

Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Sistema de reciclaje de plástico para la fabricación de filamento  
para impresión en 3D**

Andrés Guzmán Toledo  
201224034

Cartago, 02 de junio del 2017



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

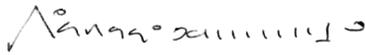
Andrés Guzmán Toledo  
Cartago, 02 de junio de 2017  
Cédula: 8-0109-0815



Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica  
Proyecto de Graduación  
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Ignacio del Valle Granados  
Profesor Lector



Ing. Carlos Piedra Santamaría  
Profesor Lector



M.Sc.Eng. Luis Diego Murillo Soto  
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 09 de junio de 2017.



## Resumen

Se presenta el desarrollo de un sistema de reciclaje de plástico para la fabricación de filamento para impresión en 3D. El mismo se desarrolló en las instalaciones de National Instruments, Heredia, Costa Rica haciendo uso de su software y hardware para la solución.

El desarrollo de este proyecto se apoyó en la literatura de esfuerzos similares que se han producido dentro del movimiento “maker” para obtener filamento a precios mínimos y así reducir costos en sus desarrollos. Asimismo, esta vertiente de investigación ha sido recogida por la academia pues se ha demostrado que el reciclaje de plástico distribuido puede ser mejor frente al reciclaje tradicional pues acelera la innovación, el aprendizaje, es ecológicamente más beneficioso y comercialmente rentable. [1] [2] [3] [4]

**Palabras claves:** impresión en 3D, manufactura aditiva, reciclaje de plástico, National Instruments, LabVIEW, filamento.

## Abstract

This document presents the development of a plastic recycling system for 3D printed filament fabrication. The same was developed at National Instruments, Heredia, Costa Rica installations using their software and hardware for the development of the solution.

The development of the project was based on previous research made by the maker community in an effort to find new ways to obtain 3D printing filament with low or no cost to supply their creations. These efforts were also picked up by the academy and they have demonstrated that distributed plastic recycling can be better than traditional recycling because it accelerates innovation, learning, is ecology speaking more desirable and commercially profitable.  
[1] [2] [3] [4]

**Palabras claves:** 3D printing, additive manufacturing, plastic recycling, National Instruments, LabVIEW, filament.

## **Dedicatoria**

a Dios, a mi querida familia y  
a quien pueda ayudar con estas herramientas...

## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a los ingenieros de National Instruments que me dieron la oportunidad de aplicar mis conocimientos, llegué buscando una oportunidad para hacer el proyecto de graduación y encontré mucho más. Gracias particularmente a Migue, Luis, David y Randy por el seguimiento y todo el apoyo.

También quisiera agradecer a mi profesor asesor Luis Diego Murillo por el sobresaliente apoyo y todo el tiempo invertido.

# Contenido

Dedicatoria .....	I
Agradecimientos .....	II
Tabla de figuras .....	V
Tabla de ecuaciones .....	VII
<b>I Capítulo.....</b>	<b>1</b>
1.1 Entorno del Proyecto.....	1
1.2 Definición del problema .....	3
1.2.1 Generalidades .....	3
1.2.2 Síntesis del problema .....	3
1.3 Enfoque de la solución.....	4
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos .....	5
1.5 Alcances y limitaciones.....	6
<b>II Capítulo.....</b>	<b>7</b>
2.1 De polímero a plástico.....	8
2.2 Temperatura de transición vítrea.....	9
2.3 Efectos del reciclaje sobre termoplásticos .....	10
2.4 Propiedades del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).....	11
2.5 Pre proceso de triturado.....	12
2.6 Conducción térmica.....	17
2.7 Medición térmica .....	18
2.8 Sistema de Control .....	19
<b>III Capítulo.....</b>	<b>20</b>
3.1 Subsistema de fundido .....	20
3.2 Componentes asociados .....	22
3.3 Subsistema de extruido .....	25
3.4 Subsistema de programación.....	27
3.5 Subsistema electrónico de control y potencia.....	28
<b>IV Capítulo .....</b>	<b>30</b>
4.1 Juego Mecánico.....	31
4.2 Dilatación de Área .....	33
4.3 Resistencia eléctrica .....	34
4.3.1 Función de transferencia.....	36
4.3.2 Pruebas de Control .....	38
4.4 Motor de extrusión .....	44
4.4.1 Sistema de protección .....	46
4.5 Tornillo sin fin .....	47
4.6 Termocupla.....	49
4.6.1 Función de transferencia.....	51
4.7 Diagrama eléctrico .....	53
4.8 Diagrama de Flujo .....	54

<b>V Capítulo .....</b>	<b>56</b>
5.1 Prueba #1 – Verificación de diámetro.....	56
5.2 Prueba #2 – Comparación de impresiones.....	58
5.3 Prueba #3 – Módulo de Young .....	59
<b>VI Capítulo .....</b>	<b>61</b>
6.1 Presupuesto .....	61
6.2 Análisis económico.....	62
<b>VII Capítulo .....</b>	<b>64</b>
7.1 Conclusiones .....	64
7.2 Resultados .....	64
7.3 Recomendaciones .....	65
<b>Bibliografía.....</b>	<b>66</b>
Anexo A. Carta de aceptación.....	70
Anexo B. Hoja de Información del Proyecto .....	71
Anexo C. Carta de entendimiento .....	72
Anexo D. Tipos de plásticos y cómo reconocerlos.....	73
Anexo E. Configuración del ordenador y de NI MAX .....	74
Anexo F. Datos de caracterización de calentador .....	75
Anexo G. Datos de caracterización de termocupla.....	83
Anexo H. Planos mecánicos .....	90
Anexo I. Subsistema de programación .....	98
Apéndice A. Hoja de datos de filamento .....	104
Apéndice B. Hoja de datos de motor GF-ZY45 DC .....	105
Apéndice E. Hojas de datos cDAQ 9178.....	106
Apéndice F. Hojas de datos NI 9211 .....	116
Apéndice G. Hojas de datos NI 9481 .....	131
Apéndice H. Hojas de datos de resistencia eléctrica .....	151

## Tabla de figuras

Figura 1. Estados de transición de polímeros. Tomada de [15].....	9
Figura 2. Prueba de tracción. Tomada de [17].....	10
Figura 3. Extrusora de plástico industrial. Tomada de [20].....	12
Figura 4. Diseño de un triturador personal de plásticos. Tomada de [22].....	13
Figura 5. Trituradora para compost hecha en impresión en 3D. Tomada de [24].....	14
Figura 6. Dimensiones para un diseño de trituradora de plástico personal. Tomada de [17].....	16
Figura 7. Clasificación de sensores de temperatura pirómetros de radiación. Tomado de [28]..	23
Figura 8. Esquema de composición de una termocupla. Tomada de [29].....	23
Figura 9. Identificación de tipos de termocuplas. Tomada de [29].....	24
Figura 10. Extrusora de plástico industrial. Tomada de [32].....	25
Figura 11. Corte vertical de un sistema de extrusión. Tomada de [33].....	26
Figura 12. Sección de código que ejemplifica un lenguaje gráfico.....	27
Figura 13. Chassis NI cDAQ-9178. Tomado de [34].....	28
Figura 14. Módulo NI-9481. Tomado de [35].....	28
Figura 15. Módulo NI-9211. Tomado de [36].....	29
Figura 16. Modelo en 3D de sistema de extrusión.....	30
Figura 17. Sistema de reciclaje de plástico.....	30
Figura 18. Corte transversal del cañón y tornillo sin fin.....	31
Figura 19. Diferentes tornillos sin fin utilizados.....	32
Figura 20. Resistencia eléctrica.....	34
Figura 21. Resistencia eléctrica utilizada durante el proyecto.....	35
Figura 22. Características de una curva de reacción. Obtenida de [37].....	36
Figura 23. Respuesta de la resistencia eléctrica frente a la entrada escalón de alimentación.....	36
Figura 24. Relay mecánico. Tomada de [38].....	38
Figura 25. VI de PID. Tomada de [39].....	39
Figura 26. Control PID implementado en la lógica de programación.....	39
Figura 27. Descripción de entradas y salidas de la función PID.....	39
Figura 28. Paleta de funciones PID.....	40
Figura 29. Variación de TC utilizando PID.....	
Figura 30. Variación de TC utilizando ON/OFF.....	41
Figura 31. Modelado de un motor CD. Tomado de [33].....	42
Figura 32. Especificaciones de tiempo de respuesta de módulo 9481. Tomada de [35].....	42
Figura 33. Grafica de tiempo estimado de respuesta del relay.....	42
Figura 34. Oscilación de temperaturas con controlador ON/OFF.....	43
Figura 35. Motor de extrusión utilizado.....	44
Figura 36. Corriente del motor al iniciar	
Figura 37. Corriente del motor al arrancar	
Figura 38. Corriente del motor promedio.....	45
Figura 39. Sistema de protección frente al encendido en frío.....	46
Figura 40. Problema en longitud del tornillo sin fin.....	47
Figura 41. Sistema con espaciadores.....	47
Figura 42. Espaciadores en el sistema.....	48
Figura 43. Errores asociados a termocupla tipo K. Tomada de [42].....	50
Figura 44. Termocupla utilizada.....	50

Figura 45. Respuesta de la termocupla frente a la entrada escalón de temperatura.....	51
Figura 46. Diagrama de flujo. Hecho por mi autoría en Excel 2016. ....	55
Figura 47. Diámetro de una muestra de 1 metro de filamento extruido. ....	56
Figura 48. Filamento extruido comparado con filamento comercial. ....	57
Figura 49. Cubos impresos: cubo izquierdo es filamento comercial y derecho filamento extruido. .....	58
Figura 50. Prueba #3 para medición de módulo de Young.....	60

## Tabla de ecuaciones

Ecuación 1. Estructura química de una molécula de etileno. Obtenida de .....	8
Ecuación 2. Estructura química del polietileno .....	8
Ecuación 3. Difusividad térmica de un material. ....	17
Ecuación 4. Control PID .....	19
Ecuación 5. Relación entre radio y diámetro. ....	31
Ecuación 6. Área de un círculo. ....	32
Ecuación 7. Coeficiente de dilatación térmica del área .....	33
Ecuación 8. Área final después de aplicar los coeficientes de dilatación .....	33
Ecuación 9. Longitud final luego de aplicar los coeficientes de dilatación.....	33
Ecuación 10. Función de transferencia de primer orden más tiempo muerto. Obtenida de [37]..	37
Ecuación 11. Constante $K_p$ . Obtenida de [37].....	37
Ecuación 12. Constante $T$ . Obtenida de [37] .....	37
Ecuación 13. Constante $L$ . Obtenida de [37] .....	37
Ecuación 14. Función de transferencia del calentador.....	37
Ecuación 15. Modelo de un motor como carga inductiva. Tomado de [40].....	42
Ecuación 16. Función de transferencia de termocupla .....	52
Ecuación 17. Error porcentual por eje .....	58
Ecuación 18. Error total .....	58
Ecuación 19. Módulo de Young. ....	59
Ecuación 20. Cálculo de punto de equilibrio.....	63



# I Capítulo

## 1.1 Entorno del Proyecto

Una preocupación del mundo moderno es la alta contaminación causada por el desecho de plásticos:

“Más de 300 millones de toneladas de plástico son producidos anualmente en el mundo y al menos un 15% de este volumen es de deposición inmediata, es decir, productos que son desechados dentro de un año de su compra.” [5]

Alrededor del mundo, países luchan con iniciativas que van desde prohibir el uso del plástico de desecho inmediato como exigir que el plástico utilizado cumpla con características de biodegradación en un tiempo aceptable. Aunque Costa Rica ha buscado posicionarse a nivel mundial por su protección del medio ambiente y gran biodiversidad. Esta imagen internacional se puede ver seriamente amenazada a causa del mal manejo de los desechos sólidos que actualmente experimenta el país. [6] [7]

Para buscar soluciones a estos retos, el ser humano siempre se ha apoyado en importantes aliados como la ciencia y la tecnología. De esta manera, si es posible darles un propósito productivo a materiales previamente considerados desechos, se podría reducir el impacto ambiental de la actividad humana y beneficiar las actividades productivas.

Alzando la mirada hacia el panorama tecnológico, se puede reconocer una tecnología que está en boga la cual es la manufactura aditiva mejor conocida como impresión en 3D. Esta colabora en campos tan diversos como lo son el prototipado funcional, el diseño creativo, la educación, procesos de manufactura, etc. Aunque es una tecnología que ha existido por años, su creciente uso se debe en mayor medida por las mejoras tecnológicas en capacidades y también por el constante descenso en los costos de adquisición.

Para esta tecnología, uno de los costos más importantes es el costo de la materia prima. Debido a que se debe utilizar un material especial para cada impresora, los costos pueden variar enormemente pero siempre son un porcentaje considerable de la manufactura. En la actualidad es posible imprimir con más de 300 tipos de materiales de los cuales los derivados del plástico tienen un papel protagónico en las impresoras de uso personal. [8]

Una aproximación a la solución para los anteriores problemas es trabajar con plásticos de desecho, para ser capaces de producir la materia prima para la impresión en 3D. De hecho, investigaciones revelan que es más eficiente el reciclaje distribuido, es decir en los hogares, que comparado con el reciclaje a gran escala debido al impacto del traslado del material energéticamente y en la producción de gases de efecto invernadero. [9]

Financieramente se busca que sea un proyecto asequible para la implementación personal y que las soluciones utilicen plásticos de uso común. En el aspecto de higiene ocupacional se tiene el conocimiento que trabajar con la transformación de materiales plásticos es perfectamente seguro si se trabaja en la zona de derretimiento y no se llega al punto de quemado, si se llega el segundo se puede exponer a humos tóxicos. Según se ha investigado, "este es el mismo criterio que se utiliza en la industria." [10]

El presente proyecto se va a desarrollar dentro de la empresa National Instruments. La misma es una empresa productora de equipos de automatización, instrumentos de medición y software. Algunas áreas que integran el campo de actuación son la adquisición de datos, instrumentos de control y sistemas de visión.

Dentro de su quehacer en Costa Rica está la presentación de sus equipos y soluciones al mercado. Por ejemplo, CompactDAQ es una plataforma robusta y portátil que integra conectividad y acondicionamiento de señales tanto de entrada como de salida y permite conectar cualquier sensor o señal. Es utilizado como registro de datos portátiles hasta para investigación de laboratorio. Otro producto es el software LabVIEW que permite el desarrollo de soluciones ingenieriles con alta productividad por medio de una sintaxis de programación gráfica.

Es de interés de National Instruments desarrollar un sistema que permita atender una problemática actual, haciendo uso de los equipos propios de la compañía.

## **1.2 Definición del problema**

### **1.2.1 Generalidades**

La contaminación de bosques, ríos y mares tienen un impacto enorme en el medio ambiente y la actividad humana. Sumado a esto la impresión en 3D es una herramienta muy útil para el prototipado funcional, el diseño creativo, la educación, procesos de manufactura, etc. Es por eso que es necesario buscar formas para darle utilidad al plástico generado por las actividades humanas para así generar beneficios económicos y ambientales.

Una solución que tiene un impacto en el aprovechamiento de materia podría ser el desarrollo de un sistema de reciclaje de plástico para la fabricación de filamento para impresión en 3D haciendo uso de los equipos de National Instruments.

Particularmente la empresa está interesada en utilizar la plataforma CompactDAQ para el manejo de las señales de entrada y las señales de salida para los actuadores y el software de programación gráfica LabVIEW para demostrar las capacidades de sus productos y contribuir con la solución de una problemática mundial.

### **1.2.2 Síntesis del problema**

¿De qué manera se puede utilizar productos de National Instruments para transformar el plástico de desecho en materia prima para la impresión en 3D?

### 1.3 Enfoque de la solución

Durante el desarrollo de este proyecto, se pretende dar respuesta al reto de transformar el plástico de desecho casero en materia prima para la manufactura aditiva o mejor conocida como la impresión en 3D. Para resolver esta problemática, se va a diseñar un sistema mecatrónico que permita la transformación de dicho material.

A grandes rasgos, las principales etapas de proceso de reciclaje de plástico para la fabricación de filamento para la impresión en 3D son las siguientes: [11]

1. Recolección de desechos plásticos deseados
2. Limpieza, cortado y triturado
3. Derretimiento y extrusión de filamento para impresión en 3D
4. Impresión en 3D.

Debido a la gran cantidad de tipos de plásticos, se limitará este proyecto a un plástico que actualmente se utilizan para la impresión en 3D y sigue siendo desecho: el acrilonitrilo butadieno estireno también conocidos como ABS por sus siglas en inglés. [12]

El desarrollo del proyecto propiamente se centrará en la tercera etapa pues son las relacionadas con los retos ingenieriles presentados en la definición del problema. Dicho desarrollo se logrará a través de la integración de los siguientes subsistemas.

- Subsistema de Fundido: Dicho subsistema comprende las piezas que permiten el incremento y la transmisión de calor del subsistema al material en cuestión. Su finalidad es llevar el material de estado sólido a estado semi-líquido.
- Subsistema de Extruido: El subsistema mecánico se encarga de transportar las hojuelas de la tolva a través del cañón por medio del tornillo sin fin, asimismo se encarga de bombear la mezcla a través del dado dándole la forma final deseada.
- Subsistema eléctrico de control: Se encarga de recibir las señales de los sensores que servirán como variables de control, así como también controlar la respuesta del controlador para manipular el sistema de potencia.
- Subsistema eléctrico de potencia: Es el subsistema eléctrico que entrega la potencia a los actuadores electromecánicos de potencia, llámense motores y calentadores.
- Subsistema de programación y control digital: Es la lógica de control, los cálculos, la manipulación de las variables, y todas las operaciones relacionadas a la programación del subsistema de control por medio del software.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

- Desarrollar un sistema mecatrónico para la producción de filamento para impresión en 3D a partir de desechos plásticos de tipo ABS utilizando equipo de National Instruments.

### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar un sistema mecatrónico para la producción de filamento para impresión en 3D a partir de desechos plásticos de tipo ABS utilizando equipo de National Instruments.
  - a. **Entregable:** Diagrama del sistema mecatrónico con el desarrollo de los subsistemas.
2. Integrar sensores y actuadores a un sistema de adquisición de datos utilizando la plataforma CompactDAQ.
  - a. **Entregable:** Sistema de adquisición de datos de las señales que servirán como variables: sensores de temperatura.
3. Programar en LabVIEW la lógica de control que permita controlar los actuadores del sistema.
  - a. **Entregable:** Programa en el entorno de desarrollo LabVIEW que controle los actuadores: motor y calentador.
4. Construir un prototipo de sistema mecatrónico que sea capaz de transformar desechos plásticos ABS en filamento para impresión en 3D.
  - a. **Indicador:** Prototipo que produzca filamento con un diámetro de 1.75mm con una tolerancia de  $\pm 0.3$ mm.
5. Comparar el precio de filamento producido contra uno adquirido comercialmente.
  - a. **Indicador:** un análisis del costo de producción del filamento que incluya: materia prima, consumo eléctrico y costo de la maquina absorbido un su ciclo de vida útil. Todo esto debe ser menor al costo comercial

## 1.5 Alcances y limitaciones

El presente trabajo busca aplicar todos los conocimientos teóricos y técnicos adquiridos durante el estudio de la carrera Ingeniería Mecatrónica. Esta experiencia de diseño se orientó a la solución de un problema muy concreto que se relacione con el campo de la Mecatrónica.

Tomando en cuenta las herramientas adquiridas durante la carrera, se desarrollaron los siguientes capítulos. De manera particular se ha hecho hincapié en los conocimientos adquiridos en los siguientes cursos:

- Tecnología de materiales: las bases de comprensión sobre los polímeros y cómo el tratamiento térmico puede degradar el material analizado.
- Dibujo Industrial: para realizar los diseños de planos mecánicos.
- Sensores y actuadores: adquisición de datos de sensores de temperatura y diseño de un sistema de automatización donde el actuador depende de los valores de los sensores.
- Control Automático: ecuaciones de modelado de sistemas.
- Mantenimiento de Sistemas Mecatrónicos: cálculo de costos y diseño del sistema tomando en cuenta las necesidades de mantenimiento.
- Diseño mecánico-Sistemas de Manufactura: los conocimientos de diseño asistido por computadora y las consideraciones de fuerzas.
- Formulación de proyectos: aplicación de las técnicas de programación y administración de proyectos.

Dentro de las limitaciones se reconoce que este no es un estudio exhaustivo sobre las posibilidades del reciclaje del plástico ni sobre la transformación de plástico en filamento para imprimir en 3D. Existen diferentes métodos de darle un valor agregado a este tipo de desecho y en definitiva la impresión en 3D, o también llamada manufactura aditiva, es todo un campo de estudio que permite muchas otras aproximaciones.

Además, el tipo de plástico que se utilizó es el ABS. En los desechos comunes es muy común observar botellas o desechos plásticos de tipo PET, LDPE, HDPE. Aunque no se estudió en el presente trabajo es perfectamente posible explorar estas posibilidades junto a muchos otros tipos de plásticos.

En definitiva, el presente trabajo es un diseño que puede sentar las bases para un trabajo futuro donde se planteen optimizaciones al diseño mecánico, eléctrico, tratamiento pre-procesado y al post-procesado.

## II Capítulo

### Marco Teórico

Aunque el reciclaje tiene una larga historia, es solo hasta una época relativamente reciente que la protección al medio ambiente y el manejo de residuos se han puesto como puntos importantes en el debate público y en la conciencia política. Por lo tanto, la limitación de desechos en los ríos y los botaderos han tomado asimismo un protagonismo en estas preocupaciones.

Sería difícil imaginarnos la sociedad moderna hoy sin plástico. El plástico se utiliza en campos tan diversos: desde productos para el hogar, en paquetería, construcción, medicina, electrónicos hasta componentes para carros y aviones. Es decir, la tecnología de los plásticos se puede aplicar con éxito en gran variedad de aplicaciones.

Una de las razones más importantes que han permitido al plástico reemplazar a materiales tradicionales como el metal, la madera y el vidrio es su habilidad de modificar las propiedades a una vasta capacidad de características según las necesidades del diseñador. Eso, sumado a la facilidad con el plástico puede ser procesado, hace de él un material ideal para la producción de componentes variados.

Los plásticos utilizados en muchas de los productos que vemos hoy en día son de grado llamado “virgen”. Estos materiales vienen directamente de un polímero del productor de la fábrica que anteriormente no hacían sido procesados. Cuando el producto adquirido viene de un polímero reprocesado estos son llamados reciclados. La gran mayoría de los plásticos no son reprocesados, simplemente se tiran a la basura, lo que ha generado problemas medioambientales. [13]

Un material se puede considerar reaprovechable si existe la tecnología que permita ese proceso y si existe un mercado que permita reutilizar ese material producido. Dentro de las diferentes categorías de lo que se podría considerar reaprovechamiento están: reutilizar, reciclaje mecánico, reciclaje químico y recuperación de energía:

- Reutilizar: el ejemplo más común de reutilizar son los vasos de vidrio, donde los líquidos vertidos no afectan que el recipiente se pueda lavar y volver a utilizar. Aunque es común ver la reutilización en vidrio no así es el mismo caso para los plásticos. Aunque existen numerosos plásticos utilizados en botellas de uso diario, en su mayoría las botellas producidas son de descarte inmediato.
- Reciclaje mecánico: también conocido como reciclaje físico. Es plástico es triturado en partes más pequeñas y luego reprocesado para producir un nuevo componente que puede o no tener el mismo fin original.
- Reciclaje químico: es cuando el polímero se descompone en petróleo e hidrocarbón para utilizar esa materia prima para la producción de un nuevo polímero.
- Recuperación de energía: es cuando el material es incinerado para recuperar parte de su energía interna.

## 2.1 De polímero a plástico

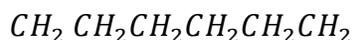
El plástico está hecho a partir de polímeros y otros materiales que se le agregan a los polímeros para dotarlo de características deseadas. Los polímeros toman su nombre de dos palabras griegas: poli, que significa muchos, y mero, que significa partes. Así que un polímero en realidad tiene muchas partes repetidas que forman una estructura común. El polímero se forma a partir de monómeros, como por ejemplo el etileno. La estructura química de una molécula de etileno es:

*Ecuación 1. Estructura química de una molécula de etileno. Obtenida de*



Es la existencia de los doble enlaces entre los átomos de carbono que permiten la creación de moléculas de muchos monómeros, en nuestro caso muchos etilenos son llamados polietileno.

*Ecuación 2. Estructura química del polietileno*



Una cadena de polímero puede consistir de 200-2000 monómeros unidos. Existen muchos mecanismos para formar polímeros. Sin entrar en detalle, unos polímeros conocidos a partir de dos mecanismos son:

*Tabla 1. Clasificación de formación de polímeros*

<b>Polímeros de monómeros insaturados</b>	<b>Polímeros condensados</b>
Polietileno (PE)	Nylon 66
Polipropileno (PP)	Tereftalato de polietileno (PET)
Poliestireno (PS)	Poliuretano (PU)

Los plásticos se pueden dividir en tres categorías principales basado tanto en su estructura molecular como en la forma de producirlos:

**Elastómero:** son plásticos que muestran un comportamiento elástico. También se les suele conocer como goma o hule.

**Termoestables:** son plásticos que una vez son procesados, no pueden ser reprocesados o derretidos para volverlos a dar forma. Esto se debe a que tienen un arreglo químico que les imposibilita fluir como los termoplásticos y cambiar de posición.

**Termoplásticos:** son los plásticos que pueden suavizarse a un cierto punto de temperatura y fluir, de manera que cuando se enfrían pueden tomar una forma distinta a la inicial.

## 2.2 Temperatura de transición vítrea

La temperatura donde un polímetro se suaviza se conoce como la temperatura de transición vítrea. Por encima de esta el polímetro tiene un comportamiento como un fluido gomoso y por debajo de esta el polímetro tiene un comportamiento como sólido vidrioso, ya que el movimiento molecular se ve restringido. [14]

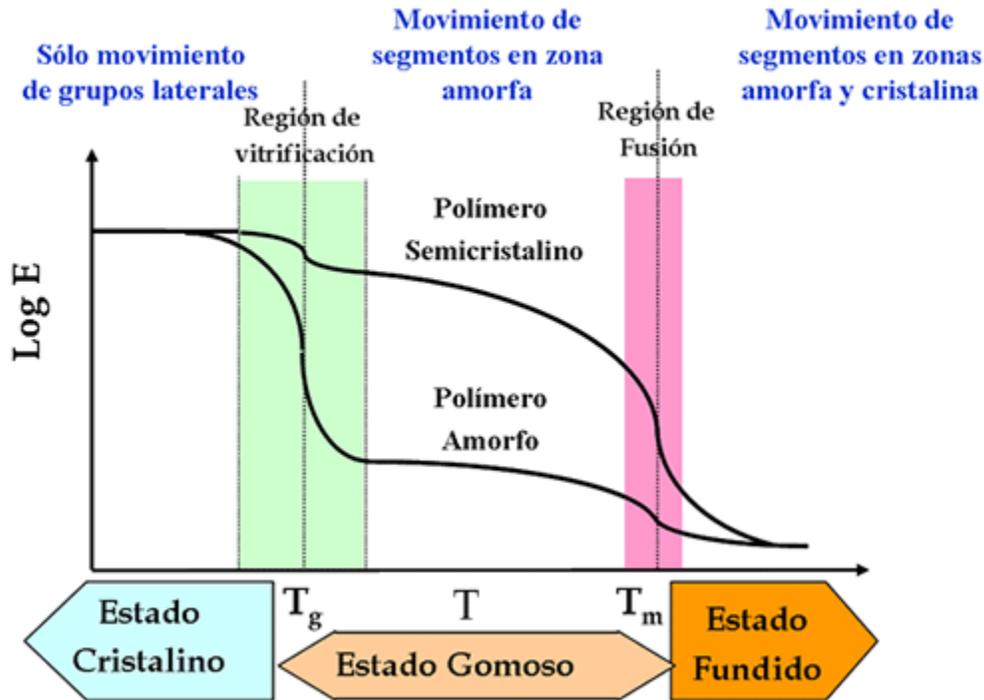


Figura 1. Estados de transición de polímeros. Tomada de [15]

Es la zona de estado gomoso donde los termoplásticos pueden adquirir nuevas formas y así reutilizarlos.

## 2.3 Efectos del reciclaje sobre termoplásticos

Para el proceso de reciclaje básicamente hablamos de tres procesos: deformación, calentamiento y transferencia de calor, cambios a la estructura y propiedades.

### Reología

La reología es el estudio de la deformación y el flujo. Cuando estudiamos el flujo, una propiedad muy importante es la viscosidad, la cual es la capacidad de un fluido a oponerse al movimiento.

