

The qualification preconditioning process specifies a sequence consisting of a bake cycle, a moisture soak cycle (in a temperature humidity oven), and three consecutive solder reflow cycles, followed by functional device testing.

The peak solder reflow classification temperature requirement for package qualification is (260 +5/-0°C) for lead-free soldering of components measuring less than 1.6 mm in thickness. The qualification profile and a table explaining the set-points are shown below:



Temperature Set Points Corresponding to Reflow Profile Above

Step	Setting	CONSTRAINTS		
		Temp (°C)	Time (sec)	Max. Rate (°C/sec)
A	T _{room}	25		
B	T _{Smin}	150		
C	T _{Smax}	200	60 < t _{BC} < 120	
D	T _{Liquidus}	217		r _(TLiquidus-TPmax) < 3
E	T _{Pmin} [255°C, 260°C]	255		r _(TLiquidus-TPmax) < 3
F	T _{Pmax} [260°C, 265°C]	260	t _{AF} < 480	r _(TLiquidus-TPmax) < 3
G	T _{Pmin} [255°C, 260°C]	255	10 < t _{EG} < 30	r _(TPmax-TLiquidus) < 4
H	T _{Liquidus}	217	60 < t _{DH} < 120	
I	T _{room}	25		

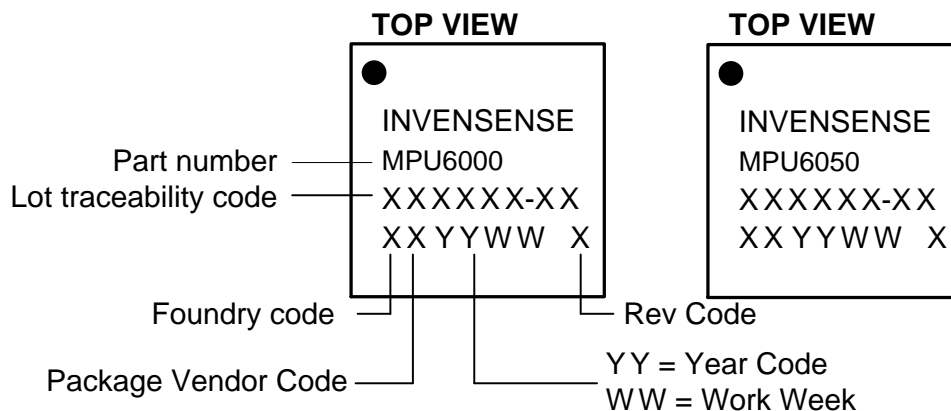
Notes: Customers must never exceed the Classification temperature (T_{Pmax} = 260°C).
 All temperatures refer to the topside of the QFN package, as measured on the package body surface.