En el caso de un fluido viscoso, este va a continuar deformándose siempre que haya esfuerzo aplicado en él. Por ejemplo, podemos hablar de pasta de dientes, miel cayendo con la gravedad o agua en un vaso de agua. De los anteriores ejemplos podemos observar que los polímeros son más viscosos que la mayoría de los líquidos y son más elásticos que la mayoría de los sólidos, lo cual le da propiedades muy interesantes para la manufactura. Sin embargo, según la literatura vamos a observar que conforme un polímero se degrada va perdiendo viscosidad. [16]

### Calor

Un termoplástico no fluye en su estado sólido, sino que comienza a fluir en su estado gomoso-semicristalino o ya cuando se encuentre fundido en su estado pseudolíquido. Para alcanzar estos estados es necesario elevar la temperatura del termoplástico más allá de su temperatura de fusión. Cuando la temperatura se eleva por encima del punto de fusión la viscosidad del termoplástico decrece a diferentes ritmos para diferentes materiales.

Si la temperatura sigue en constante aumento, eventualmente puede llegar a un punto donde se convierta en termo inestable. A partir de este punto comienza la degradación del termoplástico y comienza a perder muchas propiedades mecánicas como por ejemplo la viscosidad, resistencia y color

### Pruebas

Existen numerosas pruebas para medir los efectos químicos y mecánicos del reciclaje de termoplásticos. Una prueba muy común es la prueba de tensión. La misma consiste en aplicar una tensión axial a un material, normalmente una probeta estandarizada, para conocer el esfuerzo máximo, el límite de fluencia, el módulo de Young entre otros. [17]

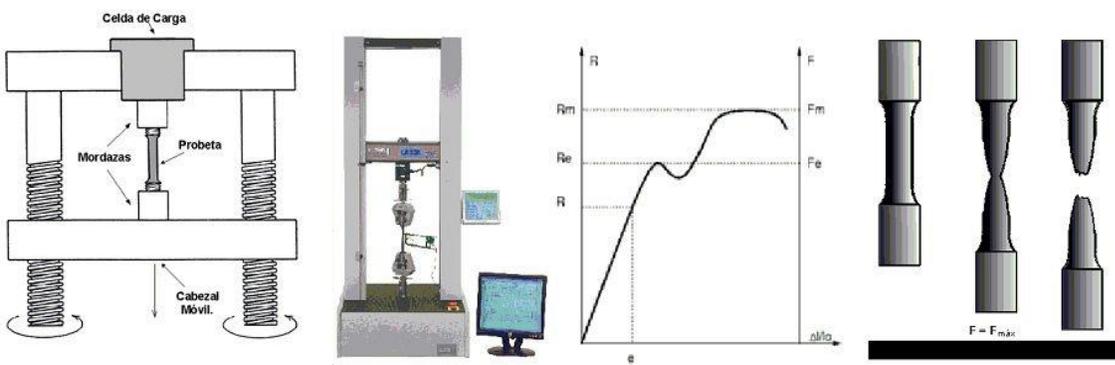


Figura 2. Prueba de tracción. Tomada de [17]

## 2.4 Propiedades del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Las propiedades del plástico ABS teóricas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Propiedades del ABS. Tomada de [18]

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Densidad	1.02 - 1.20	$g/cm^3$
Absorción de agua	0.25 – 1.00 %	–
Dureza Rockwell R	68.0 - 113	–
Dureza Identación de bola	65.0 - 110	$MPa$
Límite de fluencia	13.0 - 65.0	$MPa$
Resistencia a la tracción máximo	23.0 - 49.0	$MPa$
Módulo de elasticidad	1.00 - 2.65	$GPa$
Resistencia eléctrica	1.00e+9 - 1.00e+17	$\Omega/cm$
Conductividad térmica	0.150 - 0.200	$W/(m * K)$
Temperatura extrusión en dado	200 - 250	$^{\circ}C$

## 2.5 Pre proceso de triturado

Una trituradora de plástico es un mecanismo que corta elementos plásticos en piezas más pequeñas. Los diseños básicamente se componen de una boca de entrada más o menos grande, que permite el acceso a las piezas de plástico y un rotor que incorpora varias cuchillas que, gracias a la potencia y velocidad de giro, cortan y trituran las piezas de plástico. Después, pasa por un tamiz o por una rejilla que únicamente permite el paso a los trozos de un tamaño deseado. Por último, pasa a un depósito donde se almacena el producto. [19]



*Figura 3. Extrusora de plástico industrial. Tomada de [20]*

Algunas categorías de diseños son: molinos de martillos horizontales, molinos de martillos verticales, trituradoras de corte a velocidad lenta de diseño de un solo, doble, triple y cuádruple eje, molinos de un solo eje o de doble eje, granuladores, cuchillos, raspadores. [20]

De acuerdo a Glogowska y Rozpedowsk [21], uno de los modelos más sencillos que se utilizan para triturar plástico y requieren de poco mantenimiento es la trituradora de cuchilla de doble eje.

Dentro de los modelos observados durante la investigación, se escogieron tres para estudiar para una implementación en un futuro proyecto:

Tabla 3. Comparación de sistemas de triturado. Autoría de mi persona.

			
Diseño	Doble cuchilla vertical, motor horizontal	Doble cuchilla vertical, motor vertical	Doble cuchilla horizontal, eje horizontal manual
Costo	<u>\$6200</u>	<u>\$600</u>	<u>\$900</u>
Método	Venta - Importar	DIY - Construir	Venta - Importar
Valoración (1 peor – 3 mejor)			
Costo	1	2	3
Tiempo estim.	2	1	3
Potencia	3	2	1
Capacidad	3	2	1
Mantenimiento	2	1	3

*Nota: Clasificación donde 1 es el valor menos deseado y 3 la característica más deseada.*

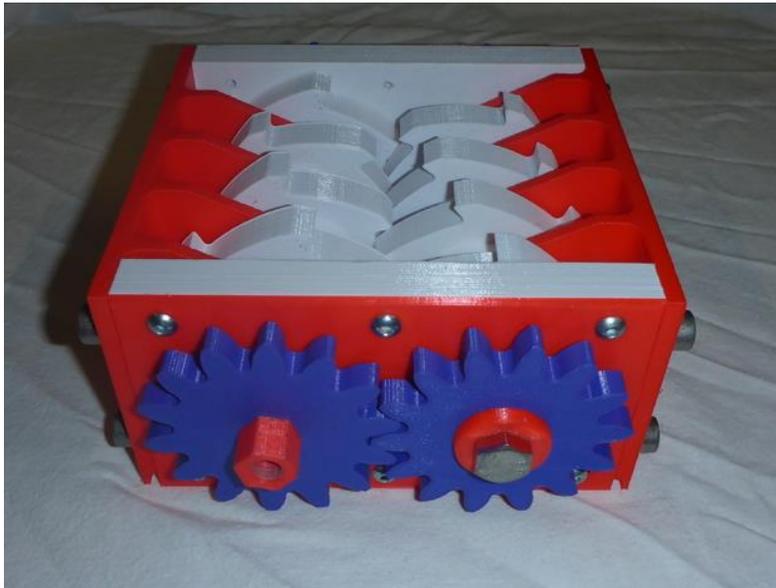
Por una simple valoración de criterios sin distinción de ponderación se recomienda desarrollar el tercer diseño porque se acerca más a las características deseadas. Sin embargo, se decide no desarrollar alguno de estos subsistemas sino utilizar plástico industrial como simulación y prueba conceptual de la tecnología. Esto debido a que aparte del tiempo se hubiera invertido desarrollando este sistema y no el que propiamente se dedica a reciclar plástico.



Figura 4. Diseño de un triturador personal de plásticos. Tomada de [22]

Figura 4 es Marcus Thymark, un diseñador alemán que en el 2012 liberó los planos de una mini trituradora open source que alcanzó gran popularidad. El año siguiente retiró los planos open source y convirtió la iniciativa en una empresa lucrativa llamada FilaMaker, donde busca desarrollar y vender el sistema completo de trituradora, extrusora y fundidora de plásticos. [23]

Se procedió a identificar distintos modelos y tipos de trituradoras industriales con el fin de conocer el funcionamiento e identificar las características que podrían hacer exitoso un modelo de menor tamaño. Aunque difícilmente se encuentran planos sobre de una trituradora de plásticos de tamaño personal, su interpretación o construcción a partir de imágenes es posible. Apoyándose en un diseño para una trituradora de alimentos para hacer compost, se encuentra un BOM (Bill of Materials o carta de materiales por sus siglas en inglés) y diseños para CAD.



*Figura 5. Trituradora para compost hecha en impresión en 3D. Tomada de [24]*

A partir de la imagen se podría diseñar la trituradora en 3D.

Tabla 4. BOM para una trituradora impresa en 3D. Tomada de [24]

Cantidad	Descripción
Para el eje:	
2	Tubo cuadrado 30x30x2mm, con largo 122mm
Para todas las demás partes:	
4	Tornillo M10x30
8	Tornillo M8x30mm
12	Tornillo M5x20mm
4	Cojinetes de bola (SKF 6006 ZZ o 2RS)
A imprimir o cortar:	
3	Tasas
2	Engrane piñón
2	Engrane piñón 15mm
2	Soporte para cojinetes
2	Soporte delgado para cojinetes
2	Pared
1	Para eje largo
2	Para eje 1
1	Para eje 2
8	Espaciadores
8	Cuchillas
4	Impresión
Partes para la agarradera	
1	Varilla roscada
2	Arandelas para tornillos
1	Agarre
1	Agarradera impresa en 3D
3	Tuerca 17

El mecanismo es de funcionamiento sencillo. La rotación de los ejes paralelos se realiza en sentidos opuestos, por tanto, engranes, ejes y cuchillas lo realizan de la misma manera. Este movimiento giratorio opuesto, junto al diseño de las cuchillas, provoca que los plásticos colocados en el centro de la trituradora se vean atrapados e impulsados a pasar en medio de las mismas. Pasar por espacios estrechos, así como un movimiento rotatorio y cuchillas en diferentes partes provocan la acción de triturar el plástico.

Posteriormente el resultado cae debajo de la trituradora en lo que debería ser una malla o rejilla para regular el grosor. Este grosor puede ser regulado si se vuelve a pasar material por la trituradora, se acercan los ejes de rotación o se hacen cuchillas más grandes o con menos espacio entre sí.

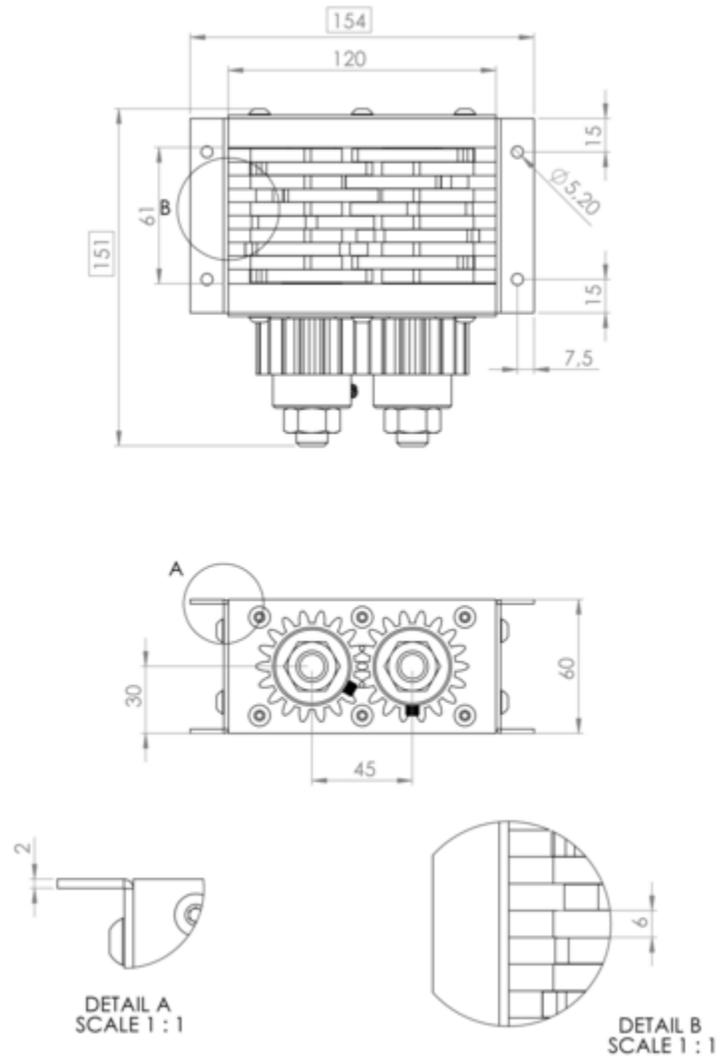


Figura 6. Dimensiones para un diseño de trituradora de plástico personal. Tomada de [17]

## 2.6 Conducción térmica

Si nos concentramos en la temperatura como variable solamente, la ventana donde se puede transformar los termoplásticos estaría definida por un límite inferior y otro superior. El límite inferior está definido por la llamada temperatura de transición vítrea que en realidad es un rango, y es donde se puede alcanzar el punto de fusión y viscosidad máxima. El límite superior se asocia con la temperatura de degradación térmica, donde el material comienza a perder sus propiedades a gran velocidad y puede degradarse en otros subcomponentes hasta no ser posible volver a juntarlos. [25]

La difusividad térmica de un material es la velocidad a la que la temperatura cambia dentro de una sustancia. Dicho de otra forma, es la tasa de cambio con que un material aumenta de temperatura, al ser puesto en contacto con una fuente de calor.

*Ecuación 3. Difusividad térmica de un material.*

$$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p}$$

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica;

Donde  $k$  es la conductividad térmica,

Donde  $\rho$  es la densidad,

Donde  $C_p$  es el calor específico,

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras, la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto. En el Sistema Internacional de Unidades la conductividad térmica se mide en  $W/(K \cdot m)$  (equivalente a  $J/(m \cdot s \cdot K)$ )

El calor específico es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad. De forma análoga, se define la capacidad calorífica como la cantidad de (calor) que se debe suministrar a toda la masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius). Se la representa como  $C_p$ .

Por lo tanto, la capacidad calorífica específica es el cociente entre la capacidad calorífica y la masa, esto:

*Ecuación 4. Capacidad calorífica específica de un material.*

$$c = \frac{C}{m}$$

## 2.7 Medición térmica

Para la lectura de la temperatura existen numerosos sensores, para efectos de esta investigación se analizaron los termopares/termocuplas, RTDs y termistores.

Los anteriores funcionan bajo el principio de que ciertos materiales responden de una manera predecible y mensurable a las variaciones de temperatura. En los tres casos, la respuesta medida es generalmente muy pequeña y, al igual que con todas las mediciones de bajo nivel, es difícil de medir con precisión y confiabilidad. Las capacidades adecuadas de acondicionamiento de señales en los componentes de hardware y software de su sistema de medición pueden simplificar en gran medida la tarea de medición de temperatura. Los siguientes tres requisitos son de suma importancia a la hora de realizar mediciones de temperatura:

### **Requisitos de acondicionamiento de señal**

#### **Filtración**

Las mediciones de temperatura se realizan a una cierta distancia del equipo de medición. Esto significa que, a través de la longitud del cable, el ruido del entorno operativo puede filtrarse en la señal analógica y conducir a mediciones inexactas. Para minimizar eso se debe tratar de reducir el tamaño del cable, también se puede aplicar un filtro de paso bajo a la señal entrante o incorporar uno en el hardware de medición para ayudar a eliminar las señales de alta frecuencia no deseadas.

En nuestro caso el módulo NI 9481 tiene un filtro de ruido al promediar las muestras tomadas.

#### **Aislamiento**

En su núcleo, los termopares, RTDs y termistores están hechos de conductores eléctricamente conductores materiales. Si no se toma el aislamiento en consideración, puede cablearse una medición que podría ser potencialmente peligrosa para el hardware de medición o para el usuario.

#### **Linealización**

La salida de voltaje por unidad de temperatura de un termopar, RTD o termistor no es una relación lineal. Debido a esto, no se puede simplemente aplicar un coeficiente de escala para convertir la tensión medida a una salida de temperatura significativa a través de toda la gama del par termoeléctrico.

## 2.8 Sistema de Control

Se hace un repaso de tres métodos de control utilizados comúnmente en la industria.

### Control PID

El controlador PID es un controlador donde la salida depende del error, es decir de la diferencia del valor deseado y el actual. Sin embargo, la salida se ajusta tomando en cuenta constantes proporcionales, derivativas e integrativas. El término derivativo considera la velocidad con la que el valor actual se acerca al valor deseado. El término integrativo depende del tiempo en que un error se ha mantenido durante el tiempo mientras que el término proporcional es linealmente relacionado con la diferencia del error para cada instante.

*Ecuación 4. Control PID*

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(T) dT + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

### Control Proporcional

Un controlador proporcional disminuye la potencia media suministrada al calentador a medida que la temperatura se aproxima al punto de ajuste. Esto tiene el efecto de ralentizar el motor o el calentador de modo que no sobrepasará el punto de ajuste, sino que se aproximará al punto de ajuste y mantendrá una velocidad o temperatura estable. La acción proporcional se produce dentro de una "banda proporcional" alrededor de la temperatura de consigna. Fuera de esta banda, el controlador funciona como una unidad de encendido / apagado, con la salida totalmente encendida (debajo de la banda) o completamente apagada (por encima de la banda). Sin embargo, dentro de la banda, la salida se activa y desactiva en la relación de la diferencia de medida con respecto a la consigna. Si la temperatura está más alejada de la consigna, los tiempos de encendido y apagado varían en proporción a la diferencia de temperatura. Si la temperatura está por debajo del punto de ajuste, la salida estará en más tiempo; Si la temperatura es demasiado alta, la salida se apagará más.

### Control de Encendido / Apagado

Un controlador de encendido y apagado es la forma más simple de dispositivo de control de temperatura. La salida del dispositivo está activada o desactivada, sin estado intermedio. Un controlador de encendido-apagado cambiará la salida sólo cuando la temperatura cruza el punto de ajuste. Para el control de la temperatura, la salida está encendida cuando la temperatura está por debajo del punto de consigna y por encima del punto de consigna. Puesto que la temperatura cruza el punto de ajuste para cambiar el estado de salida, la temperatura del proceso estará en continuo ciclo, pasando de debajo del punto de ajuste a arriba, y de vuelta abajo. Debido a que en este caso los ciclos no se producen rápidamente, no es necesario agregar un diferencial de encendido-apagado o "histéresis" a las operaciones del controlador. El control de encendido y apagado suele usarse cuando no es necesario un control preciso, en sistemas que no pueden manejar la energía encendida y apagada frecuentemente, donde la masa del sistema es tan grande que las temperaturas cambian muy lentamente, o para una alarma de temperatura.

### III Capítulo

#### Desarrollo de la solución – Elección de los componentes

En esta sección se detallará el proceso que se utilizó para obtener la solución final. Se desarrollará a partir de los cinco subsistemas que se identificaron al inicio del análisis del problema. Vale la pena destacar que se procuró presentar distintas opciones para cada componente-funcionalidad y se pretendió evaluar cuál era la más deseada.

#### 3.1 Subsistema de fundido

De los modelos observados durante la investigación, se analizaron dos:

Tabla 4. Comparación de calentadores comunes

		
Diseño	Lámina de calefacción	Calentador de banda
Costo	<u>\$37</u>	<u>\$40</u>
Método	Comprar - Importar	Compra
Costo	3	3
Tiempo estim.	2	3
Potencia	2	3
Capacidad	3	2
Mantenimiento	1	3

*Nota: Clasificación donde 1 es el valor menos deseado y 3 la característica más deseada.*

La transferencia de calor durante el fundido es un factor que debe considerarse en la transformación de plásticos. El flujo de calor se da a partir de una fuente de calor y parte en diferentes puntos del sistema hacia el material en cuestión de calentar y es un fenómeno complejo que depende de varios factores relacionados con el material que se está fundiendo y con los parámetros del recipiente y su proceso.

Por ejemplo, en la fundición de secciones delgadas, las velocidades del flujo del plástico deben ser lo suficientemente altas para evitar un enfriamiento y solidificación prematuro. Por otro lado, la temperatura no debe ser tan elevada como para provocar turbulencias excesivas, con sus efectos dañinos sobre en el proceso de fundición. [26]

Como el material en cuestión a calentar va a estar siendo extruido, este sistema nunca entrará en equilibrio térmico y siempre la transferencia de calor será de los calentadores al plástico. Por conducción se da una transferencia directa entre la energía de las partículas del calentador hacia el cañón y de ahí hacia el plástico en cuestión. El medio, que en nuestro caso va a comenzar siendo sólido, será calentado de manera proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo a través de una sección transversal. La cantidad de calor que se transfiere está dada por la conocida Ley de Fourier. [27]

### 3.2 Componentes asociados

En la actualidad existen distintos mecanismos para la medición de temperatura y dependen de la aplicación para la cual se emplearán. Dentro de esta clasificación se encuentran los sensores pirómetros de radiación, es decir los sensores que no entran en contacto con el medio cuya temperatura se quiere medir. A continuación, se muestra la siguiente tabla ejemplifica algunos tipos y características de algunos sensores:

*Tabla 5. Características comunes de sensores de temperatura. Tomado de [28].*

SENSOR	TERMOCUPLA	RTD	TERMISTOR
VENTAJAS	Simple	Más exacta	Señal de salida alta
	Robusta	Más estable	Rápida
	Económica	Más lineal que las termocuplas	Medición a dos hilos
	Diferentes formas		Más sensible
	Rangos altos de temperatura		
	No requiere fuente de poder		
DESVENTAJAS	No lineal	Costosa	No lineal
	Bajo voltaje (señal)	Lenta	Temperatura limitada
	Requiere referencia	Poca variación en la resistencia	Frágil
	Menos estable	Resistencia absoluta baja	Requiere fuente de poder
	Menos sensible	Auto calentamiento	Auto calentamiento

INSTRUMENTO	TERMOCUPLA	RTD	TERMISTOR
<b>VENTAJAS</b>	Simple	Mas exacta	Señal de salida alta
	Robusta	Más estable	Rápido
	Económica	Mas lineal que las termocuplas	Medición a dos hilos
	Diferentes formas		Mas sensible
	Rangos altos de temperatura		
	No requiere fuente de poder		
<b>DESVENTAJAS</b>	No lineal	Costosa	No lineal
	Bajo voltaje (señal)	Lenta	Temperatura limitada
	Requiere referencia	Requiere fuente de poder	Frágil
	Menos estable	Poca variación en la resistencia	Requiere fuente de poder
	Menos sensible	Resistencia absoluta baja	Auto calentamiento
		Auto calentamiento	

Figura 7. Clasificación de sensores de temperatura pirómetros de radiación. Tomado de [28]

Dentro de estos, el sensor elegido para el desarrollo será el sensor de tipo termocupla debido a su sencillez y capacidades suficientes.

### Termocuplas

Son sensores de temperatura comúnmente utilizados dentro de la industria. Estos, están compuestos de dos alambres de distinto material y unidos en un extremo. A distintas temperaturas, se produce un diferencial de potencial eléctrico muy bajo en la unión. Ese voltaje varía con la temperatura, a mayor temperatura mayor voltaje.

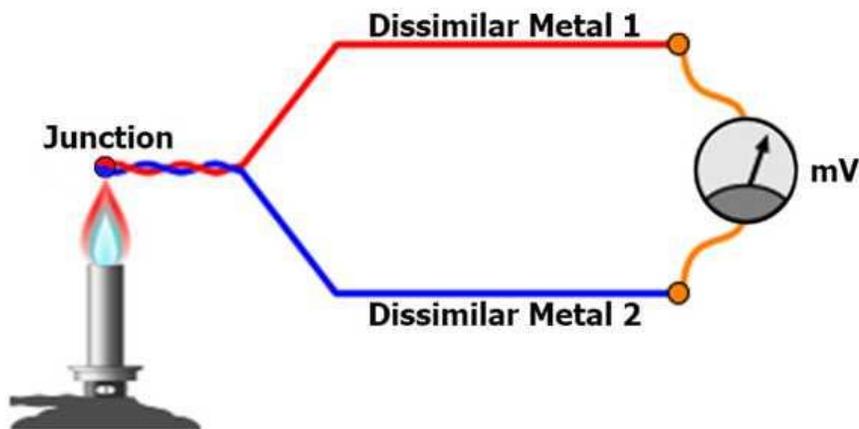


Figura 8. Esquema de composición de una termocupla. Tomada de [29]

Las termocuplas suelen ir encapsuladas con una cubierta protectora, debido a que algunas veces el proceso en el que se instalarán presenta condiciones extremas, manera que en un extremo se encuentra el cable que transporta la señal protegido con la cubierta y del otro lado se encuentra la unión que emite el voltaje. Además, según la distancia a los aparatos encargados de tratar la señal eléctrica de estos transductores, también deben utilizarse cables compensados para transportar esta señal sin que la modifique o que la información se pueda recuperar de una manera sencilla.

### Termocupla K

Particularmente se utilizó una termocupla tipo K. Estas se caracterizan por el color de sus cables. La misma tiene la ventaja de poderse emplear en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes. Sin embargo, el problema es que la temperatura máxima a la que se puede utilizar es de 325°C con un diámetro de 3,25 milímetros.

Thermocouple Extension Type	 ANSI	 BS	 DIN	 NFC	 JIS	 IEC
<b>JX</b> + IRON - CONSTANTAN®						
<b>KX</b> + CHROMEL® - ALUMEL®						
<b>TX</b> + COPPER - CONSTANTAN®						
<b>EX</b> + CHROMEL® - CONSTANTAN®						
<b>NX</b> + NICROSIL® - NISIL®			* <small>SEE BELOW</small>	* <small>SEE BELOW</small>	* <small>SEE BELOW</small>	
<b>SX</b> + COPPER - ALLOY II						

Figura 9. Identificación de tipos de termocuplas. Tomada de [29]

### 3.3 Subsistema de extruido

Como menciona Tim A. Osswald, a nivel general la extrusión es un proceso donde un polímero fundido es bombeado a través de un dado y toma forma de un perfil. Este perfil puede ser una placa, una película, un tubo o cualquier forma con sección transversal. [30]

Las formas más comunes son uniaxial (fibra, filamento) o biaxial (rollo, hojas). El proceso por el que funciona el extrusor del presente proyecto es similar al extrusor de plástico tradicional utilizado comúnmente en la industria. El proceso de extrusión de fundidos por una máquina de tornillo simple es la forma más común

“La extrusora de plastificación tiene tres funciones: en primer lugar, extrae el material en gránulos del sistema de alimentación y lo conduce al tiempo que lo comprime y, a veces, desgasifica; en segundo lugar, mezcla y produce un fundido homogéneo, y, en tercer lugar, desarrolla la presión suficiente para que supere la resistencia al flujo de la hilera abierta, de modo que el perfil emerja de la hilera de forma continua.” [31]



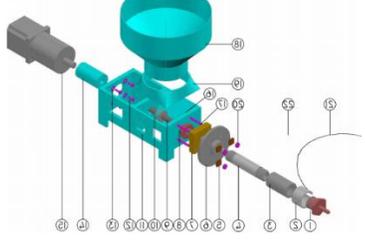
Figura 10. Extrusora de plástico industrial. Tomada de [32]

De manera que una extrusora de plástico industrial se puede dividir en 3 zonas principales:

- a) Zona de transporte de sólidos o de compactación: se encarga de transportar los pellets u hojuelas de la tolva y a través del canal del tornillo helicoidal.
- b) Zona de transición o de derretimiento: se encarga de transformar el material de estado sólido a estado semi-líquido.
- c) Zona de dosificación o de bombeo: se encarga de bombear la mezcla a través del dado dándole la forma final deseada.

Por su uso más extendido y diseño más simple se decidió investigar más el sistema de extrusión por tornillo simple.

Tabla 5. Comparación de extrusores de tornillo simple

			
Costo	\$500*	\$650	\$895
Método	DIY	Kit	Venta Ensamblada
Costo	1	2	3
Velocidad	?	1kg / 12 horas	1kg / 3-4 horas
Capacidad	2	3	1
Mantenimiento	2	1	3

Nota: Clasificación donde 1 es el valor menos deseado y 3 la característica más deseada.

Se logra apreciar que los diseños son muy similares. En conceptos básicos es un tornillo sin fin que transporta las hojuelas desde la zona de alimentación hasta el dado, durante este proceso se da el fundido.

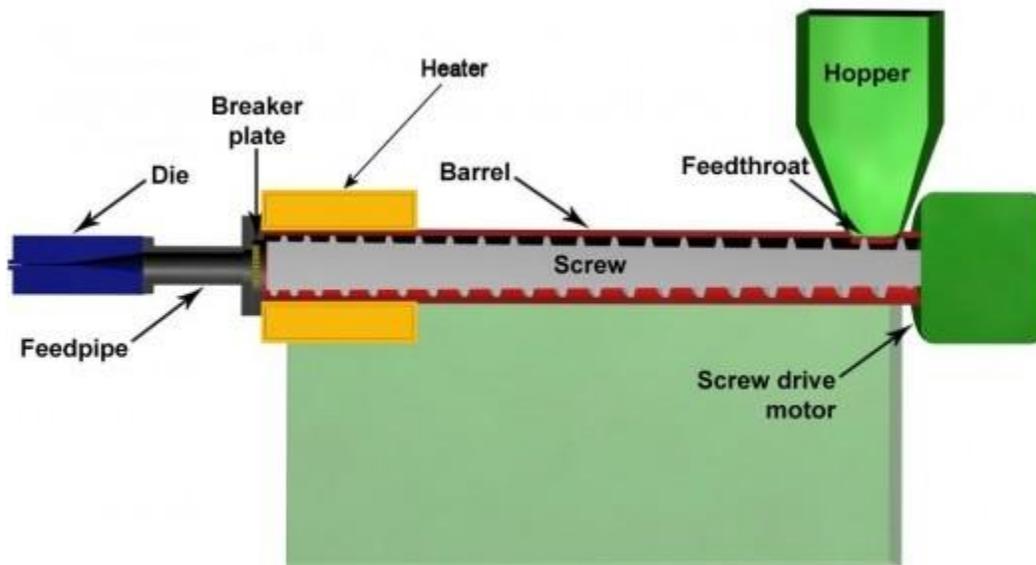


Figura 11. Corte vertical de un sistema de extrusión. Tomada de [33]

### 3.4 Subsistema de programación

El sistema de programación que se utilizará para controlar el resto de subsistemas será la plataforma de programación LabVIEW. LabVIEW es un entorno de desarrollo diseñado para incrementar la eficiencia del desarrollo de soluciones para desarrollar aplicaciones de control y medición para ingenieros y científicos.

Este entorno cuenta con una sintaxis de programación gráfica que facilita visualizar, crear y codificar sistemas de ingeniería, lo que reduce el tiempo de pruebas y facilita el análisis de datos.

Asimismo, tiene una alta integrabilidad con diferentes equipos y hardware. Permite programar de forma sencilla aplicaciones con arquitecturas como una máquina de estados, máquina de estados basada por eventos, estructuras productor consumidor, etc.

Al estar basado en una sintaxis de programación gráfica permite desarrollar aplicaciones sencillas con gran velocidad, pero también LabVIEW tiene la capacidad de modificar el comportamiento de la ejecución con gran nivel por ejemplo al poder controlar diferentes hilos de ejecución y permitir inherentemente la ejecución de programas.

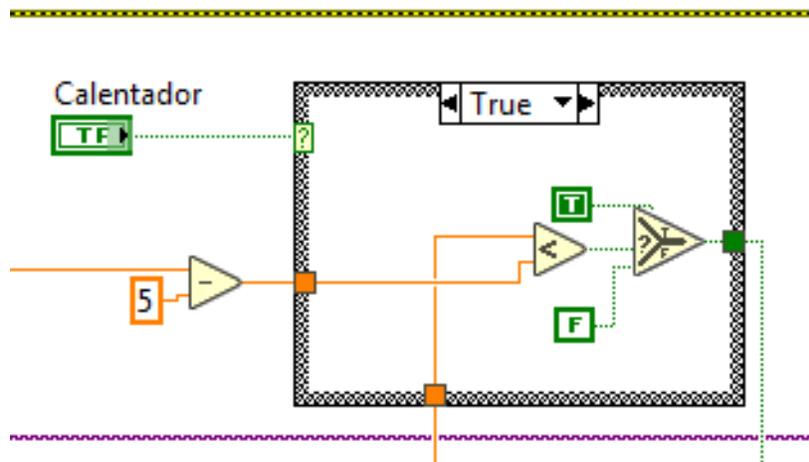


Figura 12. Sección de código que ejemplifica un lenguaje gráfico.

La versión de LabVIEW utilizada para el desarrollo fue LabVIEW Professional Development System 2016 32-bit con los drivers necesarios para la plataforma Compact DAQ. En este caso se utilizó el driver DAQmx 16.1.

### 3.5 Subsistema electrónico de control y potencia

A continuación, se detallará el sistema de control y potencia electrónico que se utilizará. Si no se especifica lo contrario, la información fue extraída de los manuales encontrados en [www.ni.com/manuals](http://www.ni.com/manuals)

#### Chassis NI cDAQ-9178

El NI cDAQ-9178 es un chasis NI CompactDAQ USB de 8 ranuras diseñado para sistemas pequeños y portátiles de pruebas de medidas mixtas. Es posible combinar el chasis con hasta ocho módulos de E/S de la Serie C para un sistema de mediciones de entradas analógica, salida analógicas, E/S digitales y contadores/temporizadores.



Figura 13. Chassis NI cDAQ-9178. Tomado de [34]

#### Módulo NI-9481

El NI 9481 es un módulo de salida digital tipo sourcing de 4 canales de un solo polo y un solo tiro (SPST) para cualquier chasis CompactDAQ o CompactRIO. Cada canal proporciona acceso a un relé electromecánico para conectar señales hasta 30 VDC (2 A), 60 VDC (1 A) y 250 VAC (2 A) y ofrece aislamiento entre canales de 250 Vrms. Cada canal también tiene un LED que indica el estado de ese canal. El NI 9481 se conecta directamente a una amplia gama de dispositivos como lo son motores, actuadores y dispositivos DC.



Figura 14. Módulo NI-9481. Tomado de [35]

En este caso este el modulo que se encarga de manejar el encendido y apagado de los actuadores por lo tanto es el encargado de manejar la parte de potencia del sistema. Debido a que está aislado eléctricamente una sobrecarga en este módulo no representa un peligro para el resto de módulos en el sistema.

### **Módulo NI-9211**

El Módulo de Entrada de Termopares NI 9211 para usarse con chasis CompactDAQ y CompactRIO incluye un convertidor analógico-digital delta-sigma de 24 bits, filtros anti-aliasing, detección de termopares abiertos y compensación de unión fría para medidas de termopares de alta precisión.



*Figura 15. Módulo NI-9211. Tomado de [36]*

## IV Capítulo

En este capítulo, se presentan algunos comportamientos de los componentes apreciables durante la prueba de los mismos. Durante la construcción del sistema también se presentaron distintos retos que se apreciarán en las siguientes secciones y cómo se solucionaron.

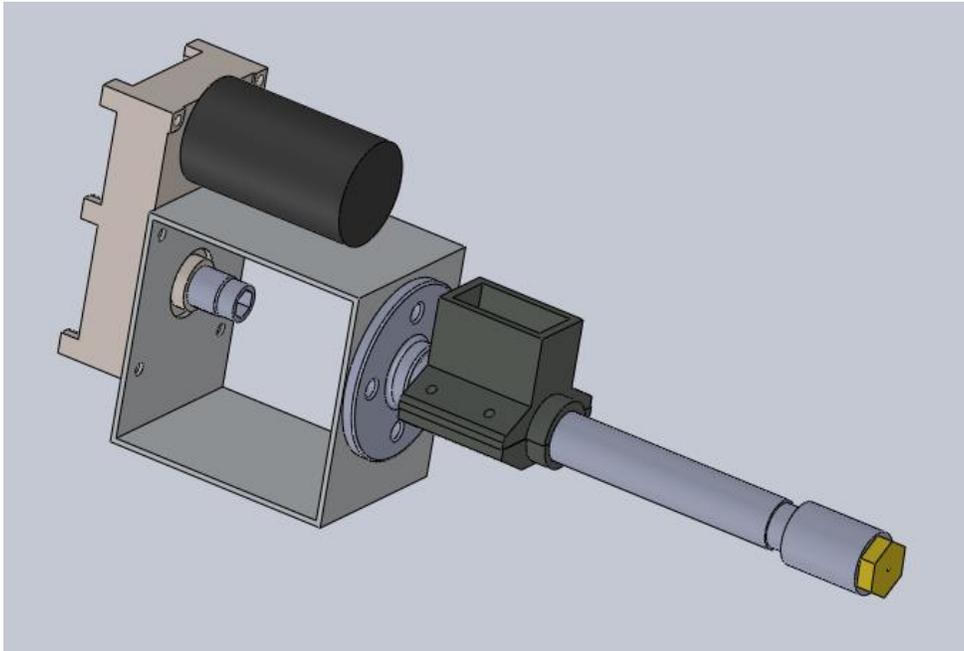


Figura 16. Modelo en 3D de sistema de extrusión.



Figura 17. Sistema de reciclaje de plástico

## 4.1 Juego Mecánico

El subsistema de extrusión depende de ser capaz de transportar el material desde la zona de alimentación hasta la salida por el dado. Debido a que el movimiento del material depende totalmente del movimiento giratorio del tornillo sin fin y de la acción canalizadora del cañón sobre el material, es de suma importancia conocer el espacio entre ambos componentes.

Se realiza un diagrama donde se puede apreciar la distancia entre ambos componentes a temperatura ambiente (25°C). Además, más adelante se procede a realizar cálculos teóricos de la diferencia de diámetros cuando se alcanza la temperatura objetivo (220°C).

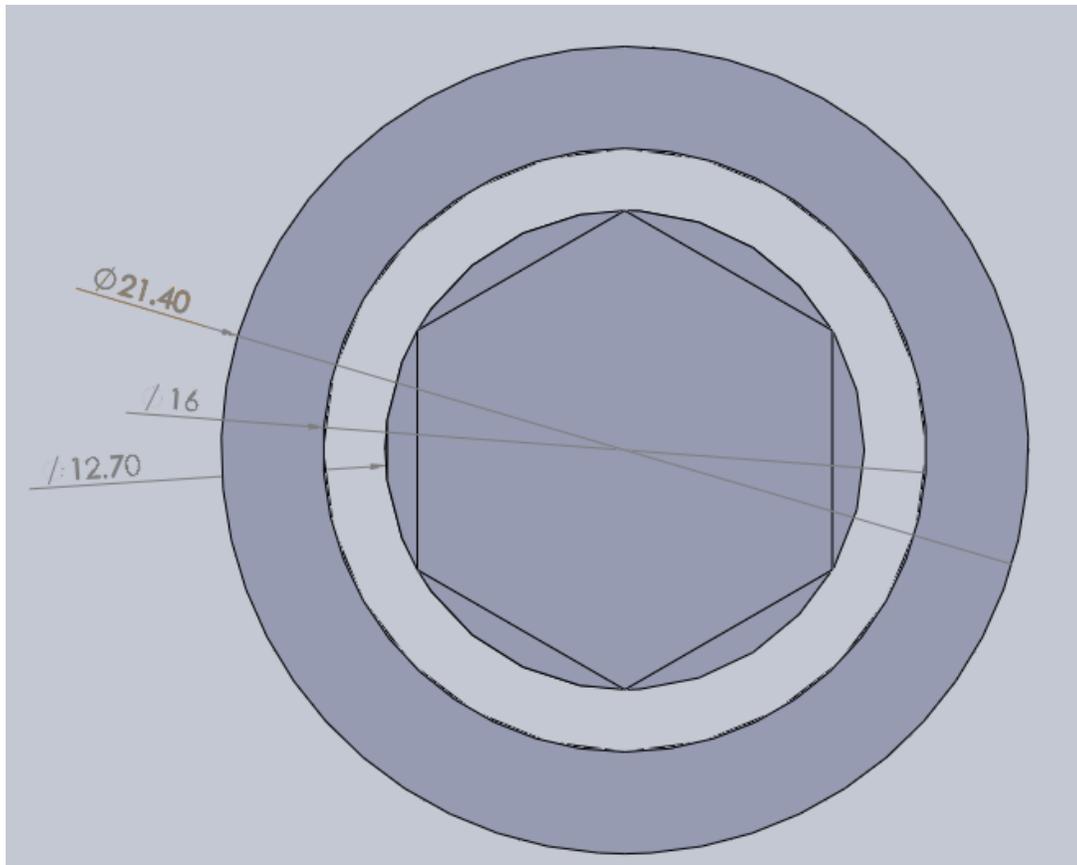


Figura 18. Corte transversal del cañón y tornillo sin fin.

De la imagen se obtiene los siguientes datos:

1. 16mm diámetro interno del cañón
2. 12.7mm diámetro externo del tornillo sin fin

De manera que se calculan los siguientes datos:

Diferencia de radios:

Ecuación 5. Relación entre radio y diámetro.

$$R = \frac{D}{2}$$

$$Rc = \frac{16mm}{2} = 8mm$$

$$Rt = \frac{12.7mm}{2} = 6.35mm$$

$$Rc - Rt = 1.65mm$$

Área de diferencia de diámetros:

*Ecuación 6. Área de un círculo.*

$$A = \pi r^2$$

$$Ac = \pi(8)^2 = 201.06 \text{ mm}^2$$

$$At = \pi(6.35)^2 = 126.68 \text{ mm}^2$$

$$Ac - At = 74.38 \text{ mm}^2$$

La diferencia entre el cañón y el tornillo sin fin, es de 1.65 mm en cada sentido. Esta diferencia no es importante ya que los pellets utilizados durante las pruebas tienen un tamaño de 2.65mm en su dimensión más pequeña, y en el caso de las hojuelas de plástico recicladas serán de mayor tamaño.

Se busca calcular la expansión térmica para conocer ese espacio a temperatura de trabajo. Se utiliza para los cálculos la temperatura objetivo de 220°C para hacer los cálculos pues es la temperatura a la que el plástico de tipo ABS se recomienda derretir para darle forma en la extrusión.



*Figura 19. Diferentes tornillos sin fin utilizados*

## 4.2 Dilatación de Área

Cuando un área se dilata esta lo hace en la misma proporción en sus lados y depende de los coeficientes de dilatación lineal que previamente se conocen. El coeficiente de dilatación se representa con la letra griega gamma y se puede calcular como dos veces el coeficiente de dilatación lineal de un sólido.

*Ecuación 7. Coeficiente de dilatación térmica del área*

$$\gamma_a = 2\alpha$$

Cuando se conoce el coeficiente de dilatación de área se puede calcular el área final que tendrá una superficie con la siguiente expresión:

*Ecuación 8. Área final después de aplicar los coeficientes de dilatación*

$$A_f = A_0[1 + \gamma_a(T_f - T_0)]$$

Donde:

$\gamma_a$ =coeficiente de dilatación de área [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$A_0$ = Área inicial

$A_f$  = Área final

$T_0$  = Temperatura inicial.

$T_f$ = Temperatura final

De manera que en nuestro caso el área de juego mecánico luego de la dilatación térmica será de:

$$\alpha_{acople\ acero} = 12 \left[ \frac{10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

$$\alpha_{tubo\ hierro} = 12 \left[ \frac{10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

$$\gamma_a = 2\alpha = 24 \left[ \frac{10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

$$A_f = A_0[1 + \gamma_a(T_f - T_0)]$$

$$A_f = A_0[1 + 24 * 10^{-6}(180 - 25)] = A_0[1 + 3720 * 10^{-6}]$$

$$A_f = 74.38\text{mm}^2 + 3.72\text{mm}^2$$

$$A_f = 77.38\text{mm}^2$$

En el caso de calcular el espacio de la superficie interna del cañón con el torillo sin fin con la dilatación térmica esta será de:

*Ecuación 9. Longitud final luego de aplicar los coeficientes de dilatación*

$$L_f = L_0[1 + \alpha_l(T_f - T_0)]$$

$$L_f = 1.65[1 + 12(180 - 25)]$$

$$L_f = 3.51\text{ mm}$$

Después de haber realizado estos cálculos y después de haber realizado pruebas a la extrusión, se comprueba que la dilatación térmica entre el cañón y el tornillo sin fin no es una situación que prevenga que se pueda extruir el material de manera satisfactoria.

### 4.3 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica es una banda eléctrica de forma cilíndrica que permite el paso de corriente el cual eleva su temperatura y permite emitir radiación térmica. Verdaderamente, la banda transmite el calor al elemento calentado por conducción térmica por tanto que es común ver su uso en máquinas de extrusión de plástico, inyección de plástico, moldeo por compresión, tanques de calentamiento, calentadores de comida, etc.

Las dimensiones del sensor y sus características eléctricas son las siguientes:

Altura  $h = 25\text{mm}$

Diámetro interno  $d = 25\text{mm}$

Voltaje de entrada: 12V

Potencia máxima: 40W

Corriente máxima: 3.33A



Figura 20. Resistencia eléctrica

Esta resistencia eléctrica está recubierta por un segundo anillo metálico que está aislado con material tipo mica. La mica pertenece a los minerales filosilicatos los cuales tienen una alta resistencia térmica.

Esta resistencia eléctrica está conectada a un cargador de una computadora Samsung que entrega 12V y 3.16A máximo. Por lo tanto, con estas características el valor de temperatura más alto alcanzado fue el de 260 °C.

Esta temperatura es mucho más de la temperatura necesaria para extruir ya que se ha comprobado que se ha podido extruir con 180 grados, pero recomendable tener la temperatura del dado de salida alrededor de 200-220 °C.

Su control se realizó mediante el encendido y apagado de la corriente eléctrica que se le suministra a la resistencia. Se consideró utilizar un control PID y PWM, pero no es posible realizar

ese tipo de control con el hardware utilizado. Ya que se está trabajando con un relay mecánico y la alta conmutación no es funcional en este dispositivo, esta opción se descartó. Se verificó experimentalmente que la temperatura del calentador varía  $\pm 5$  °C y la del dado de salida aún menos con este tipo de funcionamiento.

Los valores elegidos para el control de temperatura son:

Nivel meta: 220°C

Nivel superior: 226°C

Nivel inferior: 214 °C



*Figura 21. Resistencia eléctrica utilizada durante el proyecto*

### 4.3.1 Función de transferencia

Además, se logró calcular la función de transferencia a partir del método de identificación de modelos de orden reducido de tres puntos 123c. [37]

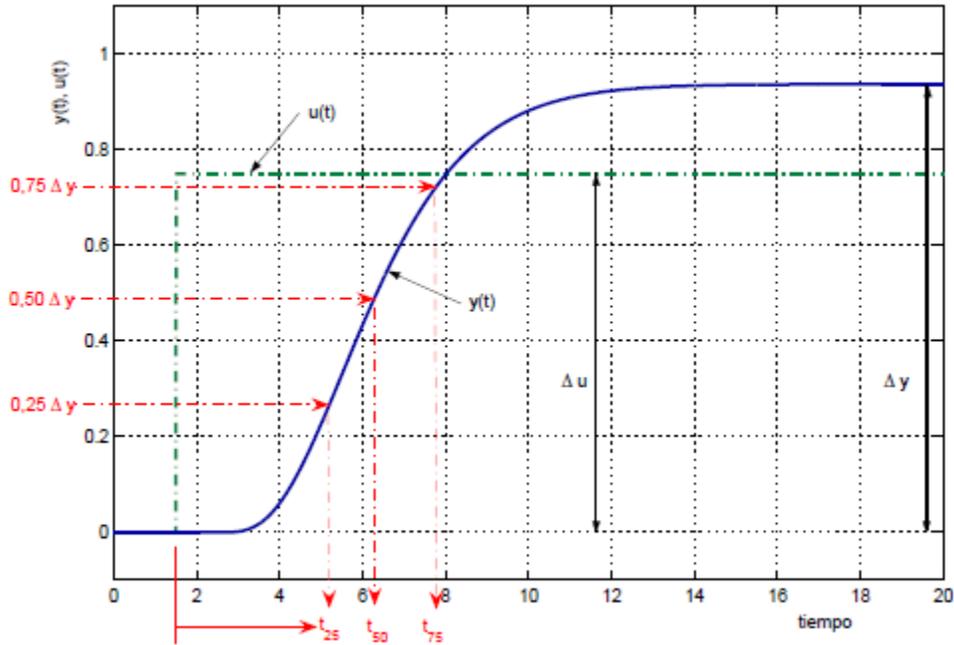


Figura 22. Características de una curva de reacción. Obtenida de [37]

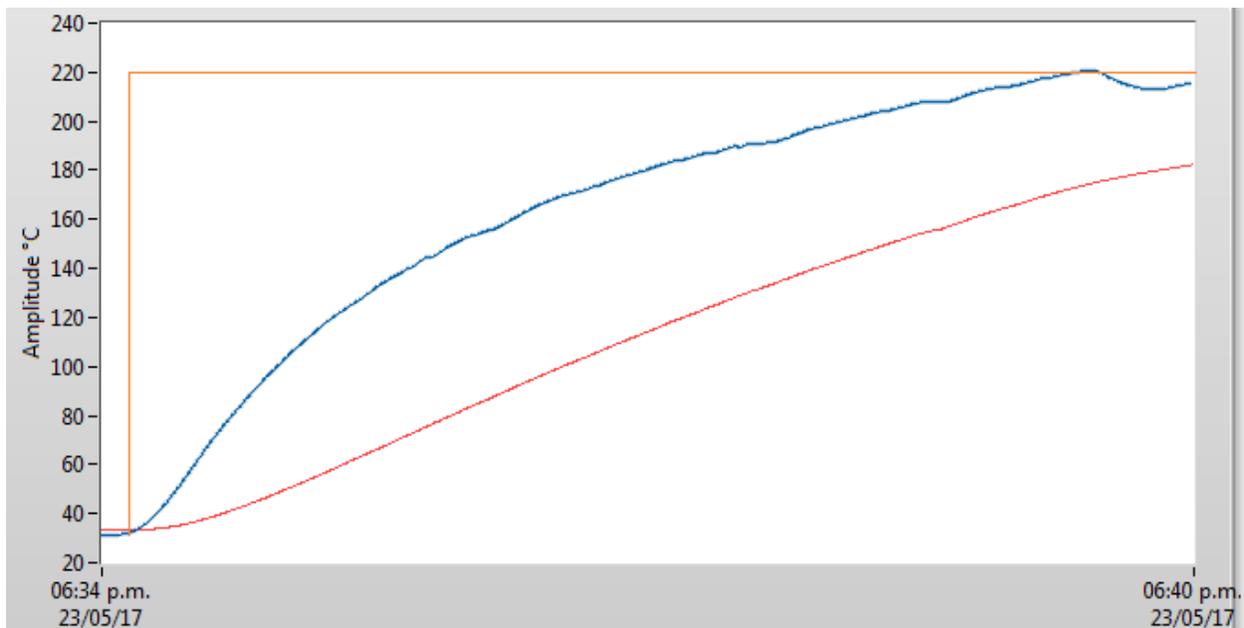


Figura 23. Respuesta de la resistencia eléctrica frente a la entrada escalón de alimentación.

De acuerdo a [37] , los parámetros del modelo de primer orden más tiempo muerto genera la función de transferencia:

*Ecuación 10. Función de transferencia de primer orden más tiempo muerto. Obtenida de [37]*

$$P(s) = \frac{K_p e^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Donde las constantes de la ecuación se obtienen a partir de:

*Ecuación 11. Constante  $K_p$ . Obtenida de [37]*

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

*Ecuación 12. Constante  $T$ . Obtenida de [37]*

$$T = 0,9102 (t_{75} - t_{25})$$

*Ecuación 13. Constante  $L$ . Obtenida de [37]*

$$L = 1,2620 t_{25} - 0,2620 t_{75}$$

A partir de las características de la reacción que se observa en la Figura 23, se obtienen los siguientes datos:

*Tabla 6. Valores y constantes de función de transferencia de la resistencia eléctrica.*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
$\Delta y$	188,1955	°C
$\Delta u$	38	W
$t_{25}$	20,9375	Segundos
$t_{75}$	92,8125	Segundos
$T$	65,420625	Segundos
$L$	2,10625	Segundos

Por tanto, la función de transferencia es:

*Ecuación 14. Función de transferencia del calentador*

$$P(s) = \frac{4,9525 e^{-2,1063 s}}{65,421 s + 1}$$

### 4.3.2 Pruebas de Control

En la pagina 19 se desarrolla los principios teóricos de los sistemas de control. A continuación, se comenta la escogencia del mismo.

#### **PID**

Aunque este control sería el más deseado para alcanzar un punto de equilibrio de una manera veloz, no es posible implementarlo como un PWM debido a que el hardware no está diseñado para funcionar como uno de alta conmutación. El módulo que controla el motor y la temperatura es un relay mecánico que no permitiría una modulación por ancho de pulso como otros sistemas de control. Igualmente, se consideró que una velocidad constante en el motor es suficiente para la aplicación al igual que una temperatura relativamente constante. Ya que lo que se busca es un diámetro constante sin importar necesariamente la velocidad del motor, el diámetro constante se podría modificar ajustando la temperatura de consigna.

Se realizaron pruebas utilizando el set de herramientas de LabVIEW para el control de PID, donde más adelante se describirá los resultados y por qué no se prosiguió por este camino.

#### **PD**

Este método de control no se realizó debido a que de nuevo no es posible regular el encendido gradual como si lo permitirían otros métodos de control. Se realizaron pruebas en LabVIEW para este método de control.

#### **ON/OFF**

Debido a que la naturaleza del controlador se ajusta a este meto de control, fue este el que se eligió para el control del sistema.

El módulo controlador de alimentación NI 9481 es un relay electromecánico que al excitarse permite el paso de la corriente en la armadura, es decir la carga se mueve al estado de Encendido.

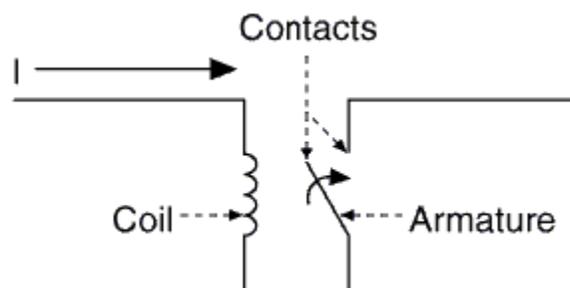


Figura 24. Relay mecánico. Tomada de [38]

## PRUEBAS CON PID

Para realizar un sistema comprobar que no era ideal utilizar un controlador PID para este sistema de control de temperatura se procedió a hacer pruebas experimentales para determinar cuál de los dos métodos anteriormente descritos cuenta con un menor rango de diferencias de temperatura, es decir cual se mantiene por más tiempo cercano al valor de consigna.

Para implementar el sistema de control PID se hizo uso del set de herramientas de PID que realizan el trabajo de automatizar el proceso de control. Se utilizó el siguiente VI:



Figura 25. VI de PID. Tomada de [39]

Además, se utilizó el VI Autotuning que se puede observar en la Figura 28. Paleta de funciones PID para obtener las constantes de control. A partir del mismo se determinó un rango de valores de salida entre 0 y 1. Como el rango de salida iba a ser analógico se procede a discretizar la salida redondeando hacia el valor más cercano.

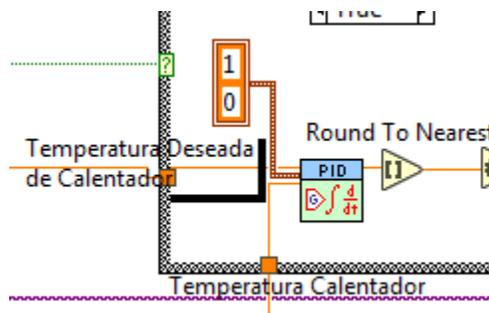
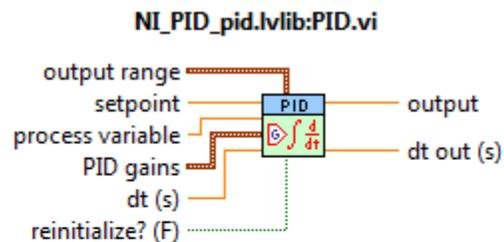


Figura 26. Control PID implementado en la lógica de programación



Implements a PID controller using a PID algorithm for simple PID applications or high speed control applications that require an efficient algorithm. The PID algorithm features control output range limiting with integrator anti-windup and bumpless controller output for PID gain changes. Use the DBL instance of this VI to implement a single control loop. Use the DBL Array instance to implement parallel multi-loop control.

Figura 27. Descripción de entradas y salidas de la función PID

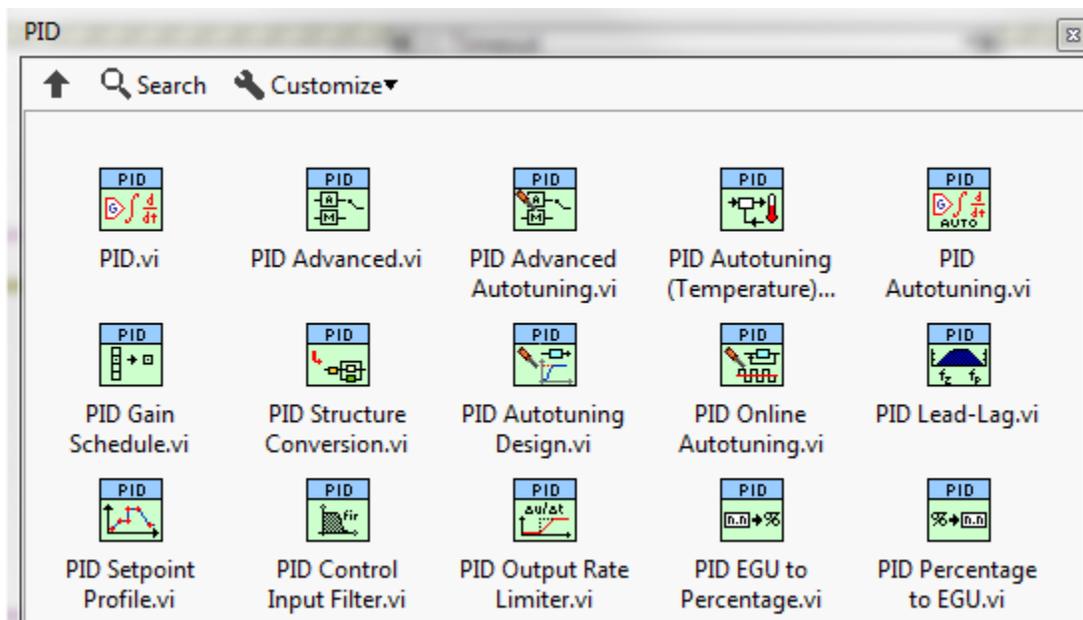


Figura 28. Paleta de funciones PID

Los datos se registraron en la siguiente tabla y se procedió a obtener los valores máximos y mínimos de las oscilaciones en un rango de tiempo, esto para obtener el rango de temperatura en la que oscila en pleno funcionamiento.