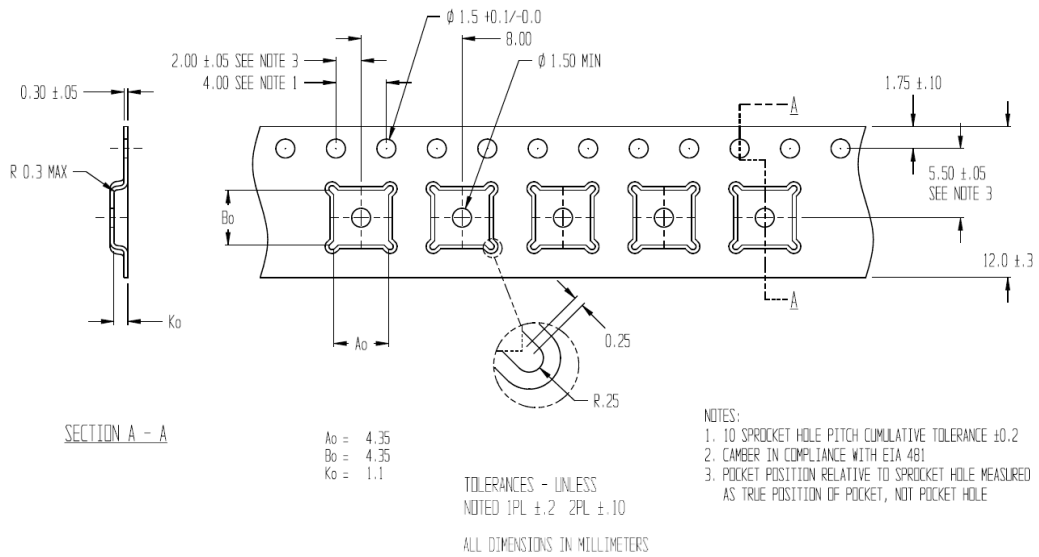
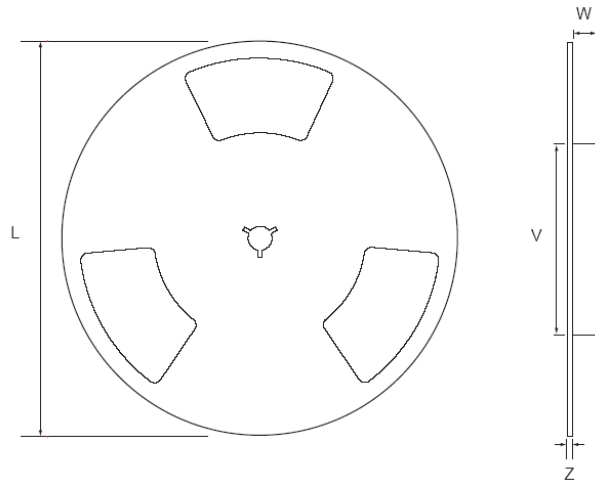
Production Reflow: Check the recommendations of your solder manufacturer. For optimum results, use lead-free solders that have lower specified temperature profiles (T_{pmax} ~ 235°C). Also use lower ramp-up and ramp-down rates than those used in the qualification profile. Never exceed the maximum conditions that we used for qualification, as these represent the maximum tolerable ratings for the device.

11.5 Storage Specifications

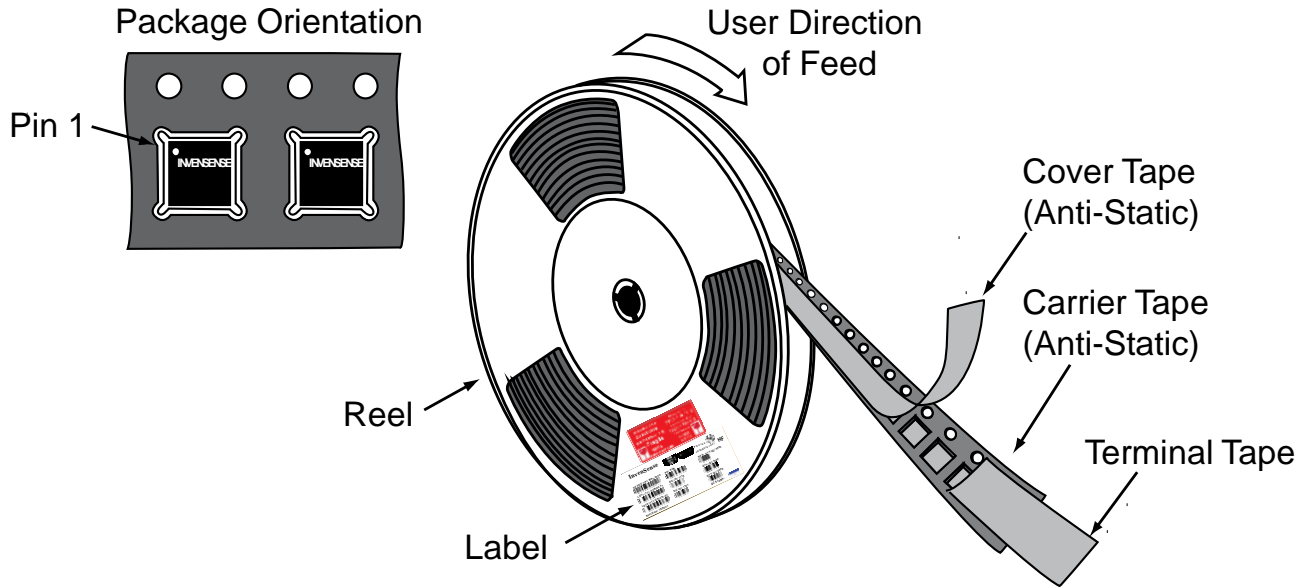
The storage specification of the MPU-60X0 conforms to IPC/JEDEC J-STD-020D.1 Moisture Sensitivity Level (MSL) 3.