	A	B
731	18/05/2017 19:04	214,287
732	18/05/2017 19:04	214,384
733	18/05/2017 19:04	214,496
734	18/05/2017 19:04	214,619
735	18/05/2017 19:04	214,785
736	18/05/2017 19:04	214,932
737	18/05/2017 19:04	215,083
738	18/05/2017 19:04	215,254
739	18/05/2017 19:04	215,43
740	18/05/2017 19:04	215,633
741	18/05/2017 19:04	215,813
742	18/05/2017 19:04	215,979
743	18/05/2017 19:04	216,171
744	18/05/2017 19:04	216,276
745	18/05/2017 19:04	216,424
746	18/05/2017 19:04	216,594
747	18/05/2017 19:04	216,789
748	18/05/2017 19:04	216,949
749	18/05/2017 19:05	217,192
750	18/05/2017 19:05	217,419
751	18/05/2017 19:05	217,634
752	18/05/2017 19:05	217,866
753	18/05/2017 19:05	218,027
754	18/05/2017 19:05	218,247
755	18/05/2017 19:05	218,479
756	18/05/2017 19:05	218,745
757	18/05/2017 19:05	219,007
758	18/05/2017 19:05	219,266
759	18/05/2017 19:05	219,504
760	18/05/2017 19:05	219,749
761	18/05/2017 19:05	220,045
762	18/05/2017 19:05	220,338
763	18/05/2017 19:05	220,611
764	MAX with PID	226,973
765	MIN with PID	210,792

Figura 29. Variación de TC utilizando PID.

	A	B
992	18/05/2017 19:17	220,977
993	18/05/2017 19:17	220,973
994	18/05/2017 19:17	221,05
995	18/05/2017 19:17	221,058
996	18/05/2017 19:17	221,057
997	18/05/2017 19:17	221,078
998	18/05/2017 19:17	221,132
999	18/05/2017 19:17	221,148
1000	18/05/2017 19:17	221,129
1001	18/05/2017 19:17	221,048
1002	18/05/2017 19:17	220,946
1003	18/05/2017 19:17	220,825
1004	18/05/2017 19:17	220,63
1005	18/05/2017 19:17	220,446
1006	18/05/2017 19:17	220,37
1007	18/05/2017 19:17	220,217
1008	18/05/2017 19:17	220,124
1009	18/05/2017 19:17	220,02
1010	18/05/2017 19:17	219,879
1011	18/05/2017 19:17	219,803
1012	18/05/2017 19:17	219,675
1013	18/05/2017 19:17	219,456
1014	18/05/2017 19:17	219,326
1015	18/05/2017 19:17	219,08
1016	18/05/2017 19:17	219,015
1017	18/05/2017 19:17	218,816
1018	18/05/2017 19:17	218,558
1019	18/05/2017 19:17	218,357
1020	18/05/2017 19:17	218,159
1021	18/05/2017 19:17	217,926
1022	18/05/2017 19:17	217,743
1023	18/05/2017 19:17	217,566
1024	18/05/2017 19:17	217,35
1025	MAX with ON/OFF	221,173
1026	MIN with ON/OFF	207,985

Figura 30. Variación de TC utilizando ON/OFF

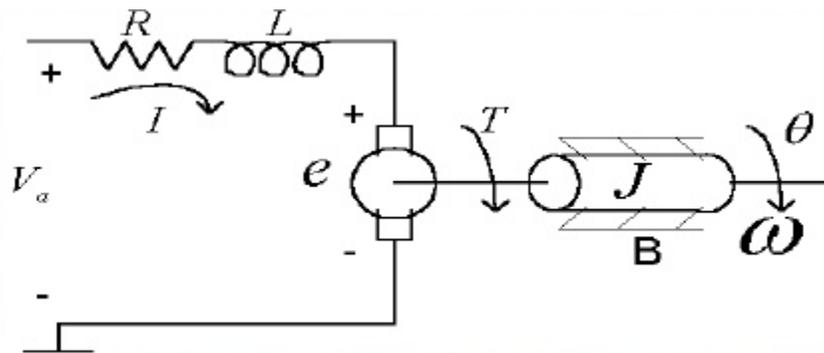
Se observa una leve minoría en el controlador ON/OFF ya que la diferencia de grados es aproximadamente de 13.188 °C a comparación del controlador PID donde la diferencia de temperatura máxima y mínima es de 16.181°C

## Factores de peligro en un PWM

Debido a que el módulo NI 9481 es un relay electro mecánico el mismo está diseñado para baja conmutación. Dada la elevada corriente, el cambio de un estado a otro generaría un arco eléctrico en el switch. Este arco eléctrico se vuelve mayor mientras la carga sea mayor ya que la carga se modela como una carga inductiva y las mismas tienden a oponerse al cambio brusco de corriente. Continuos arcos eléctricos en el relay mecánico provocan un deterioramiento mucho más acelerado que si utilizara con una conmutación dentro de las especificaciones.

*Ecuación 15. Modelo de un motor como carga inductiva. Tomado de [40]*

$$V_a = R * I + L \frac{dI}{dt} + e$$

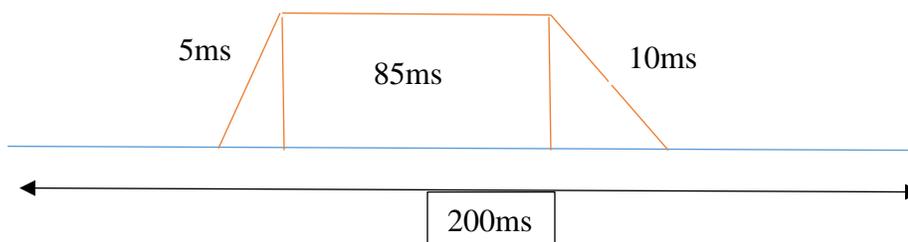


*Figura 31. Modelado de un motor CD. Tomado de [33]*

**Relay release time..... 5 ms max**  
**Relay operate time ..... 10 ms max**

*Figura 32. Especificaciones de tiempo de respuesta de módulo 9481. Tomada de [35]*

Además de la imagen anterior se observa que el tiempo de abierto y cerrado más rápido que puede alcanzar este módulo es de 5ms para abierto y de 10ms para cerrado máximo. Es decir, para una conmutación al 50% se necesitaría al menos 100ms para que el tiempo de subido y bajado sea de apenas un 85% y se asemeje a una onda cuadrado. Esto quiere decir que la velocidad de conmutación máximo apenas podría alcanzar una a 200ms y por tanto una frecuencia 5 Hz. La misma es insuficiente si se desea pensar en un control PWM a esa velocidad.



*Figura 33. Grafica de tiempo estimado de respuesta del relay.*

## Resultados de temperatura

Después de aproximadamente 15min de funcionamiento es posible apreciar la temperatura de salida (donde se encuentra el plástico siendo extruido) se mantiene mucho más estable que la temperatura del calentador. Es en la siguiente imagen donde se observa que a pesar que hay una variación de  $\pm 6^{\circ}\text{C}$  la temperatura de salida apenas varía  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

A continuación, se presenta una imagen de los resultados del sistema de control utilizando un sistema de control Encendido/Apagado.

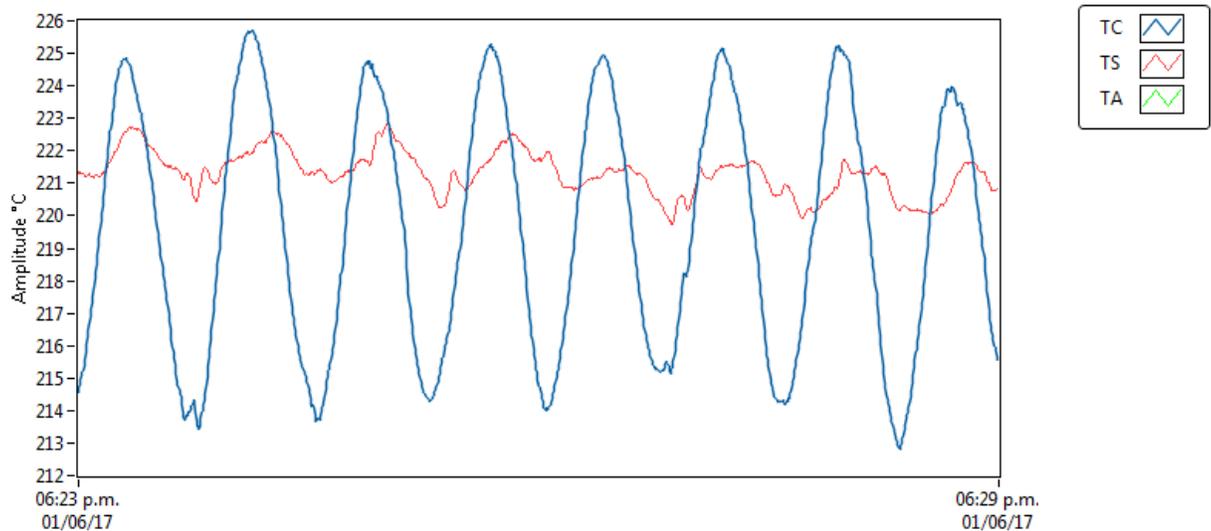


Figura 34. Oscilación de temperaturas con controlador ON/OFF

Donde:

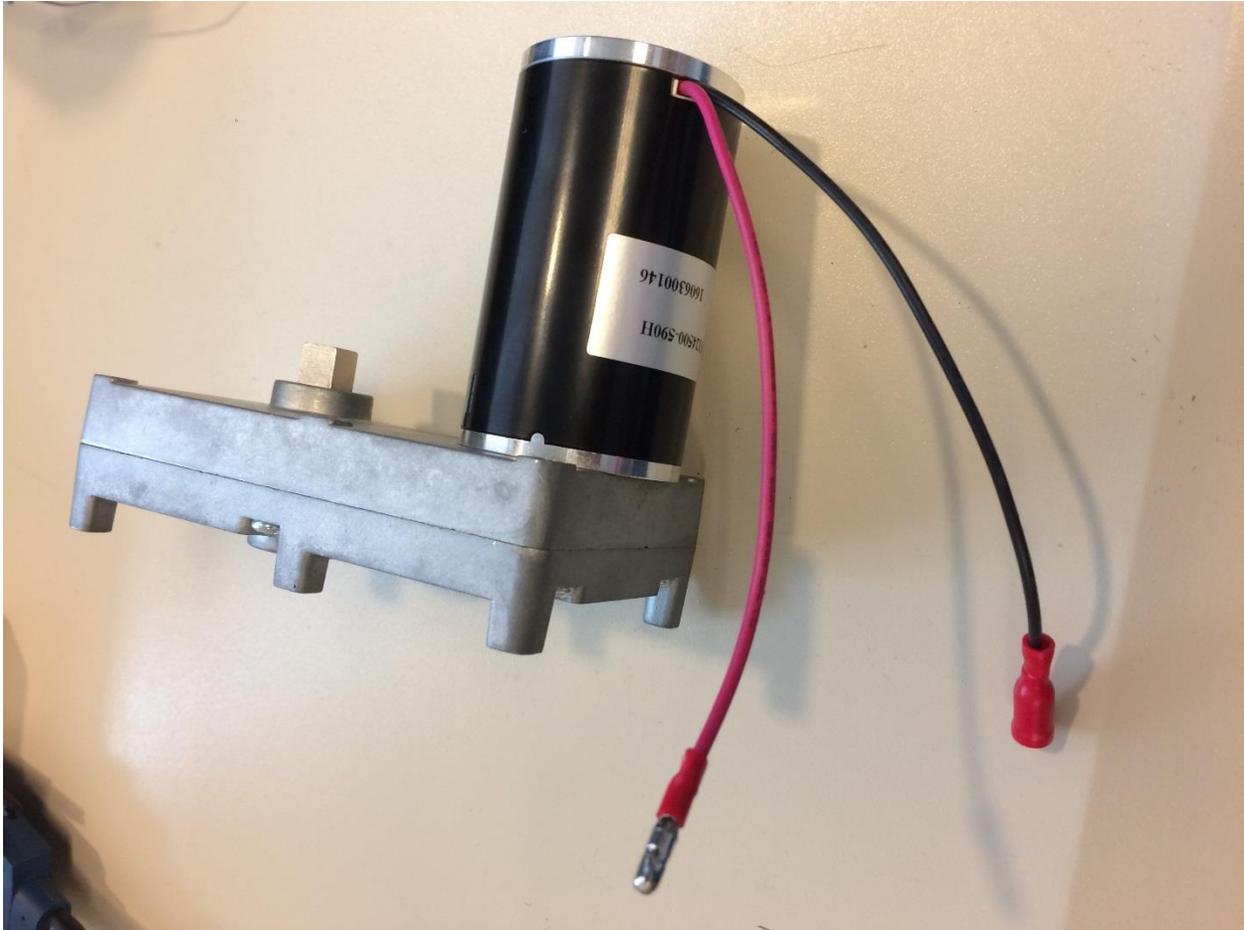
La temperatura TC es la temperatura del calentador, es decir de la resistencia eléctrica.

La temperatura TS es la temperatura de salida, es decir, del dado.

La temperatura TA es la temperatura ambiente que no se grafica.

## 4.4 Motor de extrusión

El motor utilizado es un motor de corriente directa con escobillas que cuenta con un sistema de engranes que permite transformar su velocidad en un mayor torque. El tren de engranes consiste de 5 engranes que se conectan internamente desde la salida del motor hasta la salida del eje del mismo.



*Figura 35. Motor de extrusión utilizado.*

En cuanto a la potencia del motor, se comprobó experimentalmente que esta funciona en promedio a 20 watts, con potencias pico de arranque cercanas a los 24 Watts. Esto se comprobó experimentalmente con el video y son resultados similares a la hoja de datos. [41] La potencia eléctrica del motor es suficiente para extruir el plástico como se comprobó en el video suministrado.

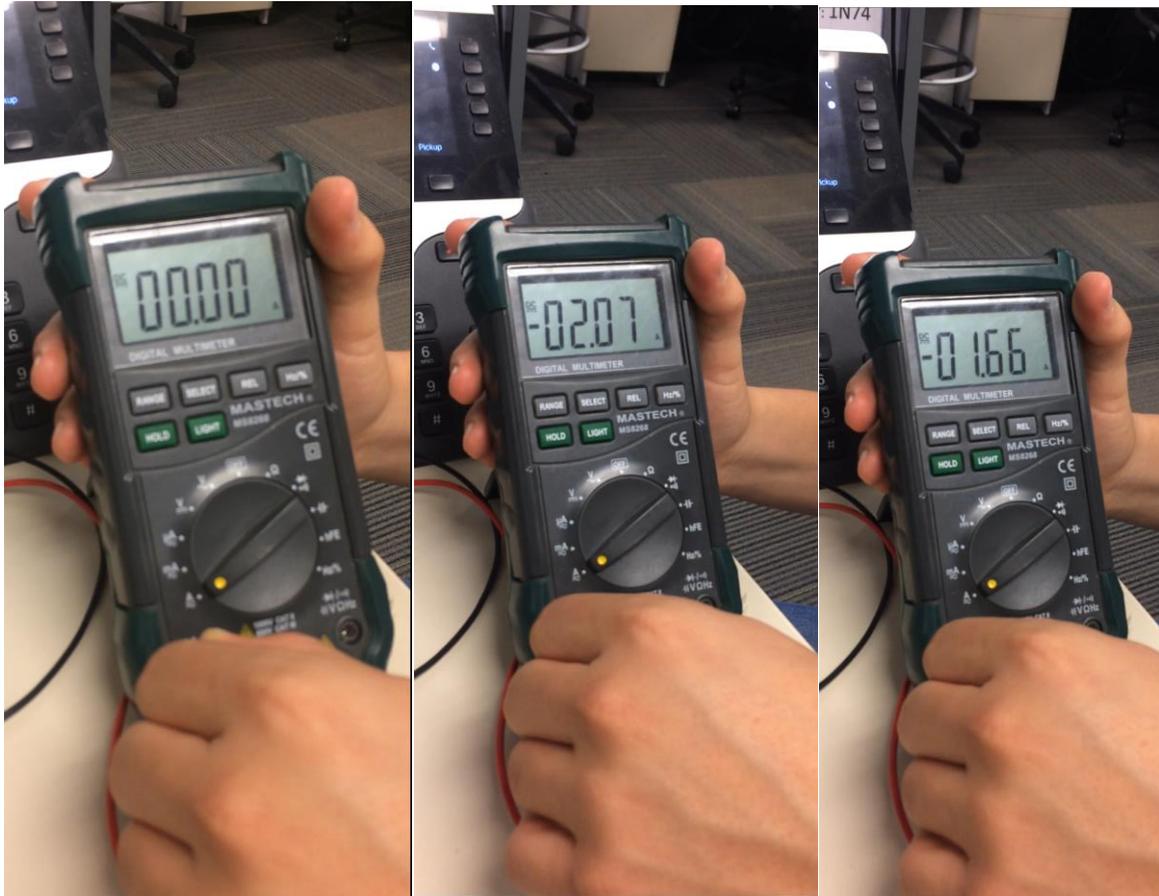


Figura 36. Corriente del motor al iniciar    Figura 37. Corriente del motor al arrancar    Figura 38. Corriente del motor promedio

Sin embargo, de las hojas de datos se puede obtener que la potencia de salida es de 17.8 W. (**Apéndice B. Hoja de datos de motor GF-ZY45 DC**) De ahí que se obtiene que el motor en promedio funciona con una sobrecarga del 12% de la potencia nominal.

Esto es un factor a considerar para cuidar la vida útil de motor y para futuras recomendaciones. Se intentó obtener el dato de factor de servicio de la hoja de datos del fabricante, pero no fue posible observar ese dato.

#### 4.4.1 Sistema de protección

Durante el desarrollo y pruebas del proyecto se permitió el arranque del motor a una temperatura donde el plástico todavía se encontraba en estado sólido y esto provocó un esfuerzo enorme del motor al punto que casi se quiebra.

Debido a que es una consideración importante a la hora de tomar en cuenta se modificó la programación tal que el motor de extrusor solo se encienda si se enciende el mecanismo con la palanca y además se ha alcanzado una temperatura mayor a 200 °C tal como se aprecia en la siguiente figura:

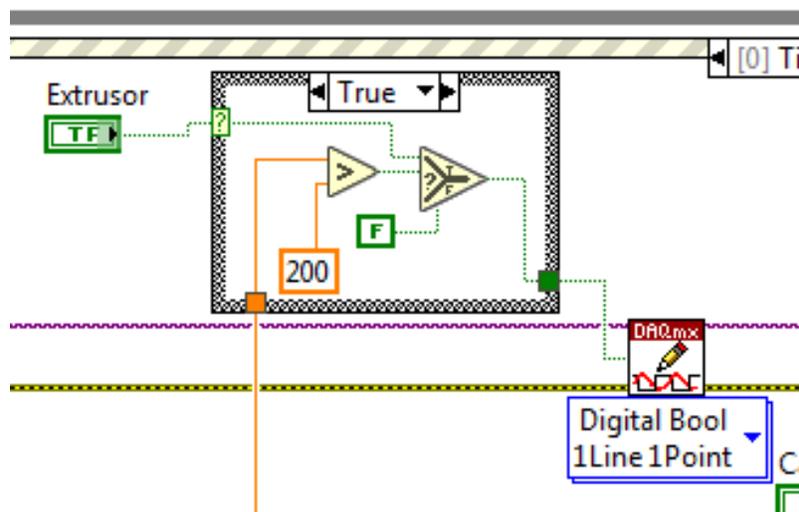


Figura 39. Sistema de protección frente al encendido en frío

## 4.5 Tornillo sin fin

Durante la construcción del sistema se pudo apreciar una diferencia de tamaños que influyó en el choque de dos piezas. El choque se debió por un mal cálculo en el tamaño del cubo que sirve como acople entre las piezas de la salida del motor y el eje.

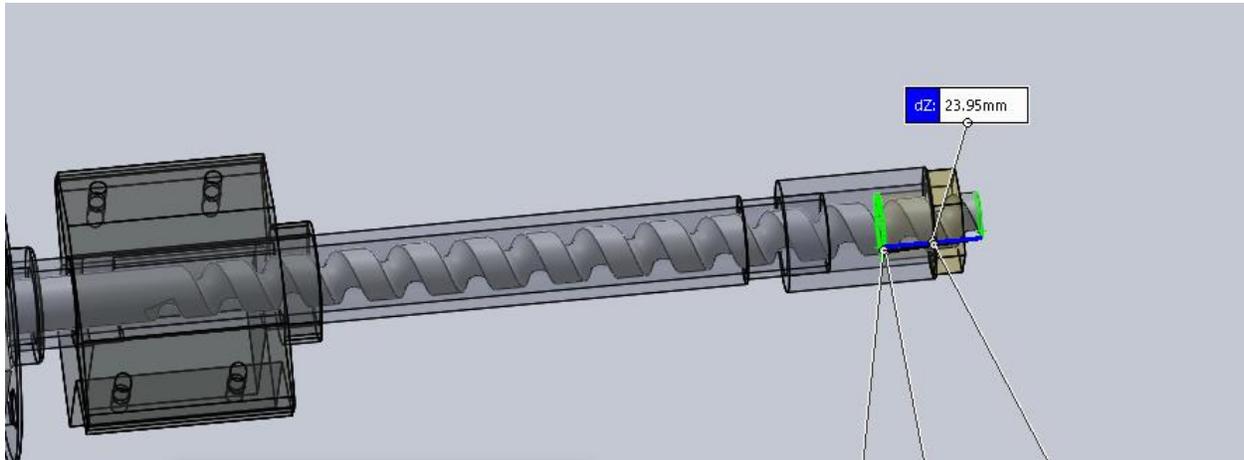


Figura 40. Problema en longitud del tornillo sin fin.

El choque entre el tornillo sin fin y el dado se pudo comprobar además realizando el modelo en 3D del sistema y comprobando que no fue un incorrecto ensamble la causa del mismo sino un incorrecto cálculo de las piezas originales.

Posteriormente se procedió a aplicar unas acciones correctivas agregando espaciadores entre la carcasa o base del motor, con la base del cañón. Este cambio permitió agregar aproximadamente tres centímetros al largo del cañón lo que permitió solucionar la situación. Se puede apreciar el arreglo en la siguiente imagen.

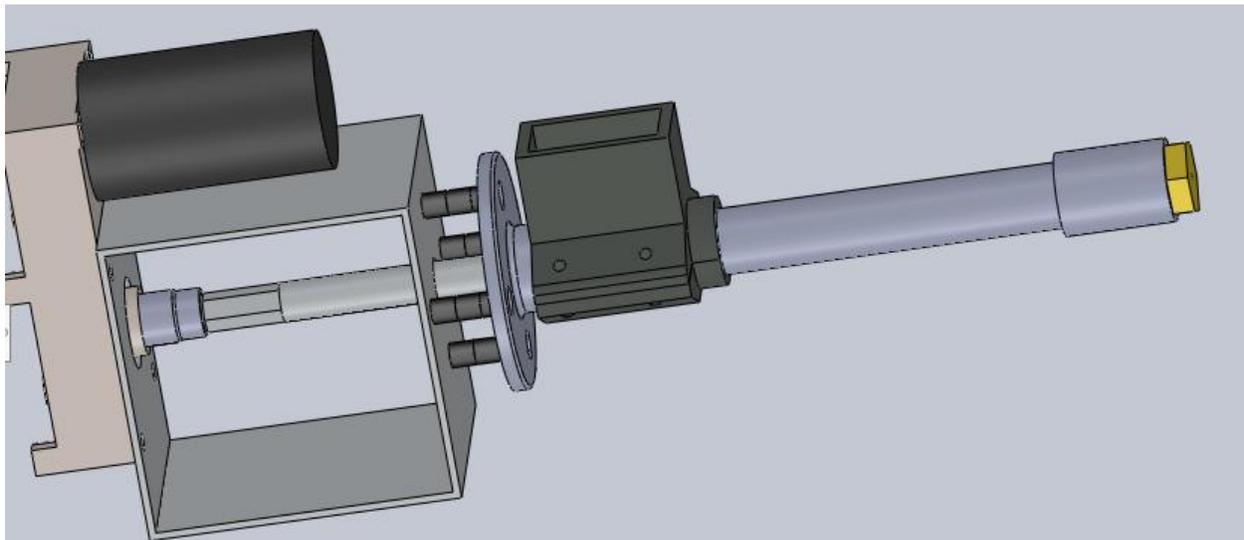


Figura 41. Sistema con espaciadores.



*Figura 42. Espaciadores en el sistema.*

## 4.6 Termocupla

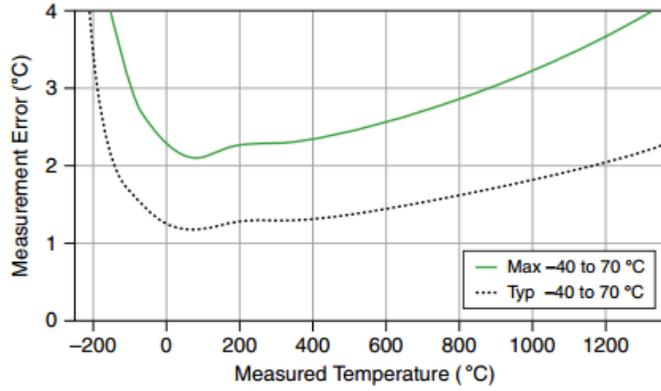
Se decidió utilizar tres termocuplas idénticas que se contaban en National Instruments para realizar el sistema. Las tres termocuplas son de tipo K.

*Tabla 7. Descripción de las tres termocuplas.*

<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
TC	Temperatura de calentador. Es la termocupla conectada en la parte exterior de la resistencia eléctrica. Precisamente porque ser la más cercana es la que percibe la mayor variación de la temperatura cuando se enciende y se apaga la salida. Es graficada de color azul.
TS	Temperatura de salida. Es la termocupla que está conectada dentro del dado de salida. Por ser la termocupla que se encuentra dentro del dado es posible determinar con mayor fidelidad la temperatura de salida del plástico y es la que más nos interesa mantener estable. Se puede apreciar que varía mucho más lento que TC. Es graficada de color rojo.
TA	Temperatura ambiente. Es una termocupla que mide la temperatura ambiente. Es utilizada para comparar la salida de temperatura del calentador y la salida, también podría ser un parámetro de control en experimentaciones. No se gráfica porque se mantiene constante y se desperdiciaría resolución del gráfico.

A continuación, se ofrece la imagen de la termocupla utilizada, así como sus errores asociados dados por el fabricante:

**Figure 3. Thermocouple Type K Errors**



*Figura 43. Errores asociados a termocupla tipo K. Tomada de [42]*



*Figura 44. Termocupla utilizada.*

### 4.6.1 Función de transferencia

De manera similar a la sección 4.3.1 Función de transferencia donde se obtiene la función de transferencia del calentador, en esta parte se obtiene la función de transferencia de la termocupla de acuerdo a los datos obtenidos en **Anexo G. Datos de caracterización de termocupla**. Además, se compara los datos con el error dado por el fabricante.

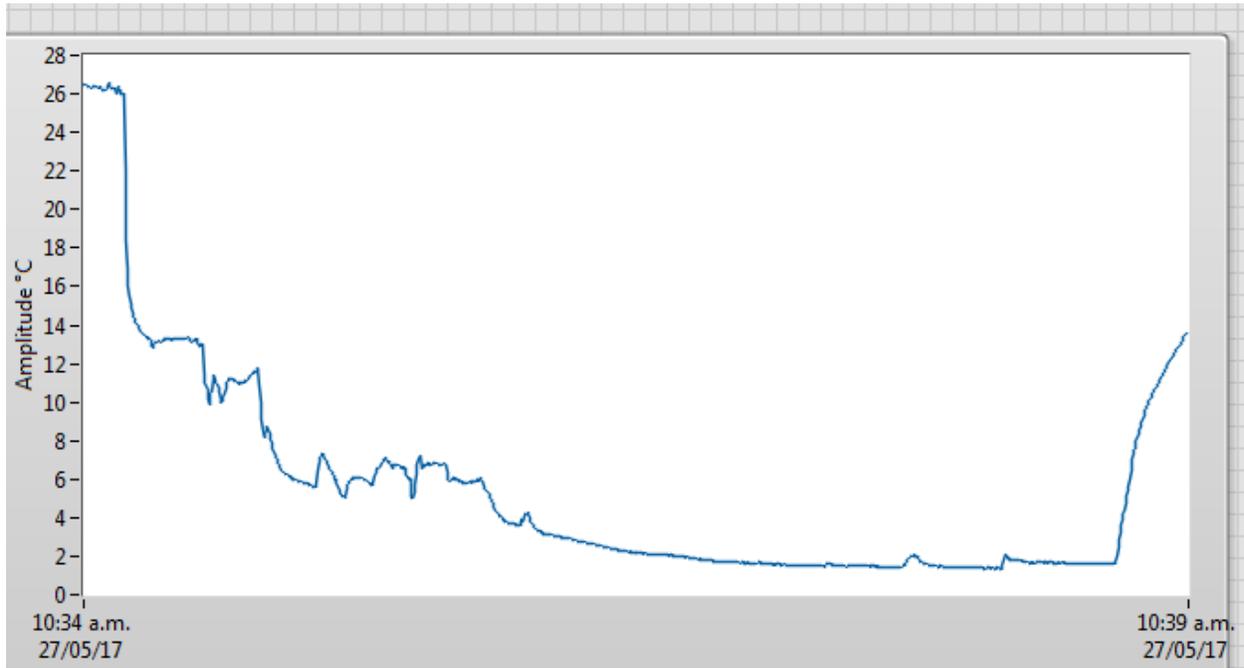


Figura 45. Respuesta de la termocupla frente a la entrada escalón de temperatura.

A partir de las características de la reacción que se observa en la Figura 45 se obtienen los siguientes datos:

Tabla 8. Valores y constantes de función de transferencia de la termocupla.

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
$\Delta y$	25,2	°C
$\Delta u$	26,52	°C
$t_{25}$	12,0625	Segundos
$t_{75}$	55	Segundos
$T$	39,0817	Segundos
$L$	0,8129	Segundos

Por tanto, la función de transferencia es:

Ecuación 16. Función de transferencia de termocupla

$$P(s) = \frac{0,9502 e^{-0,8129 s}}{39,0817 s + 1}$$

## 4.7 Diagrama eléctrico

Las conexiones eléctricas se vieron facilitadas por la facilidad de integrar sensores y actuadores en módulos ya presentes en el chasis cDAQ 9178, pues el mismo se encarga de hacer las conexiones internas.

En este caso se presenta el diagrama de conexiones del módulo de actuadores con el motor y el calentador.

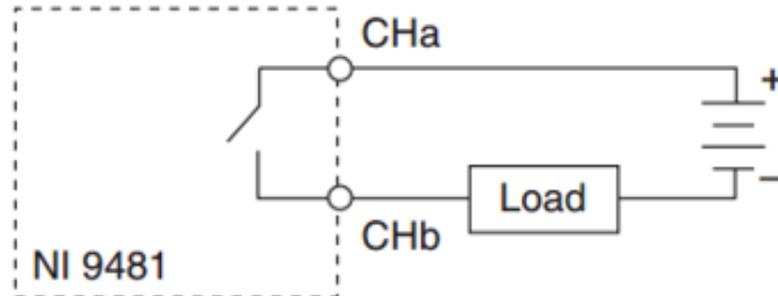


Figura 46. Diagrama eléctrico de actuadores para módulo NI 9481.

## 4.8 Diagrama de Flujo

En esta subsección se presentará el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del subsistema de programación y se explicará en prosa su funcionamiento.

En una primera etapa el subsistema se encarga de inicializar variables, crear canales de comunicación y establecimiento de tareas con el hardware. A continuación, se utiliza la estructura while y una estructura de eventos para controlar la programación principal.

El subsistema se encuentra enmarcado en una arquitectura llamada máquina de estados manejada por eventos. La misma tiene ventaja sobre una máquina de estados convencional pues se distingue por utilizar menos recursos y reaccionar frente a las acciones del usuario sobre el panel frontal de forma inmediata.

La máquina de estados ejecuta la lógica principal cada 100ms, es decir 10 veces por segundo. En la misma realiza lectura de datos y despliegue de la información y actualización de los controladores, calentador y motor, de ser necesario. Los tres procesos se realizan de forma paralela como nativamente LabVIEW tiene capacidad de realizar al acceder a los recursos del computador de esa manera.

Si se encuentra la palanca de encender motor levantada se preguntará el programa si la temperatura es segura, es decir si se encuentra dentro del rango. Esta pregunta es una forma de control de seguridad para prevenir que el motor se encienda en una temperatura no segura como por ejemplo cuando el plástico esté demasiado frío y cause que el motor se sobre esfuerce o se quiebre. Si la temperatura está en rango se enciende el motor alimentando la línea 0 puerto 1.

Por otro lado, la lógica del controlador también depende de la palanca levantada. Una vez se encuentre “encendido” el controlador se verifica si la temperatura del calentador está en rango y si es así enciende el calentador. Si no está en rango se pregunta si es porque está por encima, de ser así apaga el calentador, de ser lo contrario enciende el calentador para acercarse al rango.

Finalmente, la lectura de datos solo se pregunta si está en peligro de sobre calentamiento, de ser así ejecuta el evento de peligro de sobre calentamiento.

La elección de eventos se pregunta si debe apagar ambos actuadores, guardar el gráfico en una tabla de Excel o detener el programa y finalizar las tareas del hardware.

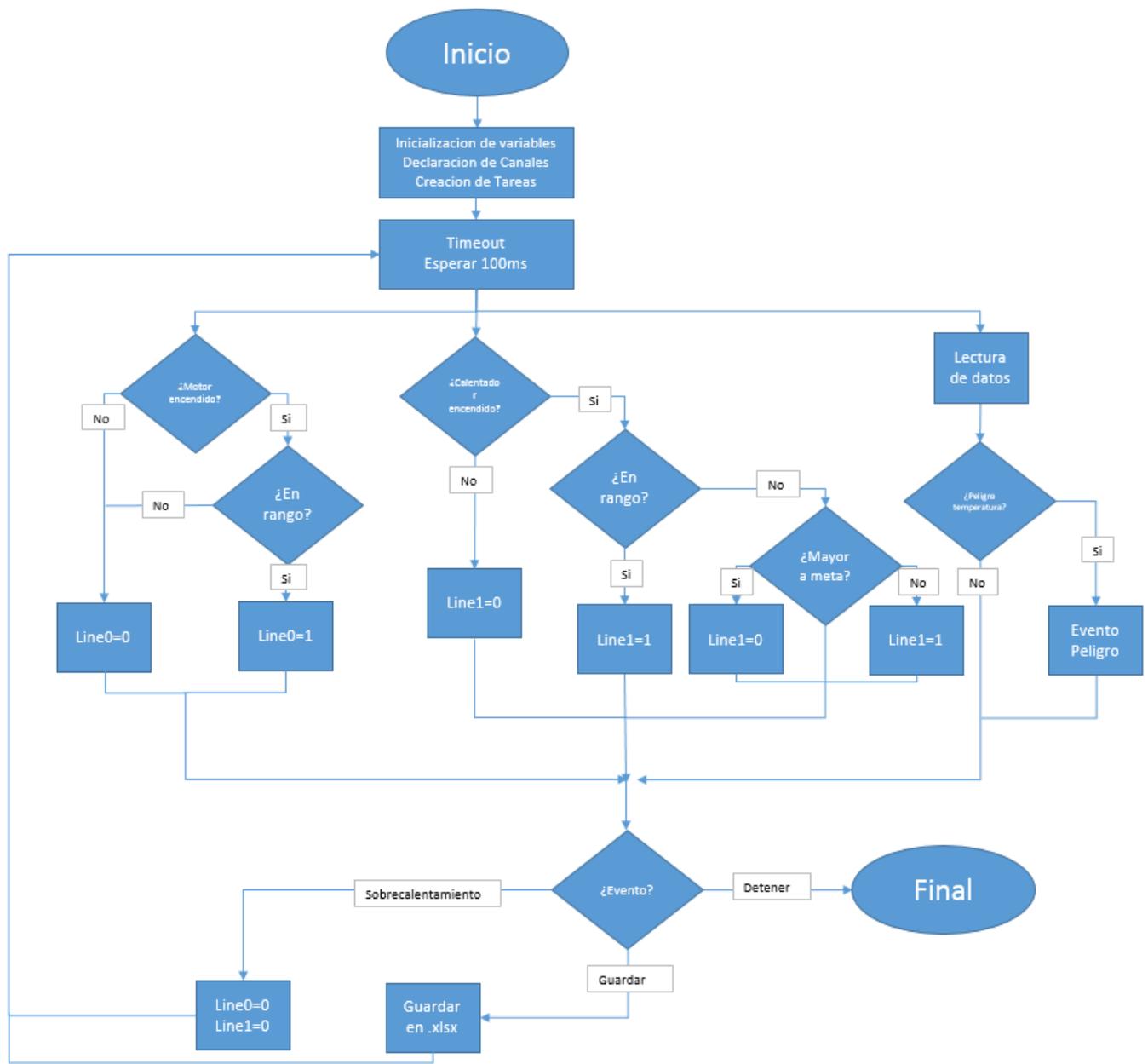


Figura 46. Diagrama de flujo. Hecho por mi autoría en Excel 2016.

## V Capítulo

El presente capítulo trata sobre las pruebas que se hicieron sobre el filamento producido durante las diferentes corridas del sistema.

### 5.1 Prueba #1 – Verificación de diámetro

Para verificar el diámetro del filamento se cortó una muestra de 1 metro y se midió el diámetro del filamento cada 10cm. La medición se realizó utilizando un Vernier (pie de rey) digital marca Tactix.

Tabla 9. Diámetro de una muestra de 1 metro de filamento extruido.

Longitud [±0.1 cm]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Diámetro [mm ± 0.1]	1,61	1,6	1,67	1,61	1,61	1,54	1,61	1,61	1,61	1,66	1,58

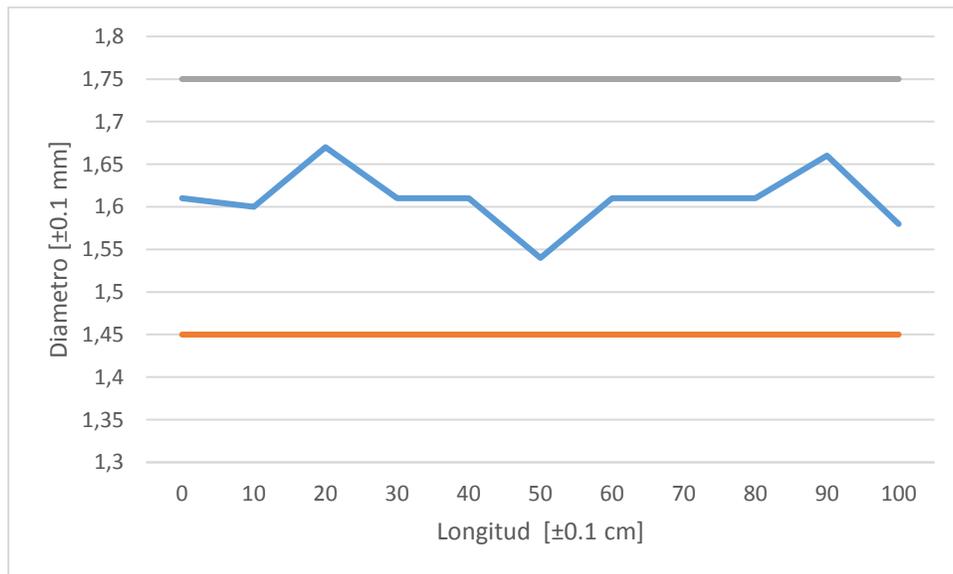
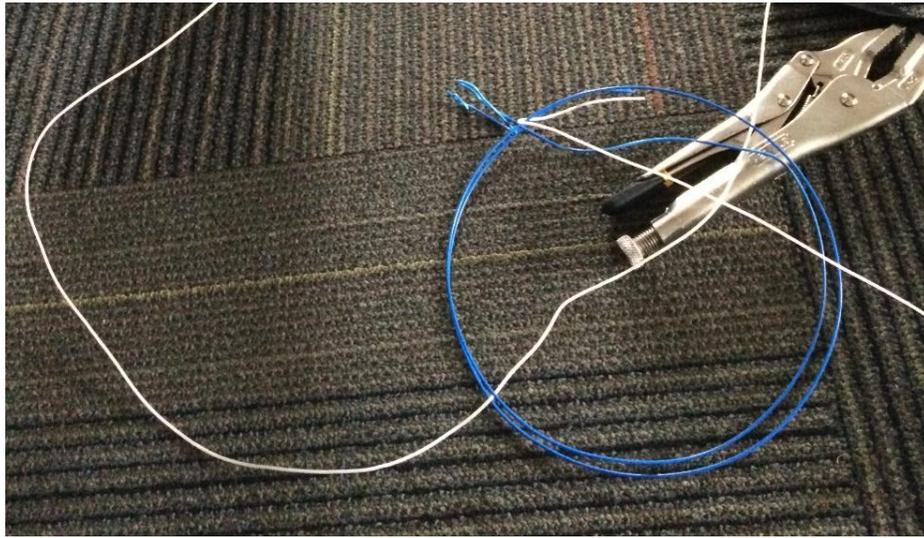


Figura 47. Diámetro de una muestra de 1 metro de filamento extruido.

Por tanto, el diámetro promedio es de 1,61 mm y se puede apreciar que el filamento extruido está dentro de las especificaciones de los objetivos planteados en el inicio del proyecto.



*Figura 48. Filamento extruido comparado con filamento comercial.*

## 5.2 Prueba #2 – Comparación de impresiones

La presente prueba busca comparar los resultados de una impresión hecho con filamento comercial y otra hecha con filamento extruido. Para dicha prueba se utilizó el mismo modelo .stl así como también la misma impresora. El modelo es un cubo de  $10\text{mm}^3$  y la impresora es una modelo PrintrBot Simple Metal.

Para el cálculo del error con respecto a cada eje se utilizó la siguiente formula.

*Ecuación 17. Error porcentual por eje*

$$\% \text{ error} = \frac{|\text{valor actual} - \text{valor teorico}|}{\text{valor teorico}} * 100$$

Para el cálculo del error total se utilizó la siguiente formula.

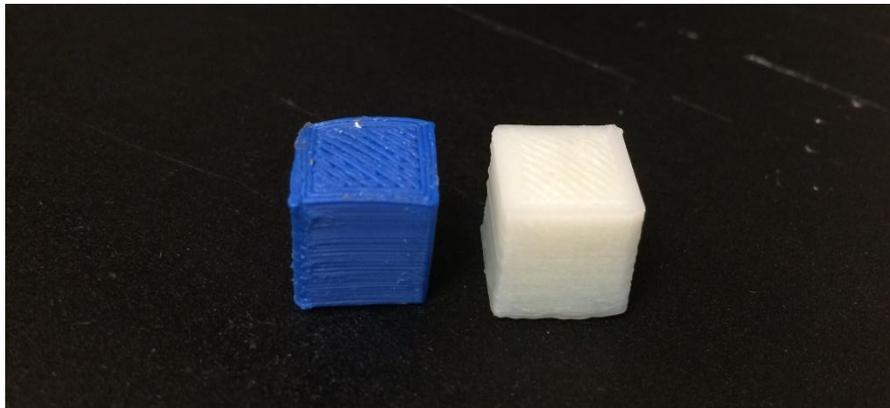
*Ecuación 18. Error total*

$$\% \text{ error total} = \sqrt[3]{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2}$$

En la siguiente imagen y tabla se presentan los resultados:

*Tabla 10. Comparación de impresión en 3D con dos tipos distinto de filamento.*

	Cubo de filamento comercial [ $\pm 0,01$ mm]	Porcentaje de error [%]	Cubo de filamento extruido [ $\pm 0,01$ mm]	Porcentaje de error [%]
X	9,96	0,4	10,13	1,3
Y	9,69	3,1	10,16	1,6
Z	10,74	7,4	10,50	5
	<b>TOTAL</b>	4,01	<b>TOTAL</b>	3,06



*Figura 49. Cubos impresos: cubo izquierdo es filamento comercial y derecho filamento extruido.*

Por tanto, se puede observar que para la impresión en 3D con iguales condiciones se puede imprimir en ambos casos con un error menor al 5% y se cuenta con una precisión mayor con el filamento extruido.

### 5.3 Prueba #3 – Módulo de Young

El módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico. Este parámetro depende de la dirección en el que se aplica la fuerza, pero es igual para los materiales elásticos lineales e isotrópicos.

Esta propiedad es característica de cada material y en nuestro caso se pretende relacionar con la calidad del filamento. Se buscará comparar el módulo de Young de filamento comercial y extruido.

*Ecuación 19. Módulo de Young.*

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F / A}{\Delta L / L}$$

Donde:

$E$  es el módulo de Young (o módulo de elasticidad)

$\sigma$  es la tensión ejercida.

$\varepsilon$  es la deformación unitaria.

$F$  es la fuerza aplicada sobre el elemento.

$A$  es el área transversal del elemento.

$\Delta L$  es el cambio de longitud del elemento.

$L$  es la longitud total del elemento.

Para el cálculo del área del filamento extruido se utilizó un promedio del diámetro de la Prueba #1. Por tanto, el área es de  $2,03 \text{ mm}^3$  o  $2,03 \text{ m}^3 * 10^{-6}$ . Para el área de filamento comercial se utilizó un área de  $2,41 \text{ m}^3 * 10^{-6}$ .

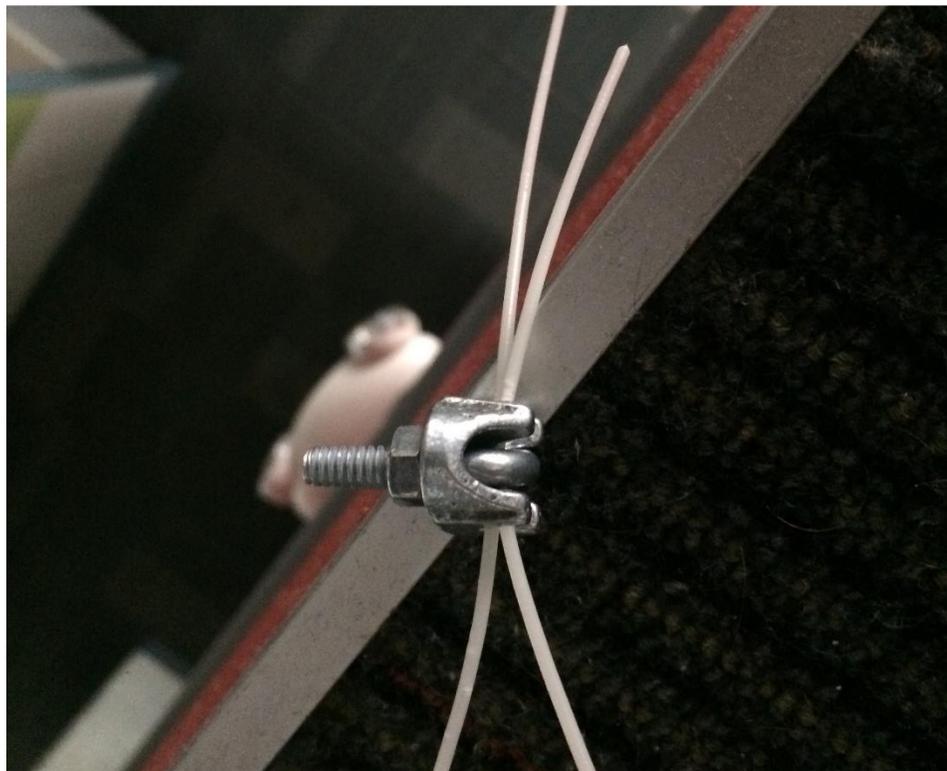
La fuerza que se le aplicó fue una fuerza conocida a partir de un peso conocido. Para esta prueba se le aplicaron 36,297 N de fuerza lo que equivale a un peso de 3,7kg utilizando a la constante de gravedad de  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

*Tabla 11. Resultados de prueba #3 sobre el Modulo de Young.*

	<b>Filamento Comercial</b>	<b>Filamento Extruido</b>
Longitud inicial [ $\pm 0.1\text{cm}$ ]	291,5	293,0
Longitud final [ $\pm 0.1\text{cm}$ ]	294,5	296,5
Elongación nominal [ $\pm 0.1\text{cm}$ ]	3	3,5
Deformación unitaria	0,010291595	0,011945392
Esfuerzo [MPa]	15,061	17,880
Módulo de Young [GPa]	1,463	1,497

De acuerdo a [43], el Módulo de Young del plástico ABS varía entre 1.7 a 2.8 GPa. Se puede reconocer que el Módulo de Young obtenido en la presente prueba se sale del rango reportado en las fuentes lo que puede significar que haría falta repetir las pruebas o que el rango reportado en las fuentes varía con respecto al tipo de plástico ABS de este fabricante.

Sin embargo, también se puede concluir que existe una diferencia de apenas el 2-3% entre ambas muestras y por tanto bajo este concepto se puede considerar que tienen calidades similares.



*Figura 50. Prueba #3 para medición de módulo de Young.*

## VI Capítulo

### 6.1 Presupuesto

El valor total del proyecto se presenta en la siguiente tabla. Eso no toma en cuenta el tiempo de desarrollo de un ingeniero pues este gasto se incrementaría en ₡1.200.000.

Tabla 12. Costo total del proyecto.

<b>Sensores y Actuadores</b>		
Motor	₡40.000	Comprado en Aliexpress.com
Termocupla (x3)	\$21	0\$ Obtenidas de National Instruments
<b>Elementos eléctricos</b>		
Calentador	\$10	Comprado en eBay.com
Cargador de computadoras (x2)	₡8.000	Comprado en eBay.com
Conectores machos y hembras	\$17	Comprado en microjpm.com
<b>Elementos mecánicos</b>		
Cubo	₡3.000	Ferretería EPA
Tornillo sin fin	₡4.000	Ferretería EPA
Tolva*	₡0	Impresa en 3D
Base de cañón	₡1.000	Ferretería EPA
Cañón	₡1.200	Ferretería EPA
Nipple	₡2.000	Ferretería EPA
Dado	₡5.000	Comprado en Aliexpress.com
Base de motor*	₡15.000	Se fabricó en taller
Cables	\$0	
Tornillos	\$2	Ferretería EPA
Tuercas	\$2	Ferretería EPA
<b>Productos de National Instruments</b>		
cDAQ 9178 [34]	\$1.326	0\$ Obtenidas de National Instruments
NI 9211 [36]	\$396	0\$ Obtenidas de National Instruments
NI 9481 [35]	\$356	0\$ Obtenidas de National Instruments
LabVIEW Full Development Environment [44]	\$3.000	0\$ Obtenidas de National Instruments
<b>Precio Real:</b>		<b>\$5.257</b>
<b>Precio Final:</b>		<b>\$163</b>

Nota: Se utilizó un tipo de cambio de un dólar por ₡600.

## 6.2 Análisis económico

1. El costo de 1kg de filamento de un proveedor local es de 40\$, aproximadamente ₡24000. [45]
2. El costo de producción de 1kg de filamento a partir de plástico reciclado es de \$2,1 aproximadamente ₡1260.
3. El costo de producción de 1kg de filamento a partir de plástico industrial es de \$6,5 aproximadamente ₡3900.
4. La inversión se paga en 28 horas lo que es lo mismo, después de producir 4,3 kg.

Las anteriores conclusiones se obtuvieron a partir del siguiente desarrollo financiero.

Tabla 13. Costo para producir 1kg de filamento.

Rubrica	Costo
Costo eléctrico	\$2,1
Costo de materia prima de primera calidad	\$4,4
Costo de materia prima de segunda calidad	\$0

*Nota: materia prima de primera calidad hace referencia a plástico industrial y materia prima de segunda calidad hace referencia a plástico reciclado de esta primera calidad.*

El consumo eléctrico se divide de la siguiente manera:

Tabla 14. Consumo eléctrico por hora.

Actuador	Potencia [W]	Consumo [kWh]	Costo [₡/h]
Calentador	38	2,280	124,85
Motor	20	1,200	65,71
	<b>TOTAL</b>	3,480	190,56

*Nota: no se toma en cuenta el costo de electricidad de la computadora.*

El costo de 1kWh para una tarifa residencial en la banda de consumo 0-300kWh en Período Valle (6:00am-10:00am y 12:30pm a 5:30pm) es de ₡54,76. [46]

Por tanto, se obtiene un costo de ₡190,56 por hora. En total se calculó que se toma 6,5 horas para producir 1kg de filamento. Esto implica que las 6,5 horas tienen un costo aproximado de ₡1238 y que a su vez equivale a \$2,1

*Nota: se realiza un tipo de cambio de ₡600 por dólar.*

Para calcular que se toma 6,5 horas para producir 1kg de filamento se comprobó experimentalmente que en un período de 3 minutos se puede extruir un aproximado de 2,86m de filamento que pesaba aproximadamente 7,69g.

$$\begin{aligned}3min &\rightarrow 2,86m \rightarrow 7,69g \\1min &\rightarrow 2,56g \\390,625min &\rightarrow 1000g \\6,51h &\rightarrow 1kg\end{aligned}$$

∴ El costo de producir filamento reciclado es aproximadamente 20 veces más barato que un filamento comercial y el costo de inversión se puede recuperar en aproximadamente 28 horas que equivalen a la venta de 4,3 kg de filamento.

Este cálculo se realizó con el punto de equilibrio. El mismo se alcanza cuando los costos totales se equiparán con los ingresos totales, en otras palabras, cuando la inversión inicial más el costo variable es igual a la venta total.

*Ecuación 20. Cálculo de punto de equilibrio.*

$$\text{Inversión Inicial} + \text{Costos Variables} = \text{Venta Total}$$

$$\$163 + \$2,1 * x = \$40 * x$$

$$x = \frac{\$163}{\$37,9} = 4,3 \text{ kg}$$

Donde x es la cantidad de kg de filamento que se deben producir y vender.

## VII Capítulo

### 7.1 Conclusiones

- Se desarrolló un sistema mecatrónico para la producción de filamento para impresión en 3D a partir de desechos plásticos de tipo ABS utilizando equipo de National Instruments.
- El sistema de adquisición de datos fue desarrollado utilizando la plataforma CompactDAQ de National Instruments al utilizar el chasis cDAQ 9178, el módulo de adquisición de temperatura NI 9211.
- El sistema de control de actuadores fue desarrollado utilizando la plataforma CompactDAQ de National Instruments al utilizar el chasis cDAQ 9178 y el módulo de relays electromecánicos NI 9481.
- El prototipo de sistema mecatrónico fue capaz de transformar desechos plásticos ABS en filamento para impresión en 3D.
- Se comparó el costo de producir filamento contra el costo de adquirirlo comercialmente.

### 7.2 Resultados

- El filamento extruido se encuentra dentro del rango de  $\pm 0.3\text{mm}$  de uno comercial de diámetro 1.75mm.
- La diferencia del Módulo de Young entre el filamento extruido y el comercial es menor al 3%.
- Se obtuvo mejor resultado a la hora de imprimir un cubo de calibración con respecto al filamento comercial.
- Es aproximadamente 20 veces más barato producir filamento de 1.75mm de diámetro que comprar el filamento comercial analizado.
- El retorno de inversión se dará luego de imprimir 4,3 kg de filamento.

### 7.3 Recomendaciones

- Utilizar un motor de mayor potencia pues el actual se encuentra sobrecargado.
- Implementar diferentes pruebas para comparar la funcionalidad de este sistema con diferentes tipos de plásticos, por ejemplo: HDPE, PET, LDPE, etc.
- Implementar un sistema de embobinado del filamento producido para darle forma en un carrete.
- El mismo podrá contar con un control PID donde su variable de control sea la velocidad y la variable a controlar el diámetro.

## Bibliografía

- [1] K. d. S. Barros, "Influence of the use/user profile in the LCA of 3d printed products," *Elsevier*, p. 6, 2016.
- [2] M. D. J. M. P. Christian Baechler, "Distributed Recycling of Waste Polymer into RepRap Feedstock," *Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada*, p. 16, 2013.
- [3] B. Muschard and G. Seliger, "Realization of a learning environment to promote sustainable value creation in areas with insufficient infrastructure," *The 5th Conference on Learning Factories 2015*, pp. 70-75, 2015.
- [4] Wittbrodt, Glover, Laureto, Anzalone, Oppliger, Irwin and Pearce, "Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers," *Mechatronics*, pp. 713-726, 2013.
- [5] Singh and Sharma, "Integrated Plastic Waste Management: Environmental and Improved Health Approaches," *International Conference on Solid Waste Management*, pp. 1-9, 2015.
- [6] Programa Estado de la Nacion, "Informe XIX Estado de la Nacion 2013 en Desarrollo Humano Sostenible," San Jose, 2013.
- [7] Mundo, El, "25% de los residuos sólidos que se producen en Costa Rica terminan contaminando ríos y playas," 2 Julio 2016. [Online]. Available: <http://www.elmundo.cr/25-de-los-residuos-solidos-que-se-producen-en-costa-rica-terminan-contaminando-rios-y-playas/>.
- [8] K. V. Wong and A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," *International Scholarly Research Network*, 2012.
- [9] M. Kreiger, M. Mulder, A. Glover and J. Pearce, "Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament," *Journal of Cleaner Production*, pp. 90-96, 2014.
- [10] Precious Plastic, 5 Julio 2016. [Online]. Available: <https://preciousplastic.com>.
- [11] M. Kreiger, G. C. Anzalone and A. G. G. J. M. P. M. L. Mulder, "Distributed Recycling of Post-Consumer Plastic Waste in Rural Areas," *Michigan Technological University Digital Commons @ Michigan Tech*, p. 7, 2013.
- [12] 3. Printers, "What materials do 3D Printers use?," 2 Julio 2016. [Online]. Available: <http://www.3dprinterhelp.co.uk/what-materials-do-3d-printers-use/>.
- [13] Association of Plastic Manufacturers in Europe, "Plastic Use," 2007.
- [14] Birley, Haworth and Batchelor, *Physics of Plastics: Processing, Properties and Materials Engineering*, Cheshire: Hanser, 1998.
- [15] P. Cameron, *Fundamento de ciencia de los polímeros*.
- [16] Rao, Biplob, Paramasivan and Sinha, "Treatment of Plastic Waste by Melt Densification," *Asian Nuclear Prospects 2010*, pp. 502-506, 2010.