Calculated shelf-life in moisture-sealed bag	12 months -- Storage conditions: <40°C and <90% RH
After opening moisture-sealed bag	168 hours -- Storage conditions: ambient ≤30°C at 60%RH

11.6 Package Marking Specification

Package Marking Specification

11.7 Tape & Reel Specification

Tape Dimensions

Reel Outline Drawing
Reel Dimensions and Package Size

PACKAGE SIZE	REEL (mm)			
	L	V	W	Z
4x4	330	102	12.8	2.3



Tape and Reel Specification

Reel Specifications

Quantity Per Reel	5,000
Reels per Box	1
Boxes Per Carton (max)	5
Pcs/Carton (max)	25,000

11.8 Label



Barcode Label



Location of Label on Reel

11.9 Packaging



REEL – with Barcode & Caution labels



Vacuum-Sealed Moisture Barrier Bag with ESD, MSL3, Caution, and Barcode Labels



MSL3 Label



Caution Label



ESD Label



Inner Bubble Wrap



Pizza Box



Pizza Boxes Placed in Foam-Lined Shipper Box



Outer Shipper Label



MPU-6000/MPU-6050 Product Specification

Document Number: PS-MPU-6000A-00
Revision: 3.4
Release Date: 08/19/2013

11.10 Representative Shipping Carton Label

		INV. NO: 111013-99	
From: InvenSense Taiwan, Ltd. 1F, 9 Prosperity 1st Road, Hsinchu Science Park, HsinChu City, 30078, Taiwan TEL: +886 3 6686999 FAX: +886 3 6686777		Ship To: Customer Name Street Address City, State, Country ZIP Attn: Buyer Name Phone: Buyer Phone Number	
SUPP PROD ID: MPU-6050			
LOT#: Q2R994-F1		LOT#:	
QTY: 5615		QTY: 0	
LOT#: Q3X785-G1		LOT#:	
QTY: 4385		QTY: 0	
LOT#: Q3Y196-02		LOT#:	
QTY: 5000		QTY: 0	
LOT#:		LOT#:	
QTY: 0		QTY: 0	
Total Quantity/Carton 15000		Weight: (KG) 4.05	
Pb-free	Shipping Carton:	Category (e4) HF	
	1	3	



12 Reliability

12.1 Qualification Test Policy

InvenSense's products complete a Qualification Test Plan before being released to production. The Qualification Test Plan for the MPU-60X0 followed the JESD471 Standards, "Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits," with the individual tests described below.

12.2 Qualification Test Plan

Accelerated Life Tests

TEST	Method/Condition	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
(HTOL/LFR) High Temperature Operating Life	JEDEC JESD22-A108D, Dynamic, 3.63V biased, $T_j > 125^\circ\text{C}$ [read-points 168, 500, 1000 hours]	3	77	(0/1)
(HAST) Highly Accelerated Stress Test ⁽¹⁾	JEDEC JESD22-A118A Condition A, 130°C , 85%RH, 33.3 psia. unbiased, [read-point 96 hours]	3	77	(0/1)
(HTS) High Temperature Storage Life	JEDEC JESD22-A103D, Cond. A, 125°C Non-Bias Bake [read-points 168, 500, 1000 hours]	3	77	(0/1)

Device Component Level Tests

TEST	Method/Condition	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
(ESD-HBM) ESD-Human Body Model	JEDEC JS-001-2012, (2KV)	1	3	(0/1)
(ESD-MM) ESD-Machine Model	JEDEC JESD22-A115C, (250V)	1	3	(0/1)
(LU) Latch Up	JEDEC JESD-78D Class II (2), 125°C ; $\pm 100\text{mA}$	1	6	(0/1)
(MS) Mechanical Shock	JEDEC JESD22-B104C, Mil-Std-883, Method 2002.5, Cond. E, $10,000g's$, 0.2ms, $\pm X, Y, Z - 6$ directions, 5 times/direction	3	5	(0/1)
(VIB) Vibration	JEDEC JESD22-B103B, Variable Frequency (random), Cond. B, 5-500Hz, X, Y, Z - 4 times/direction	3	5	(0/1)
(TC) Temperature Cycling ⁽¹⁾	JEDEC JESD22-A104D Condition G [-40°C to $+125^\circ\text{C}$], Soak Mode 2 [5'], 1000 cycles	3	77	(0/1)

Board Level Tests

TEST	Method/Condition	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
(BMS) Board Mechanical Shock	JEDEC JESD22-B104C, Mil-Std-883, Method 2002.5, Cond. E, $10000g's$, 0.2ms, $\pm X, Y, Z - 6$ directions, 5 times/direction	1	5	(0/1)
(BTC) Board Temperature Cycling ⁽¹⁾	JEDEC JESD22-A104D Condition G [-40°C to $+125^\circ\text{C}$], Soak mode 2 [5'], 1000 cycles	1	40	(0/1)

(1) Tests are preceded by MSL3 Preconditioning in accordance with JEDEC JESD22-A113F



13 Environmental Compliance

The MPU-6000/MPU-6050 is RoHS and Green compliant.

The MPU-6000/MPU-6050 is in full environmental compliance as evidenced in report HS-MPU-6000, Materials Declaration Data Sheet.

Environmental Declaration Disclaimer:

InvenSense believes this environmental information to be correct but cannot guarantee accuracy or completeness. Conformity documents for the above component constitutes are on file. InvenSense subcontracts manufacturing and the information contained herein is based on data received from vendors and suppliers, which has not been validated by InvenSense.

This information furnished by InvenSense is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by InvenSense for its use, or for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications are subject to change without notice. InvenSense reserves the right to make changes to this product, including its circuits and software, in order to improve its design and/or performance, without prior notice. InvenSense makes no warranties, neither expressed nor implied, regarding the information and specifications contained in this document. InvenSense assumes no responsibility for any claims or damages arising from information contained in this document, or from the use of products and services detailed therein. This includes, but is not limited to, claims or damages based on the infringement of patents, copyrights, mask work and/or other intellectual property rights.

Certain intellectual property owned by InvenSense and described in this document is patent protected. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of InvenSense. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. Trademarks that are registered trademarks are the property of their respective companies. InvenSense sensors should not be used or sold in the development, storage, production or utilization of any conventional or mass-destructive weapons or for any other weapons or life threatening applications, as well as in any other life critical applications such as medical equipment, transportation, aerospace and nuclear instruments, undersea equipment, power plant equipment, disaster prevention and crime prevention equipment.

InvenSense® is a registered trademark of InvenSense, Inc. MPU™, MPU-6000™, MPU-6050™, MPU-60X0™, Digital Motion Processor™, DMP™, Motion Processing Unit™, MotionFusion™, MotionInterface™, MotionTracking™, and MotionApps™ are trademarks of InvenSense, Inc.