- [17] AreaTecnologia, "Ensayo de Traccion," 2017. [Online]. Available: <http://www.areatecnologia.com/materiales/imagenes/ensayo-de-traccion.jpg>.
- [18] MatWeb, "Material Property Data," January 2006. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=3a8afcddac864d4b8f58d40570d2e5aa&ckck=1>. [Accessed 5 May 2017].
- [19] "Recytrans," 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://www.recytrans.com/blog/trituracion-de-plastico/>.
- [20] Untha, "Waste shredding case studies".
- [21] K. Glogowska and J. Rozpedowski, "Examination of shredding process parameters and the properties of recycle," *Advances in Science and Technology*, pp. 6-7, 2016.
- [22] Inhabitat, 2017. [Online]. Available: <http://inhabitat.com/marcus-thymarks-open-source-filamaker-shreds-and-recycles-plastic-for-3d-printing/filamaker-marcus-thymark-3d-printing-recycling-plastic-reprocessing-grinding-3>.
- [23] Filamaker, "Filamaker," 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://filamaker.eu/product/mini-shredder/>.
- [24] Thingiverse, "Compost Shredder," 7 June 2014. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:356580>.
- [25] V. Goodship, *Introduction to Plastics Recycling*, Londres: Smithers Srapra, 2007.
- [26] S. Kalpakjian, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Pearson, 2007.
- [27] A. Majumdar, *Heat Transfer Basics*.
- [28] Sapiensman, *Documentos Técnicos: Medición de temperatura*.
- [29] Sterling, "Thermocouple Technical Reference Information," 22 Febrero 2017. [Online]. Available: <https://www.sterlingsensors.co.uk/thermocouples>.
- [30] T. A. Osswel, *Understanding Polymer Processing*, Munich: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [31] "Interempresas," 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5001-Maquinaria-de-extrusion.html>.
- [32] J. Deng, "Energy monitoring and quality control of a single screw extruder," *Elsevier*, p. 11, 2014.
- [33] Universidad de Oriente, "Documentos Técnicos: Oficios Técnicos".
- [34] National Instruments, "NI cDAQ-9178 Specifications," 2017.
- [35] National Instruments, "NI 9481 Specifications," 2017.
- [36] National Instruments, "NI 9211," 2017.
- [37] V. M. Alfaro, *Método de identificación de modelos de odern reducido de tres puntos 123c*, San Pedro: Universidad de Costa Rica, 2008.

- [38] National Instruments, "How to Choose the Right Relay," 10 November 2015. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/2774/en/>.
- [39] NI Corporation, "Building an NI Motion Control System," 10 Febrero 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/12127/en/>.
- [40] E. Vargas, "Modelo y control de motor DC," 2013.
- [41] *Video 1 de Mayo*. [Film]. Costa Rica.2017.
- [42] National Instruments, "Termocouple Type K," 2016. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/211295>.
- [43] HXX, *Materiales de impresión 3D: ABS*, 2015.
- [44] National Instruments, "LabVIEW," [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/buy/>.
- [45] CrCibernetica, "CrCibernetica 3D Printers," 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://www.crcibernetica.com/3d-printers/>.
- [46] CNFL, "Tarifas vigentes," [Online]. Available: <https://www.cnfl.go.cr/index.php/tarifas-vigentes-r>. [Accessed 25 Mayo 2017].
- [47] NI Corporation, "LabVIEW SoftMotion Module," 2016. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14234>.
- [48] Perpetual Plastic, 7 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://www.perpetualplasticproject.com>.
- [49] S. Review, "Plastic waste inputs from land into the ocean," 6 Julio 2016. [Online]. Available: <http://science.sciencemag.org/content/347/6223/768>.
- [50] R. Resnik, *Fisica 1*, 2002.
- [51] 3. Printing, "What is 3D printing?," 2 Julio 2016. [Online]. Available: <http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>.
- [52] P. Plastics, "Youtube," 25 Julio 2016. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=fsqLJNyrVss>.
- [53] Mathot, *Calorimetry and Thermal Analysis of Polymers*, Múnich Vienna New York: Hanser Publishers, 1994.
- [54] H. Lyman, "Thingiverse," 7 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://www.thingiverse.com/thing:1199870>.
- [55] S. J. Leigh, "A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors," 2012.
- [56] I. N. d. T. Industrial. [Online].
- [57] Imprimalia, "Reciclaje de plástico para impresión 3D," 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://www.imprimalia3d.com/noticias/2014/03/11/001605/reciclaje-pl-stico-impresi-n-3d>.
- [58] P. Diamandis, "3D Print me a jet engine or a car," 3 Julio 2016. [Online]. Available: <http://www.diamandis.com/blog/3d-print-me-a-jet-engine-or-a-car>.

- [59] "Techland," 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://techland.time.com/2013/03/04/how-an-83-year-old-inventor-beat-the-high-cost-of-3d-printing/>.
- [60] Industial, Instituto Nacional de Tecnología, "Noticiero Tecnológico Semanal," 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://www.inti.gob.ar/noticiero/2015/noticiero466.htm>.
- [61] National Instruments, "NI 9474 Specifications," 2017.
- [62] RepRap, "HDPE Wiki," 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <http://reprap.org/wiki/HDPE>.
- [63] NI Corporation, "AKM Brushless Servo Motors," 2016. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/209133>.
- [64] 3D Printing, 22 Marzo 2017. [Online]. Available: <http://3dprintingforbeginners.com/how-to-make-diy-filament-for-your-3d-printer/>.
- [65] Filabot, 8 Agosto 2016. [Online]. Available: <https://www.filabot.com/collections/filabot-core>.
- [66] National Instruments, "Pulse Width Modulation (PWM) Using NI-DAQmx and LabVIEW," 25 April 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/tutorial/2991/en/>.
- [67] National Instruments, "NI 9205," 2017.
- [68] National Instruments, "NI cRIO-9068," 2016. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/211620>.
- [69] National Instruments, "NI Motion Control," 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/motion/>.

# Anexo A. Carta de aceptación



## Anexo A

## Carta de Aceptación por parte de la Empresa

8 de febrero de 2017

Ingeniera  
Arys Indira Carrasquilla Batista  
Coordinadora  
Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Estimada Ingeniera:

Por este medio, me permito comunicarle que hemos aceptado al estudiante **Andrés Guzmán Toledo**, cédula **801090815**, carnet ITCR **201224034**, en nuestra empresa para realice el proyecto titulado **Sistema de reciclaje de plástico para la fabricación de filamentos para impresión en 3D** a realizarse en un lapso mínimo de 16 semanas calendario (del 08 de febrero al 03 de junio de 2016).

Hago de su conocimiento que hemos leído y aprobado el Anteproyecto que nos ha presentado el Sr. **Guzmán**. Dicho documento cumple con los requerimientos de nuestra empresa y haremos todos los esfuerzos posibles por aportar los recursos necesarios para su exitosa conclusión.

Además, le informo que hemos recibido una copia del documento "Normas de Proyecto de Graduación para empresas" del programa de Licenciatura de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en el cual se detallan todos los aspectos a considerar durante este proceso.

Atentamente,

Licenciado Ingeniero Eletrónico. David Jose Ramirez Arroyo

National Instruments

**Sello de la empresa**

## **Anexo B. Hoja de Información del Proyecto**

### **Datos del estudiante:**

**Nombre:** Andrés Guzmán Toledo

**Cédula:** 801090815 **Carné ITCR:** 201224034

**Dirección de su residencia:** Residencial Danzas del Sol Oeste, San Juan de la Unión, Cartago.

**Teléfono de residencia:** 22712275

**Teléfono celular:** 88869436

**Correo electrónico:** andres.gt94@hotmail.com

### **Información del proyecto:**

**Nombre del Proyecto:** Sistema de reciclaje de plástico para la fabricación de filamento para impresión en 3D

#### **Información de la empresa:**

**Nombre:** National Instruments

**Actividad Principal:** Venta de software y hardware para ingeniería

**Zona:** Heredia, Lagunilla, La Valencia

**Dirección:** Lagunilla, de Jardines del Recuerdo 1Km al Oeste

**Teléfono:** +506 2562 0400

### **Información del encargado/asesor en la empresa:**

**Nombre:** David José Ramirez Arroyo

**Puesto que ocupa:** Ingeniero de Aplicaciones

**Departamento:** Ingeniería de Sistemas y Aplicaciones

**Profesión:** Ingeniero en Electrónica **Grado académico:** Licenciado

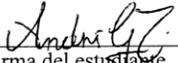
**Teléfono:** +506 2562 0063

**Correo electrónico:** [david.ramirez@ni.com](mailto:david.ramirez@ni.com)

## Anexo C. Carta de entendimiento

Señores  
Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Andrés Guzmán Toledo carné 201224034, autorizo a la Biblioteca José Figueres Ferrer del Instituto Tecnológico de Costa Rica a disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con el título, Sistema de reciclaje de plástico para la fabricación de filamento para impresión en 3D para ser ubicado en la biblioteca Digital y ser ingresado a través de la red Internet.

  
Firma del estudiante  
Cédula: 8-0109-0815

## Anexo D. Tipos de plásticos y cómo reconocerlos

Tipo	Nombre	Propiedades	Usos comunes	Prueba a la llama
PET	Tereftalato de polietileno	Transparente, resistente, evita humedad y gases.	Bebidas suaves embotelladas...	Llama amarilla con un poco de humo
HDPE	Polietileno de alta densidad	Duro a semi flexible, resistente a solventes	Bolsas plásticas, contenedores shampoo...	Poco inflamable, huele a candela
PVC	Poli cloruro de vinilo	Duro, puede ser claro	Contenedores de cosméticos, tuberías...	Llama amarilla, virutas verdes
LDPE	Polietileno de baja densidad.	Suave, flexible, superficie aceitosa, se raya fácilmente...	Bolsas de basura, botellas de exprimir, bolsas reusables...	Poco inflamable, huele a candela
PP	Polipropileno	Duro pero flexible, translucido, superficie aceitosa...	Botellas, macetas, contenedores de comida, pajillas...	Llama de la punta es azul con amarillo
PS	Poliestireno	Claro, vidrioso, opaco...	Cobertores de CD, imitación de vidrio, juguetes...	Humo denso
Otros	Todos los demás	Dependen del tipo	Electrónicos...	Todos los demás

Tabla 15. Prueba visual para identificación de distintos plásticos

	floats on:	alcohol	vegetable oil	water	glycerin
PET		no	no	no	no
HDPE		no	no	yes	yes
PVC		no	no	no	no
LDPE		yes	no	yes	yes
PP		yes	yes	yes	yes
PS		no	no	no	yes

Ilustración 1. Propiedades de suspensión para distintos plásticos y líquidos

# Anexo E. Configuración del ordenador y de NI MAX

The screenshot displays the National Instruments Measurement & Automation Explorer (MAX) interface. The left pane shows a tree view of the system configuration, including various software packages and drivers. The main pane is divided into two sections: System Settings and System Resources.

**System Settings**

Hostname	CRSJODT-A1ZU729
DNS Name	CRSJODT-A1ZU729.ni.corp.natinst.com
Vendor	Dell Inc.
Model	Precision T3610
Serial Number	72S7X12
Firmware Version	A07
Hardware Revision	01
Operating System	Microsoft Windows 7 Enterprise (Service Pack 1)
System Start Time	18/05/2017 06:36 p.m.
Description	CJO-AGUZMAN
System Configuration Web Access	Local Only

**System Resources**

Total Physical Memory	7,95 GB
Free Physical Memory	3,67 GB
Total Virtual Memory	15,9 GB
Free Virtual Memory	11,0 GB
Primary Disk Capacity	238 GB
Primary Disk Free Space	168 GB
CPU Model	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1620 v2 @ 3.70GHz
CPU Total Load	6%   0%   12%   0%   25%   0%   12%
CPU Interrupt Load	6%   0%   6%   0%   6%   0%   6%

The right pane contains a 'Back' button and a 'Hide Help' button. Below these, there is a section titled 'National Instruments Measurement & Automation Explorer' with a brief description. A 'What do you want to do?' section lists several tasks with links: 'Manage my devices and interfaces', 'Manage my installed National Instruments software', 'Manage virtual channels or tasks for my devices', 'Create scales for my virtual instruments', 'Configure my IVI instrument drivers', and 'Import/export my device configuration file'. A 'Note' section explains that some categories are device-specific and that the IVI category only appears if IVI is installed. At the bottom, there is a link to the 'National Instruments Technical Support website' and a 'For more information' section.

## Anexo F. Datos de caracterización de calentador

Segundos	Amplitud °C - TC	12,1875	35 °C	24,6875	55 °C
0	32 °C	12,5	36 °C	25	56 °C
0,3125	32 °C	12,8125	36 °C	25,3125	56 °C
0,625	32 °C	13,125	36 °C	25,625	57 °C
0,9375	32 °C	13,4375	37 °C	25,9375	57 °C
1,25	31 °C	13,75	37 °C	26,25	58 °C
1,5625	31 °C	14,0625	37 °C	26,5625	59 °C
1,875	32 °C	14,375	38 °C	26,875	59 °C
2,1875	32 °C	14,6875	38 °C	27,1875	60 °C
2,5	31 °C	15	39 °C	27,5	60 °C
2,8125	32 °C	15,3125	39 °C	27,8125	61 °C
3,125	31 °C	15,625	40 °C	28,125	62 °C
3,4375	31 °C	15,9375	40 °C	28,4375	62 °C
3,75	31 °C	16,25	40 °C	28,75	63 °C
4,0625	31 °C	16,5625	41 °C	29,0625	64 °C
4,375	31 °C	16,875	41 °C	29,375	64 °C
4,6875	31 °C	17,1875	42 °C	29,6875	65 °C
5	31 °C	17,5	42 °C	30	65 °C
5,3125	32 °C	17,8125	43 °C	30,3125	66 °C
5,625	32 °C	18,125	43 °C	30,625	67 °C
5,9375	32 °C	18,4375	44 °C	30,9375	67 °C
6,25	32 °C	18,75	44 °C	31,25	68 °C
6,5625	32 °C	19,0625	45 °C	31,5625	68 °C
6,875	32 °C	19,375	45 °C	31,875	69 °C
7,1875	32 °C	19,6875	46 °C	32,1875	69 °C
7,5	32 °C	20	46 °C	32,5	70 °C
7,8125	32 °C	20,3125	47 °C	32,8125	71 °C
8,125	32 °C	20,625	47 °C	33,125	71 °C
8,4375	32 °C	20,9375	48 °C	33,4375	72 °C
8,75	32 °C	21,25	49 °C	33,75	72 °C
9,0625	33 °C	21,5625	49 °C	34,0625	73 °C
9,375	33 °C	21,875	50 °C	34,375	73 °C
9,6875	33 °C	22,1875	50 °C	34,6875	74 °C
10	33 °C	22,5	51 °C	35	74 °C
10,3125	34 °C	22,8125	51 °C	35,3125	75 °C
10,625	34 °C	23,125	52 °C	35,625	76 °C
10,9375	34 °C	23,4375	53 °C	35,9375	76 °C
11,25	34 °C	23,75	53 °C	36,25	77 °C
11,5625	35 °C	24,0625	54 °C	36,5625	77 °C
11,875	35 °C	24,375	54 °C	36,875	78 °C

37,1875	78 °C
37,5	79 °C
37,8125	79 °C
38,125	80 °C
38,4375	80 °C
38,75	81 °C
39,0625	81 °C
39,375	82 °C
39,6875	82 °C
40	83 °C
40,3125	83 °C
40,625	84 °C
40,9375	84 °C
41,25	85 °C
41,5625	85 °C
41,875	86 °C
42,1875	86 °C
42,5	87 °C
42,8125	87 °C
43,125	88 °C
43,4375	88 °C
43,75	89 °C
44,0625	89 °C
44,375	90 °C
44,6875	90 °C
45	91 °C
45,3125	91 °C
45,625	91 °C
45,9375	92 °C
46,25	92 °C
46,5625	93 °C
46,875	93 °C
47,1875	94 °C
47,5	94 °C
47,8125	95 °C
48,125	95 °C
48,4375	96 °C
48,75	96 °C
49,0625	97 °C
49,375	97 °C
49,6875	97 °C

50	98 °C
50,3125	98 °C
50,625	99 °C
50,9375	99 °C
51,25	100 °C
51,5625	100 °C
51,875	100 °C
52,1875	101 °C
52,5	101 °C
52,8125	102 °C
53,125	102 °C
53,4375	102 °C
53,75	103 °C
54,0625	103 °C
54,375	104 °C
54,6875	104 °C
55	105 °C
55,3125	105 °C
55,625	105 °C
55,9375	106 °C
56,25	106 °C
56,5625	107 °C
56,875	107 °C
57,1875	107 °C
57,5	108 °C
57,8125	108 °C
58,125	109 °C
58,4375	109 °C
58,75	109 °C
59,0625	110 °C
59,375	110 °C
59,6875	110 °C
60	111 °C
60,3125	111 °C
60,625	112 °C
60,9375	112 °C
61,25	112 °C
61,5625	113 °C
61,875	113 °C
62,1875	113 °C
62,5	114 °C

62,8125	114 °C
63,125	114 °C
63,4375	115 °C
63,75	115 °C
64,0625	115 °C
64,375	116 °C
64,6875	116 °C
65	117 °C
65,3125	117 °C
65,625	117 °C
65,9375	118 °C
66,25	118 °C
66,5625	118 °C
66,875	119 °C
67,1875	119 °C
67,5	119 °C
67,8125	120 °C
68,125	120 °C
68,4375	120 °C
68,75	121 °C
69,0625	121 °C
69,375	121 °C
69,6875	122 °C
70	122 °C
70,3125	122 °C
70,625	122 °C
70,9375	123 °C
71,25	123 °C
71,5625	123 °C
71,875	124 °C
72,1875	124 °C
72,5	124 °C
72,8125	125 °C
73,125	125 °C
73,4375	125 °C
73,75	125 °C
74,0625	126 °C
74,375	126 °C
74,6875	126 °C
75	126 °C
75,3125	127 °C

75,625	127 °C
75,9375	127 °C
76,25	127 °C
76,5625	128 °C
76,875	128 °C
77,1875	128 °C
77,5	129 °C
77,8125	129 °C
78,125	129 °C
78,4375	130 °C
78,75	130 °C
79,0625	130 °C
79,375	131 °C
79,6875	131 °C
80	131 °C
80,3125	132 °C
80,625	132 °C
80,9375	132 °C
81,25	133 °C
81,5625	133 °C
81,875	133 °C
82,1875	134 °C
82,5	134 °C
82,8125	134 °C
83,125	134 °C
83,4375	134 °C
83,75	135 °C
84,0625	135 °C
84,375	135 °C
84,6875	136 °C
85	136 °C
85,3125	136 °C
85,625	136 °C
85,9375	137 °C
86,25	137 °C
86,5625	137 °C
86,875	137 °C
87,1875	137 °C
87,5	138 °C
87,8125	138 °C
88,125	138 °C

88,4375	138 °C
88,75	139 °C
89,0625	139 °C
89,375	139 °C
89,6875	139 °C
90	140 °C
90,3125	140 °C
90,625	140 °C
90,9375	140 °C
91,25	140 °C
91,5625	141 °C
91,875	141 °C
92,1875	141 °C
92,5	141 °C
92,8125	142 °C
93,125	142 °C
93,4375	142 °C
93,75	143 °C
94,0625	143 °C
94,375	143 °C
94,6875	144 °C
95	144 °C
95,3125	144 °C
95,625	144 °C
95,9375	144 °C
96,25	144 °C
96,5625	144 °C
96,875	145 °C
97,1875	145 °C
97,5	145 °C
97,8125	145 °C
98,125	145 °C
98,4375	145 °C
98,75	146 °C
99,0625	146 °C
99,375	146 °C
99,6875	147 °C
100	147 °C
100,3125	147 °C
100,625	147 °C
100,9375	148 °C

101,25	148 °C
101,5625	148 °C
101,875	149 °C
102,1875	149 °C
102,5	149 °C
102,8125	149 °C
103,125	149 °C
103,4375	150 °C
103,75	150 °C
104,0625	150 °C
104,375	150 °C
104,6875	151 °C
105	151 °C
105,3125	151 °C
105,625	151 °C
105,9375	151 °C
106,25	152 °C
106,5625	152 °C
106,875	152 °C
107,1875	152 °C
107,5	153 °C
107,8125	153 °C
108,125	153 °C
108,4375	153 °C
108,75	153 °C
109,0625	153 °C
109,375	153 °C
109,6875	153 °C
110	154 °C
110,3125	154 °C
110,625	154 °C
110,9375	154 °C
111,25	154 °C
111,5625	154 °C
111,875	154 °C
112,1875	155 °C
112,5	155 °C
112,8125	155 °C
113,125	155 °C
113,4375	155 °C
113,75	156 °C

114,0625	156 °C
114,375	156 °C
114,6875	156 °C
115	156 °C
115,3125	156 °C
115,625	156 °C
115,9375	156 °C
116,25	156 °C
116,5625	157 °C
116,875	157 °C
117,1875	157 °C
117,5	157 °C
117,8125	157 °C
118,125	158 °C
118,4375	158 °C
118,75	158 °C
119,0625	158 °C
119,375	159 °C
119,6875	159 °C
120	159 °C
120,3125	159 °C
120,625	160 °C
120,9375	160 °C
121,25	160 °C
121,5625	160 °C
121,875	161 °C
122,1875	161 °C
122,5	161 °C
122,8125	161 °C
123,125	162 °C
123,4375	162 °C
123,75	162 °C
124,0625	162 °C
124,375	163 °C
124,6875	163 °C
125	163 °C
125,3125	163 °C
125,625	164 °C
125,9375	164 °C
126,25	164 °C
126,5625	164 °C

126,875	164 °C
127,1875	165 °C
127,5	165 °C
127,8125	165 °C
128,125	165 °C
128,4375	165 °C
128,75	166 °C
129,0625	166 °C
129,375	166 °C
129,6875	166 °C
130	166 °C
130,3125	167 °C
130,625	167 °C
130,9375	167 °C
131,25	167 °C
131,5625	167 °C
131,875	168 °C
132,1875	168 °C
132,5	168 °C
132,8125	168 °C
133,125	168 °C
133,4375	168 °C
133,75	168 °C
134,0625	169 °C
134,375	169 °C
134,6875	169 °C
135	169 °C
135,3125	169 °C
135,625	170 °C
135,9375	170 °C
136,25	170 °C
136,5625	170 °C
136,875	170 °C
137,1875	170 °C
137,5	170 °C
137,8125	170 °C
138,125	170 °C
138,4375	171 °C
138,75	171 °C
139,0625	171 °C
139,375	171 °C

139,6875	171 °C
140	171 °C
140,3125	171 °C
140,625	171 °C
140,9375	171 °C
141,25	171 °C
141,5625	172 °C
141,875	172 °C
142,1875	172 °C
142,5	172 °C
142,8125	172 °C
143,125	172 °C
143,4375	172 °C
143,75	173 °C
144,0625	173 °C
144,375	173 °C
144,6875	173 °C
145	173 °C
145,3125	173 °C
145,625	174 °C
145,9375	174 °C
146,25	174 °C
146,5625	174 °C
146,875	174 °C
147,1875	174 °C
147,5	174 °C
147,8125	174 °C
148,125	175 °C
148,4375	175 °C
148,75	175 °C
149,0625	175 °C
149,375	175 °C
149,6875	176 °C
150	176 °C
150,3125	176 °C
150,625	176 °C
150,9375	176 °C
151,25	176 °C
151,5625	176 °C
151,875	177 °C
152,1875	177 °C

152,5	177 °C
152,8125	177 °C
153,125	177 °C
153,4375	177 °C
153,75	177 °C
154,0625	178 °C
154,375	178 °C
154,6875	178 °C
155	178 °C
155,3125	178 °C
155,625	178 °C
155,9375	178 °C
156,25	178 °C
156,5625	178 °C
156,875	179 °C
157,1875	179 °C
157,5	179 °C
157,8125	179 °C
158,125	179 °C
158,4375	179 °C
158,75	179 °C
159,0625	180 °C
159,375	180 °C
159,6875	180 °C
160	180 °C
160,3125	180 °C
160,625	180 °C
160,9375	180 °C
161,25	180 °C
161,5625	181 °C
161,875	181 °C
162,1875	181 °C
162,5	181 °C
162,8125	181 °C
163,125	181 °C
163,4375	182 °C
163,75	182 °C
164,0625	182 °C
164,375	182 °C
164,6875	182 °C
165	182 °C

165,3125	182 °C
165,625	182 °C
165,9375	183 °C
166,25	183 °C
166,5625	183 °C
166,875	183 °C
167,1875	183 °C
167,5	183 °C
167,8125	183 °C
168,125	184 °C
168,4375	184 °C
168,75	184 °C
169,0625	184 °C
169,375	184 °C
169,6875	184 °C
170	184 °C
170,3125	184 °C
170,625	184 °C
170,9375	184 °C
171,25	184 °C
171,5625	184 °C
171,875	184 °C
172,1875	184 °C
172,5	185 °C
172,8125	185 °C
173,125	185 °C
173,4375	185 °C
173,75	185 °C
174,0625	185 °C
174,375	185 °C
174,6875	186 °C
175	186 °C
175,3125	186 °C
175,625	186 °C
175,9375	186 °C
176,25	186 °C
176,5625	186 °C
176,875	186 °C
177,1875	187 °C
177,5	187 °C
177,8125	187 °C

178,125	187 °C
178,4375	187 °C
178,75	187 °C
179,0625	187 °C
179,375	187 °C
179,6875	187 °C
180	187 °C
180,3125	187 °C
180,625	187 °C
180,9375	187 °C
181,25	187 °C
181,5625	187 °C
181,875	188 °C
182,1875	188 °C
182,5	188 °C
182,8125	188 °C
183,125	188 °C
183,4375	188 °C
183,75	188 °C
184,0625	189 °C
184,375	189 °C
184,6875	189 °C
185	189 °C
185,3125	189 °C
185,625	189 °C
185,9375	190 °C
186,25	190 °C
186,5625	190 °C
186,875	190 °C
187,1875	190 °C
187,5	190 °C
187,8125	190 °C
188,125	190 °C
188,4375	190 °C
188,75	190 °C
189,0625	190 °C
189,375	190 °C
189,6875	190 °C
190	190 °C
190,3125	190 °C
190,625	191 °C

190,9375	191 °C
191,25	191 °C
191,5625	191 °C
191,875	191 °C
192,1875	191 °C
192,5	191 °C
192,8125	191 °C
193,125	191 °C
193,4375	191 °C
193,75	191 °C
194,0625	191 °C
194,375	191 °C
194,6875	191 °C
195	191 °C
195,3125	191 °C
195,625	191 °C
195,9375	191 °C
196,25	191 °C
196,5625	191 °C
196,875	192 °C
197,1875	192 °C
197,5	192 °C
197,8125	192 °C
198,125	192 °C
198,4375	192 °C
198,75	192 °C
199,0625	192 °C
199,375	192 °C
199,6875	192 °C
200	192 °C
200,3125	192 °C
200,625	192 °C
200,9375	193 °C
201,25	193 °C
201,5625	193 °C
201,875	193 °C
202,1875	194 °C
202,5	194 °C
202,8125	194 °C
203,125	194 °C
203,4375	194 °C

203,75	195 °C
204,0625	195 °C
204,375	195 °C
204,6875	195 °C
205	195 °C
205,3125	195 °C
205,625	195 °C
205,9375	196 °C
206,25	196 °C
206,5625	196 °C
206,875	196 °C
207,1875	196 °C
207,5	196 °C
207,8125	197 °C
208,125	197 °C
208,4375	197 °C
208,75	197 °C
209,0625	197 °C
209,375	197 °C
209,6875	197 °C
210	197 °C
210,3125	197 °C
210,625	197 °C
210,9375	198 °C
211,25	198 °C
211,5625	198 °C
211,875	198 °C
212,1875	198 °C
212,5	198 °C
212,8125	198 °C
213,125	198 °C
213,4375	199 °C
213,75	199 °C
214,0625	199 °C
214,375	199 °C
214,6875	199 °C
215	199 °C
215,3125	199 °C
215,625	199 °C
215,9375	200 °C
216,25	200 °C

216,5625	200 °C
216,875	200 °C
217,1875	200 °C
217,5	200 °C
217,8125	200 °C
218,125	200 °C
218,4375	200 °C
218,75	201 °C
219,0625	201 °C
219,375	201 °C
219,6875	201 °C
220	201 °C
220,3125	201 °C
220,625	201 °C
220,9375	201 °C
221,25	201 °C
221,5625	201 °C
221,875	201 °C
222,1875	202 °C
222,5	202 °C
222,8125	202 °C
223,125	202 °C
223,4375	202 °C
223,75	202 °C
224,0625	202 °C
224,375	202 °C
224,6875	202 °C
225	203 °C
225,3125	203 °C
225,625	203 °C
225,9375	203 °C
226,25	203 °C
226,5625	203 °C
226,875	203 °C
227,1875	203 °C
227,5	204 °C
227,8125	204 °C
228,125	204 °C
228,4375	204 °C
228,75	204 °C
229,0625	204 °C

229,375	204 °C
229,6875	204 °C
230	204 °C
230,3125	204 °C
230,625	204 °C
230,9375	204 °C
231,25	204 °C
231,5625	204 °C
231,875	205 °C
232,1875	205 °C
232,5	205 °C
232,8125	205 °C
233,125	205 °C
233,4375	205 °C
233,75	205 °C
234,0625	205 °C
234,375	206 °C
234,6875	206 °C
235	206 °C
235,3125	206 °C
235,625	206 °C
235,9375	206 °C
236,25	206 °C
236,5625	206 °C
236,875	206 °C
237,1875	206 °C
237,5	207 °C
237,8125	207 °C
238,125	207 °C
238,4375	207 °C
238,75	207 °C
239,0625	207 °C
239,375	207 °C
239,6875	207 °C
240	207 °C
240,3125	208 °C
240,625	208 °C
240,9375	208 °C
241,25	208 °C
241,5625	208 °C
241,875	208 °C

242,1875	208 °C
242,5	208 °C
242,8125	208 °C
243,125	208 °C
243,4375	208 °C
243,75	208 °C
244,0625	208 °C
244,375	208 °C
244,6875	208 °C
245	208 °C
245,3125	208 °C
245,625	208 °C
245,9375	208 °C
246,25	208 °C
246,5625	208 °C
246,875	208 °C
247,1875	208 °C
247,5	208 °C
247,8125	208 °C
248,125	208 °C
248,4375	208 °C
248,75	208 °C
249,0625	208 °C
249,375	208 °C
249,6875	208 °C
250	208 °C
250,3125	208 °C
250,625	209 °C
250,9375	209 °C
251,25	209 °C
251,5625	209 °C
251,875	209 °C
252,1875	209 °C
252,5	210 °C
252,8125	210 °C
253,125	210 °C
253,4375	210 °C
253,75	210 °C
254,0625	210 °C
254,375	211 °C
254,6875	211 °C

255	211 °C
255,3125	211 °C
255,625	211 °C
255,9375	211 °C
256,25	211 °C
256,5625	212 °C
256,875	212 °C
257,1875	212 °C
257,5	212 °C
257,8125	212 °C
258,125	212 °C
258,4375	212 °C
258,75	212 °C
259,0625	213 °C
259,375	213 °C
259,6875	213 °C
260	213 °C
260,3125	213 °C
260,625	213 °C
260,9375	213 °C
261,25	213 °C
261,5625	213 °C
261,875	213 °C
262,1875	213 °C
262,5	213 °C
262,8125	214 °C
263,125	214 °C
263,4375	214 °C
263,75	214 °C
264,0625	214 °C
264,375	214 °C
264,6875	214 °C
265	214 °C
265,3125	214 °C
265,625	214 °C
265,9375	214 °C
266,25	214 °C
266,5625	214 °C
266,875	214 °C
267,1875	214 °C
267,5	214 °C

267,8125	214 °C
268,125	214 °C
268,4375	214 °C
268,75	214 °C
269,0625	215 °C
269,375	215 °C
269,6875	215 °C
270	215 °C
270,3125	215 °C
270,625	215 °C
270,9375	215 °C
271,25	215 °C
271,5625	216 °C
271,875	216 °C
272,1875	216 °C
272,5	216 °C
272,8125	216 °C
273,125	216 °C
273,4375	216 °C
273,75	216 °C

274,0625	216 °C
274,375	217 °C
274,6875	217 °C
275	217 °C
275,3125	217 °C
275,625	217 °C
275,9375	217 °C
276,25	217 °C
276,5625	217 °C
276,875	218 °C
277,1875	218 °C
277,5	218 °C
277,8125	218 °C
278,125	218 °C
278,4375	218 °C
278,75	218 °C
279,0625	218 °C
279,375	218 °C
279,6875	218 °C
280	218 °C

280,3125	218 °C
280,625	218 °C
280,9375	219 °C
281,25	219 °C
281,5625	219 °C
281,875	219 °C
282,1875	219 °C
282,5	219 °C
282,8125	219 °C
283,125	219 °C
283,4375	219 °C
283,75	219 °C
284,0625	219 °C
284,375	219 °C
284,6875	220 °C
285	220 °C
285,3125	220 °C
285,625	220 °C

## Anexo G. Datos de caracterización de termocupla

	Amplitud °C - TA	12,1875	18,4247	24,6875	13,2495
0	26,4936	12,5	16,864	25	13,2498
0,3125	26,4601	12,8125	16,0057	25,3125	13,2612
0,625	26,4316	13,125	15,4572	25,625	13,2347
0,9375	26,4073	13,4375	15,0851	25,9375	13,261
1,25	26,4104	13,75	14,8738	26,25	13,2798
1,5625	26,3795	14,0625	14,6392	26,5625	13,2734
1,875	26,3117	14,375	14,455	26,875	13,2641
2,1875	26,3004	14,6875	14,3111	27,1875	13,2753
2,5	26,3658	15	14,1277	27,5	13,292
2,8125	26,3922	15,3125	14,0154	27,8125	13,2841
3,125	26,3752	15,625	13,9079	28,125	13,2736
3,4375	26,3771	15,9375	13,8112	28,4375	13,2912
3,75	26,3412	16,25	13,7134	28,75	13,2793
4,0625	26,2992	16,5625	13,6355	29,0625	13,2936
4,375	26,3644	16,875	13,5826	29,375	13,2862
4,6875	26,2514	17,1875	13,5173	29,6875	13,3196
5	26,2273	17,5	13,4507	30	13,3411
5,3125	26,2252	17,8125	13,3981	30,3125	13,3384
5,625	26,2108	18,125	13,3585	30,625	13,3241
5,9375	26,2058	18,4375	13,3377	30,9375	13,1544
6,25	26,1768	18,75	13,3084	31,25	13,0824
6,5625	26,2629	19,0625	13,2743	31,5625	13,1441
6,875	26,3776	19,375	13,2137	31,875	13,2133
7,1875	26,5295	19,6875	12,9221	32,1875	13,2495
7,5	26,4037	20	12,821	32,5	13,2276
7,8125	26,3309	20,3125	13,0313	32,8125	13,2571
8,125	26,2988	20,625	13,0819	33,125	13,095
8,4375	26,3044	20,9375	13,0905	33,4375	12,9026
8,75	26,2931	21,25	13,1417	33,75	12,8739
9,0625	26,2469	21,5625	13,1804	34,0625	12,9565
9,375	25,9885	21,875	13,1584	34,375	13,0232
9,6875	26,3504	22,1875	13,1456	34,6875	12,9627
10	26,1825	22,5	13,1835	35	11,42
10,3125	26,2426	22,8125	13,1782	35,3125	11,0464
10,625	26,0499	23,125	13,1859	35,625	10,7947
10,9375	25,9687	23,4375	13,2459	35,9375	10,6037
11,25	26,0274	23,75	13,271	36,25	10,1641
11,5625	25,9892	24,0625	13,255	36,5625	9,83993
11,875	22,0461	24,375	13,2605	36,875	10,4258

37,1875	10,529
37,5	11,2145
37,8125	11,3534
38,125	11,1018
38,4375	10,9853
38,75	10,9332
39,0625	10,7642
39,375	10,492
39,6875	10,1533
40	9,97107
40,3125	10,0463
40,625	10,2517
40,9375	10,4638
41,25	10,7062
41,5625	11,0225
41,875	11,1233
42,1875	11,1767
42,5	11,2099
42,8125	11,2211
43,125	11,2166
43,4375	11,1877
43,75	11,1455
44,0625	11,0934
44,375	11,0703
44,6875	11,0216
45	10,9557
45,3125	10,9762
45,625	10,9686
45,9375	10,9826
46,25	11,0161
46,5625	11,0297
46,875	11,066
47,1875	11,0908
47,5	11,1304
47,8125	11,1638
48,125	11,2376
48,4375	11,3524
48,75	11,4496
49,0625	11,5231
49,375	11,5166
49,6875	11,5436

50	11,5933
50,3125	11,7083
50,625	11,8104
50,9375	10,8666
51,25	10,8313
51,5625	9,94599
51,875	9,15137
52,1875	8,53598
52,5	8,20039
52,8125	8,31656
53,125	8,56777
53,4375	8,71213
53,75	8,57255
54,0625	8,31752
54,375	8,08062
54,6875	7,84514
55	7,6149
55,3125	7,41406
55,625	7,256
55,9375	7,10057
56,25	6,99439
56,5625	6,84851
56,875	6,72439
57,1875	6,62059
57,5	6,4735
57,8125	6,37352
58,125	6,31803
58,4375	6,31157
58,75	6,25871
59,0625	6,2336
59,375	6,20681
59,6875	6,18169
60	6,14653
60,3125	6,09726
60,625	6,0652
60,9375	5,97909
61,25	5,981
61,5625	5,95589
61,875	5,94153
62,1875	5,9279
62,5	5,91187

62,8125	5,90111
63,125	5,86283
63,4375	5,85303
63,75	5,82958
64,0625	5,81906
64,375	5,79561
64,6875	5,76571
65	5,76165
65,3125	5,74394
65,625	5,70782
65,9375	5,68988
66,25	5,66237
66,5625	5,63031
66,875	5,61357
67,1875	5,60089
67,5	5,58917
67,8125	5,74155
68,125	6,41562
68,4375	6,89467
68,75	7,10416
69,0625	7,24452
69,375	7,28541
69,6875	7,27274
70	7,19694
70,3125	7,00348
70,625	6,90519
70,9375	6,80212
71,25	6,66938
71,5625	6,51655
71,875	6,44432
72,1875	6,35798
72,5	6,23456
72,8125	6,14749
73,125	6,02382
73,4375	5,9444
73,75	5,81738
74,0625	5,63605
74,375	5,43414
74,6875	5,27337
75	5,1705
75,3125	5,1437

75,625	5,09059
75,9375	5,01451
76,25	5,14227
76,5625	5,46668
76,875	5,70351
77,1875	5,81379
77,5	5,90565
77,8125	5,98316
78,125	6,02023
78,4375	6,08147
78,75	6,04894
79,0625	6,07956
79,375	6,09558
79,6875	6,06568
80	6,08506
80,3125	6,0774
80,625	6,07023
80,9375	6,05803
81,25	6,06138
81,5625	6,01952
81,875	5,98722
82,1875	5,9334
82,5	5,92192
82,8125	5,87551
83,125	5,82623
83,4375	5,76906
83,75	5,72002
84,0625	5,71069
84,375	5,83365
84,6875	6,21135
85	6,38429
85,3125	6,51607
85,625	6,55434
85,9375	6,59285
86,25	6,65623
86,5625	6,63733
86,875	6,80379
87,1875	6,93006
87,5	7,03122
87,8125	7,09555
88,125	6,99702

88,4375	6,92289
88,75	6,88702
89,0625	6,80953
89,375	6,74137
89,6875	6,71506
90	6,55315
90,3125	6,70239
90,625	6,75381
90,9375	6,76457
91,25	6,75165
91,5625	6,77796
91,875	6,6933
92,1875	6,62872
92,5	6,65408
92,8125	6,56702
93,125	6,60194
93,4375	6,54286
93,75	6,54645
94,0625	6,23647
94,375	6,08482
94,6875	6,07979
95	5,99512
95,3125	5,96282
95,625	5,04872
95,9375	4,99202
96,25	5,35591
96,5625	5,72672
96,875	6,25393
97,1875	6,766
97,5	6,98626
97,8125	7,18881
98,125	7,25265
98,4375	6,54788
98,75	6,61031
99,0625	6,65001
99,375	6,70047
99,6875	6,72152
100	6,74352
100,3125	6,78896
100,625	6,78896
100,9375	6,78107

101,25	6,78035
101,5625	6,78896
101,875	6,81814
102,1875	6,8167
102,5	6,81718
102,8125	6,81383
103,125	6,79255
103,4375	6,76337
103,75	6,77605
104,0625	6,76576
104,375	6,76218
104,6875	6,76863
105	6,78872
105,3125	6,78609
105,625	6,70286
105,9375	6,36133
106,25	5,99129
106,5625	5,91546
106,875	5,90135
107,1875	5,95708
107,5	5,99942
107,8125	6,02789
108,125	6,04368
108,4375	6,01497
108,75	5,97742
109,0625	5,93316
109,375	5,90302
109,6875	5,92694
110	5,92192
110,3125	5,87886
110,625	5,83724
110,9375	5,80686
111,25	5,78963
111,5625	5,75423
111,875	5,80686
112,1875	5,83078
112,5	5,84705
112,8125	5,82958
113,125	5,86044
113,4375	5,86331
113,75	5,86523

114,0625	5,88723
114,375	5,90446
114,6875	5,94728
115	6,00779
115,3125	5,91403
115,625	6,09702
115,9375	5,96522
116,25	5,88269
116,5625	5,59323
116,875	5,50017
117,1875	5,43749
117,5	5,40591
117,8125	5,31883
118,125	5,18533
118,4375	5,02575
118,75	4,92694
119,0625	4,84344
119,375	4,7061
119,6875	4,5324
120	4,3405
120,3125	4,29647
120,625	4,26656
120,9375	4,21847
121,25	4,11534
121,5625	4,06102
121,875	3,98995
122,1875	3,93276
122,5	3,90716
122,8125	3,83896
123,125	3,81264
123,4375	3,77938
123,75	3,71836
124,0625	3,71932
124,375	3,70592
124,6875	3,68462
125	3,6559
125,3125	3,66021
125,625	3,65638
125,9375	3,65303
126,25	3,65255
126,5625	3,65423

126,875	3,63868
127,1875	3,65423
127,5	3,91051
127,8125	3,88538
128,125	3,75186
128,4375	4,03637
128,75	4,1462
129,0625	4,18186
129,375	4,24933
129,6875	4,13352
130	3,96626
130,3125	3,82508
130,625	3,65878
130,9375	3,56019
131,25	3,4817
131,5625	3,43791
131,875	3,38479
132,1875	3,34387
132,5	3,30821
132,8125	3,28931
133,125	3,28835
133,4375	3,22757
133,75	3,1955
134,0625	3,17803
134,375	3,15721
134,6875	3,14501
135	3,11797
135,3125	3,11725
135,625	3,1139
135,9375	3,09428
136,25	3,10122
136,5625	3,10026
136,875	3,06006
137,1875	3,07155
137,5	3,0402
137,8125	3,03757
138,125	3,04594
138,4375	3,03039
138,75	3,00741
139,0625	2,99976
139,375	2,97463

139,6875	2,96985
140	2,96051
140,3125	2,95956
140,625	2,97176
140,9375	2,95022
141,25	2,96075
141,5625	2,92581
141,875	2,89758
142,1875	2,89255
142,5	2,85785
142,8125	2,83895
143,125	2,82268
143,4375	2,8009
143,75	2,793
144,0625	2,76596
144,375	2,77027
144,6875	2,74873
145	2,75352
145,3125	2,74299
145,625	2,74275
145,9375	2,71954
146,25	2,72337
146,5625	2,70087
146,875	2,68006
147,1875	2,68412
147,5	2,66354
147,8125	2,65948
148,125	2,62765
148,4375	2,64895
148,75	2,61473
149,0625	2,61903
149,375	2,58003
149,6875	2,58529
150	2,5616
150,3125	2,55131
150,625	2,52643
150,9375	2,53313
151,25	2,5013
151,5625	2,51446
151,875	2,48359
152,1875	2,46541

152,5	2,46588
152,8125	2,44243
153,125	2,44602
153,4375	2,413
153,75	2,39649
154,0625	2,37495
154,375	2,3661
154,6875	2,38261
155	2,34743
155,3125	2,34911
155,625	2,3259
155,9375	2,32422
156,25	2,30939
156,5625	2,30723
156,875	2,27708
157,1875	2,26918
157,5	2,26224
157,8125	2,24908
158,125	2,26224
158,4375	2,24166
158,75	2,22802
159,0625	2,20529
159,375	2,23161
159,6875	2,1962
160	2,17897
160,3125	2,17897
160,625	2,18519
160,9375	2,17347
161,25	2,17442
161,5625	2,17275
161,875	2,16581
162,1875	2,16509
162,5	2,1536
162,8125	2,13996
163,125	2,15863
163,4375	2,13183
163,75	2,1402
164,0625	2,12896
164,375	2,13231
164,6875	2,11269
165	2,08923

165,3125	2,09091
165,625	2,08971
165,9375	2,10144
166,25	2,08517
166,5625	2,08349
166,875	2,06889
167,1875	2,089
167,5	2,08062
167,8125	2,08828
168,125	2,08038
168,4375	2,07153
168,75	2,07177
169,0625	2,06267
169,375	2,08469
169,6875	2,05071
170	2,06818
170,3125	2,06554
170,625	2,04521
170,9375	2,0397
171,25	2,05262
171,5625	2,0409
171,875	2,03372
172,1875	2,01769
172,5	2,02463
172,8125	2,0117
173,125	2,01314
173,4375	2,00022
173,75	1,99232
174,0625	1,9995
174,375	1,99806
174,6875	1,96337
175	1,95786
175,3125	1,96624
175,625	1,93011
175,9375	1,96289
176,25	1,95547
176,5625	1,91575
176,875	1,927
177,1875	1,92676
177,5	1,90283
177,8125	1,90666

178,125	1,9057
178,4375	1,88512
178,75	1,87651
179,0625	1,84037
179,375	1,84348
179,6875	1,85688
180	1,84564
180,3125	1,82769
180,625	1,81046
180,9375	1,80113
181,25	1,78629
181,5625	1,80855
181,875	1,79515
182,1875	1,79036
182,5	1,77098
182,8125	1,76691
183,125	1,76548
183,4375	1,76093
183,75	1,74394
184,0625	1,72982
184,375	1,74107
184,6875	1,74394
185	1,7449
185,3125	1,73987
185,625	1,74753
185,9375	1,74035
186,25	1,7224
186,5625	1,72288
186,875	1,72145
187,1875	1,6913
187,5	1,70135
187,8125	1,69417
188,125	1,70494
188,4375	1,69489
188,75	1,67981
189,0625	1,68938
189,375	1,66976
189,6875	1,66952
190	1,68316
190,3125	1,68603
190,625	1,66115

190,9375	1,66833
191,25	1,67694
191,5625	1,65469
191,875	1,66498
192,1875	1,6767
192,5	1,66115
192,8125	1,64272
193,125	1,66067
193,4375	1,6554
193,75	1,66689
194,0625	1,64344
194,375	1,65397
194,6875	1,64751
195	1,63937
195,3125	1,6231
195,625	1,65828
195,9375	1,64464
196,25	1,6566
196,5625	1,64631
196,875	1,6633
197,1875	1,67742
197,5	1,63339
197,8125	1,60085
198,125	1,60061
198,4375	1,62813
198,75	1,62143
199,0625	1,62214
199,375	1,61521
199,6875	1,61999
200	1,62095
200,3125	1,5774
200,625	1,57333
200,9375	1,57094
201,25	1,55395
201,5625	1,57548
201,875	1,564
202,1875	1,57788
202,5	1,59965
202,8125	1,57931
203,125	1,56974
203,4375	1,56304

203,75	1,55873
204,0625	1,54629
204,375	1,5841
204,6875	1,56065
205	1,54462
205,3125	1,54127
205,625	1,54175
205,9375	1,54677
206,25	1,55634
206,5625	1,51782
206,875	1,53481
207,1875	1,53552
207,5	1,53337
207,8125	1,53528
208,125	1,53983
208,4375	1,52428
208,75	1,52189
209,0625	1,52667
209,375	1,50274
209,6875	1,48719
210	1,51662
210,3125	1,49772
210,625	1,5104
210,9375	1,48575
211,25	1,49365
211,5625	1,50131
211,875	1,49317
212,1875	1,48982
212,5	1,50681
212,8125	1,50059
213,125	1,50753
213,4375	1,49078
213,75	1,49509
214,0625	1,48839
214,375	1,48982
214,6875	1,49269
215	1,48504
215,3125	1,48073
215,625	1,50825
215,9375	1,46733
216,25	1,51495

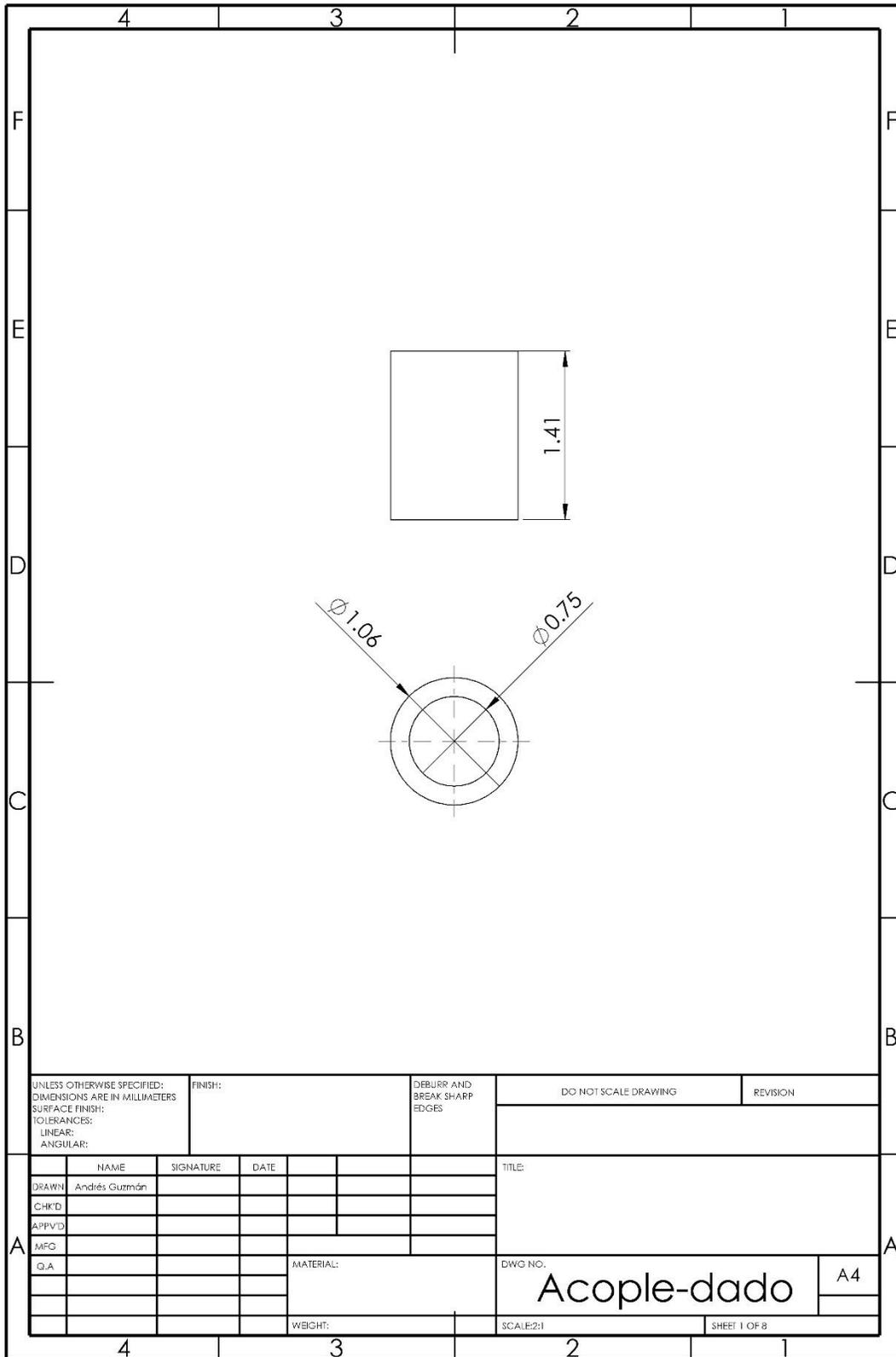
216,5625	1,66043
216,875	1,60635
217,1875	1,58194
217,5	1,57477
217,8125	1,57189
218,125	1,57237
218,4375	1,53768
218,75	1,53193
219,0625	1,51734
219,375	1,54366
219,6875	1,50298
220	1,52524
220,3125	1,50131
220,625	1,50226
220,9375	1,50083
221,25	1,52165
221,5625	1,50011
221,875	1,47977
222,1875	1,50418
222,5	1,46876
222,8125	1,48599
223,125	1,50896
223,4375	1,49891
223,75	1,52954
224,0625	1,53385
224,375	1,54629
224,6875	1,5317
225	1,52547
225,3125	1,52524
225,625	1,52332
225,9375	1,52452
226,25	1,52045
226,5625	1,51638
226,875	1,53098
227,1875	1,51614
227,5	1,51016
227,8125	1,49078
228,125	1,50418
228,4375	1,48121
228,75	1,48886
229,0625	1,50466

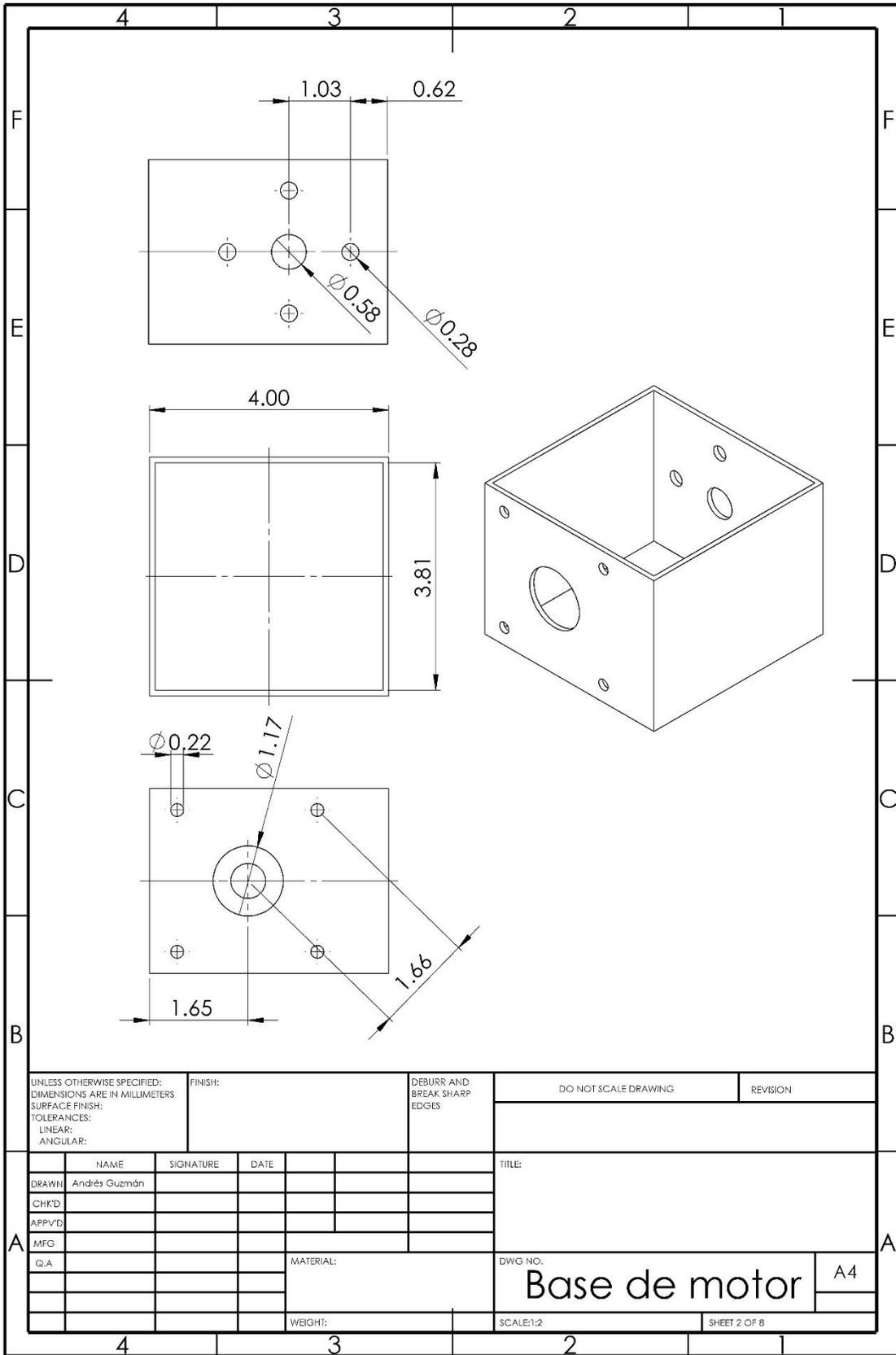
229,375	1,4702
229,6875	1,48863
230	1,4781
230,3125	1,48264
230,625	1,48408
230,9375	1,47618
231,25	1,4501
231,5625	1,48647
231,875	1,4568
232,1875	1,45608
232,5	1,45537
232,8125	1,46542
233,125	1,46254
233,4375	1,44747
233,75	1,45034
234,0625	1,45919
234,375	1,45489
234,6875	1,45034
235	1,45465
235,3125	1,45154
235,625	1,44819
235,9375	1,44867
236,25	1,43957
236,5625	1,43957
236,875	1,42306
237,1875	1,41947
237,5	1,43622
237,8125	1,38789
238,125	1,38813
238,4375	1,40655
238,75	1,46207
239,0625	1,48886
239,375	1,53863
239,6875	1,6511
240	1,75184
240,3125	1,82386
240,625	1,87339
240,9375	1,9246
241,25	1,96911
241,5625	2,01434
241,875	2,03492

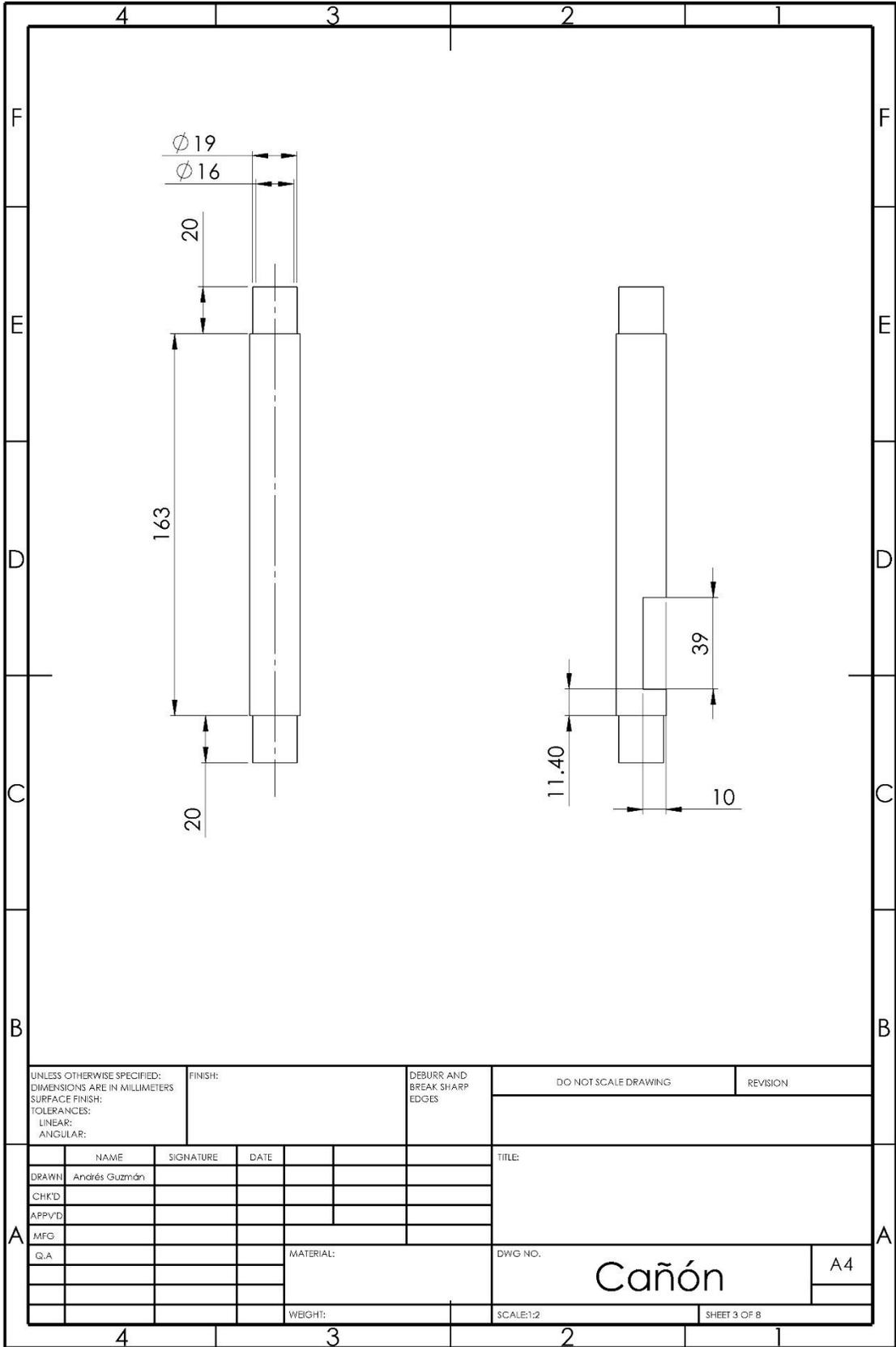
242,1875	2,04927
242,5	2,0263
242,8125	2,02798
243,125	1,94877
243,4375	1,88273
243,75	1,81022
244,0625	1,74514
244,375	1,71451
244,6875	1,67168
245	1,64559
245,3125	1,64799
245,625	1,61521
245,9375	1,59295
246,25	1,59223
246,5625	1,54198
246,875	1,54079
247,1875	1,5238
247,5	1,51231
247,8125	1,52643
248,125	1,50107
248,4375	1,50753
248,75	1,48432
249,0625	1,46876
249,375	1,4623
249,6875	1,46829
250	1,47666
250,3125	1,47427
250,625	1,4556
250,9375	1,44436
251,25	1,4568
251,5625	1,46685
251,875	1,44723
252,1875	1,43192
252,5	1,44843
252,8125	1,43168
253,125	1,42761
253,4375	1,45106
253,75	1,43239
254,0625	1,43622
254,375	1,43216
254,6875	1,45345

255	1,44819
255,3125	1,43192
255,625	1,43742
255,9375	1,41277
256,25	1,41732
256,5625	1,41995
256,875	1,41469
257,1875	1,42426
257,5	1,42737
257,8125	1,40895
258,125	1,41565
258,4375	1,42474
258,75	1,43096
259,0625	1,42498
259,375	1,4166
259,6875	1,43263
260	1,41421
260,3125	1,42904
260,625	1,41277
260,9375	1,38262
261,25	1,39555
261,5625	1,38693
261,875	1,41421
262,1875	1,38813
262,5	1,4056
262,8125	1,3697
263,125	1,37593
263,4375	1,3898
263,75	1,38765
264,0625	1,40823
264,375	1,38932
264,6875	1,39913
265	1,37162
265,3125	1,37688
265,625	1,37234
265,9375	1,36611
266,25	1,37497
266,5625	1,39244
266,875	1,38382
267,1875	1,34745
267,5	1,34673

# Anexo H. Planos mecánicos

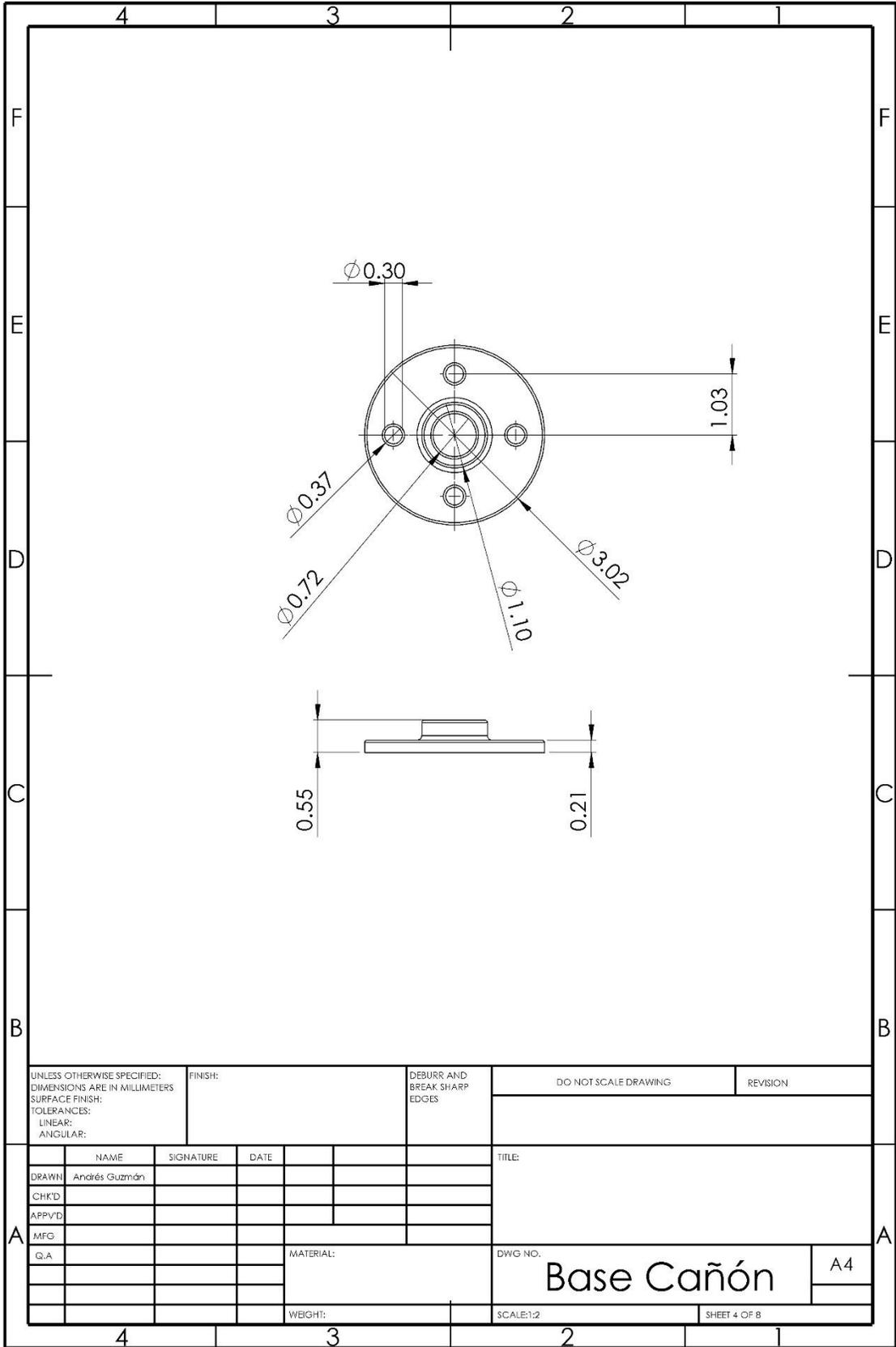




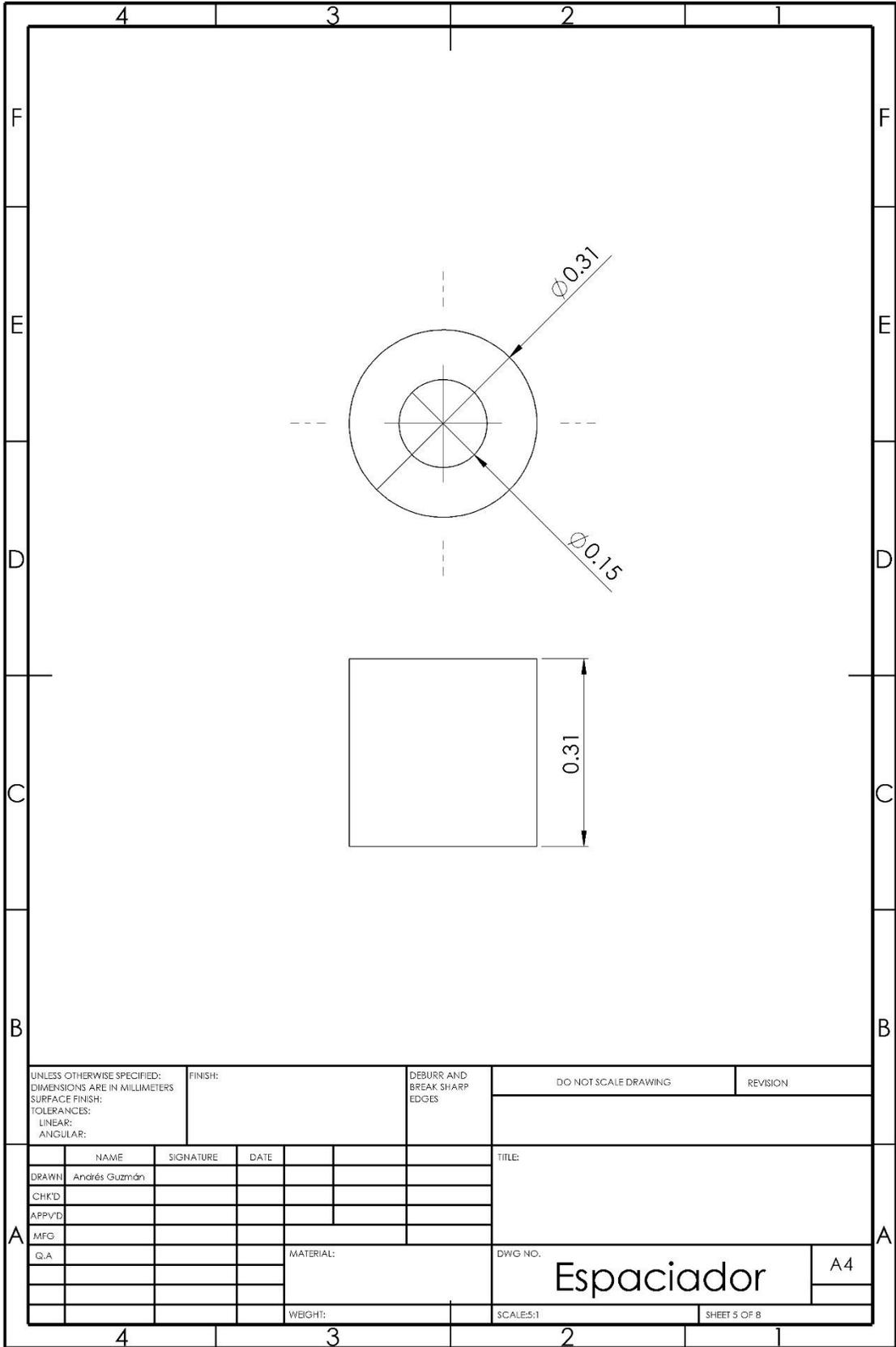


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
G.A.				MATERIAL:		DWG. NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 3 OF 8	

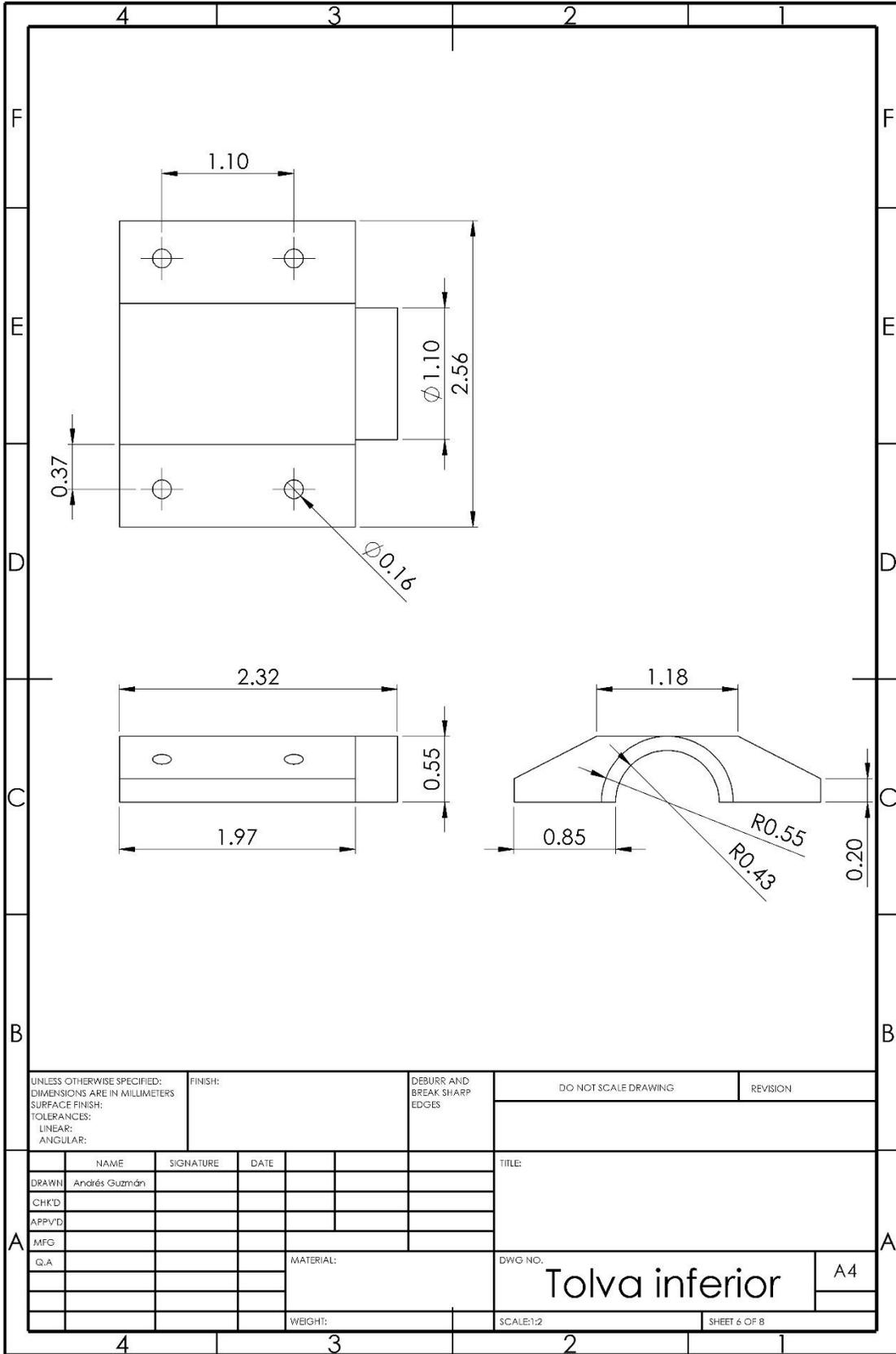
Cañón

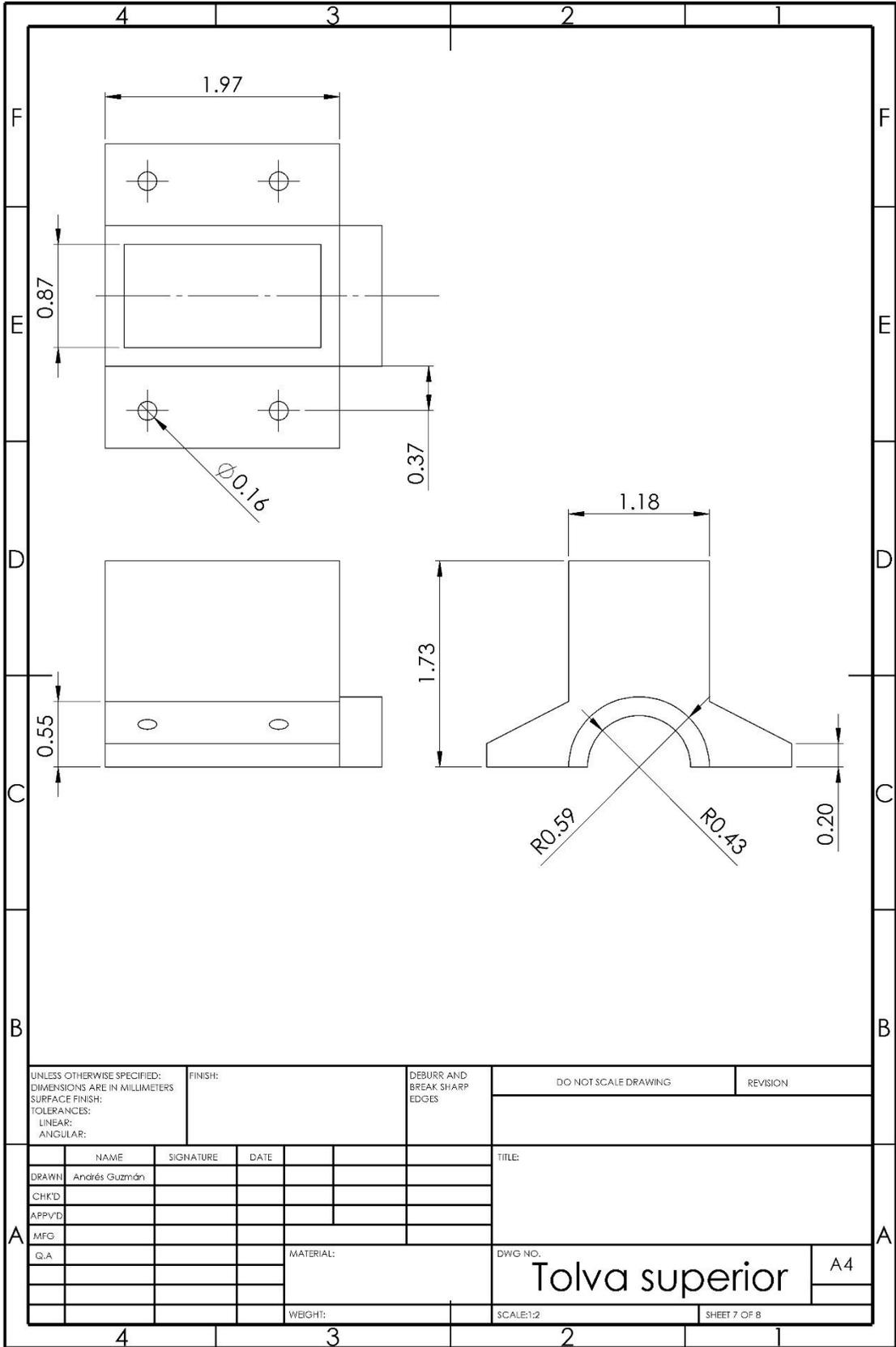


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Andrés Guzmán									
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
G.A.				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						Base Cañón			
				WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 4 OF 8	

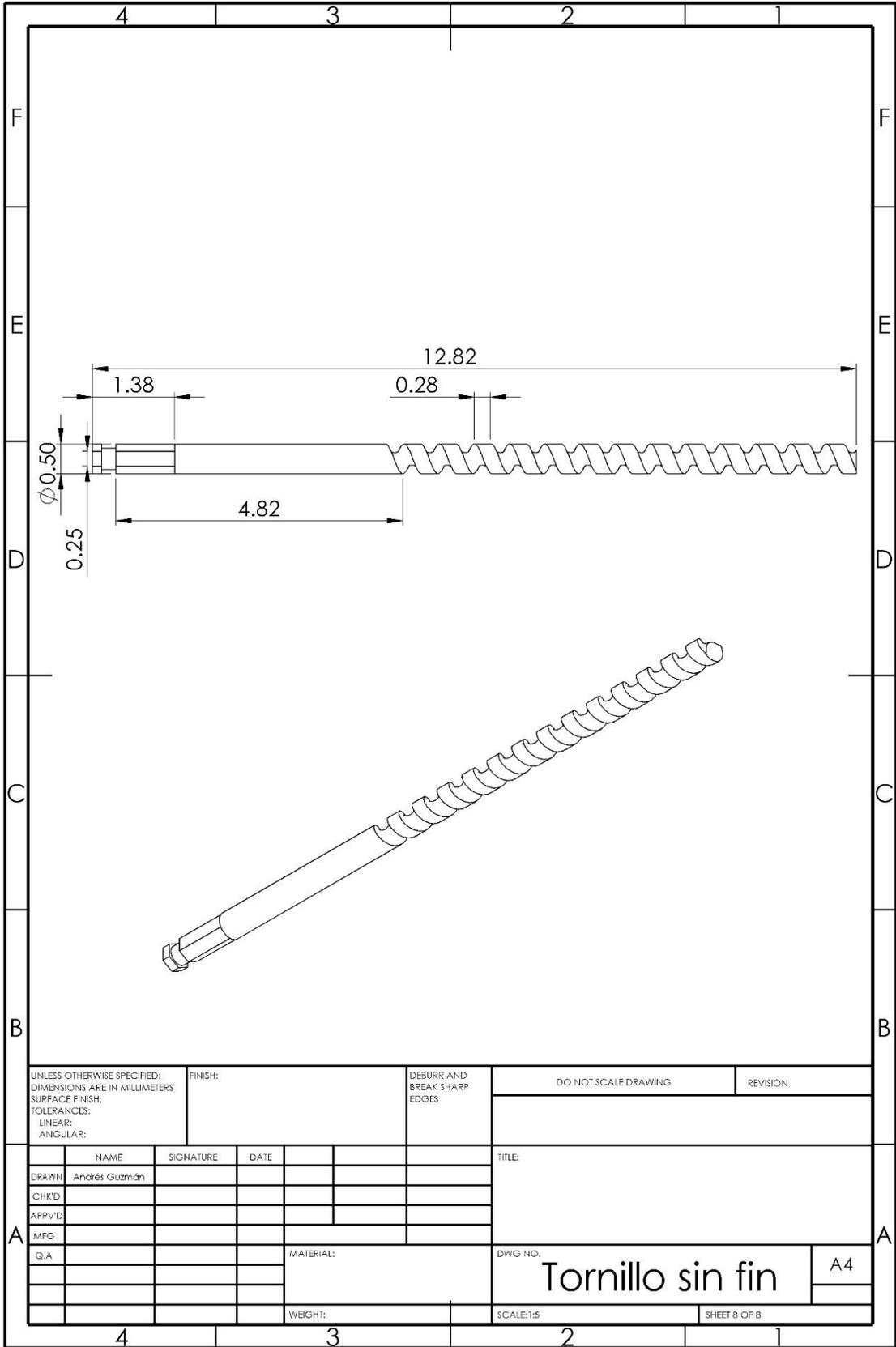


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						Espaciador			
				WEIGHT:		SCALE:5:1		SHEET 5 OF 8	





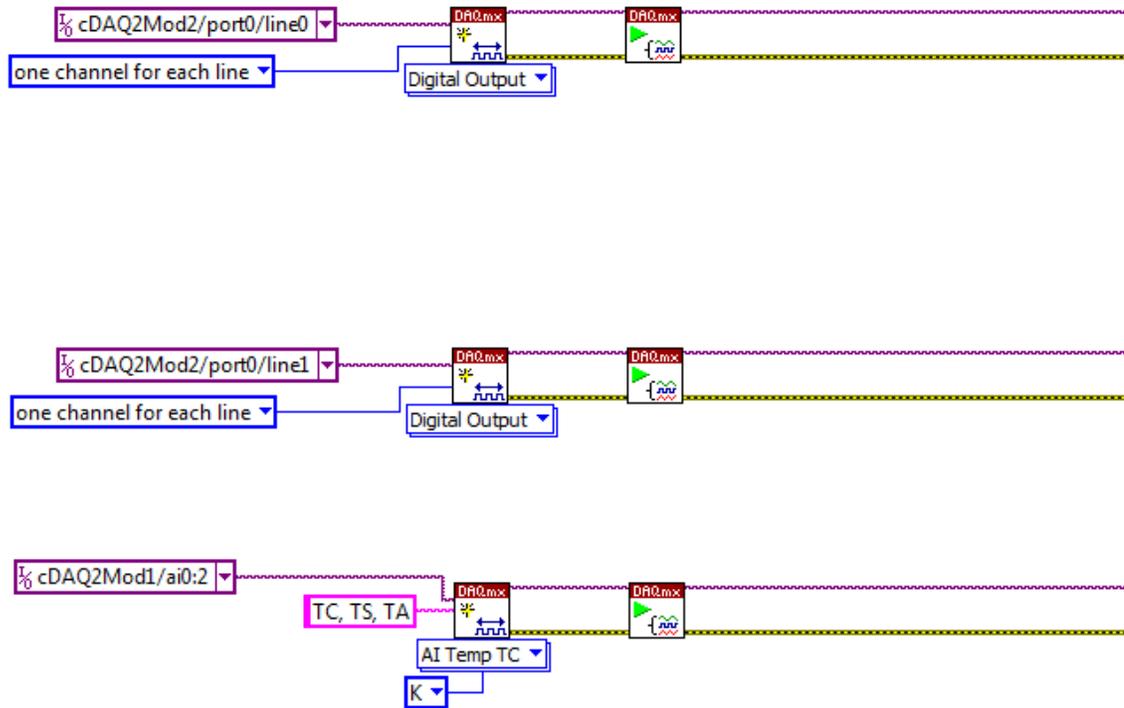
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Andrés Guzmán									
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
G.A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						Tolva superior			
				WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 7 OF 8	

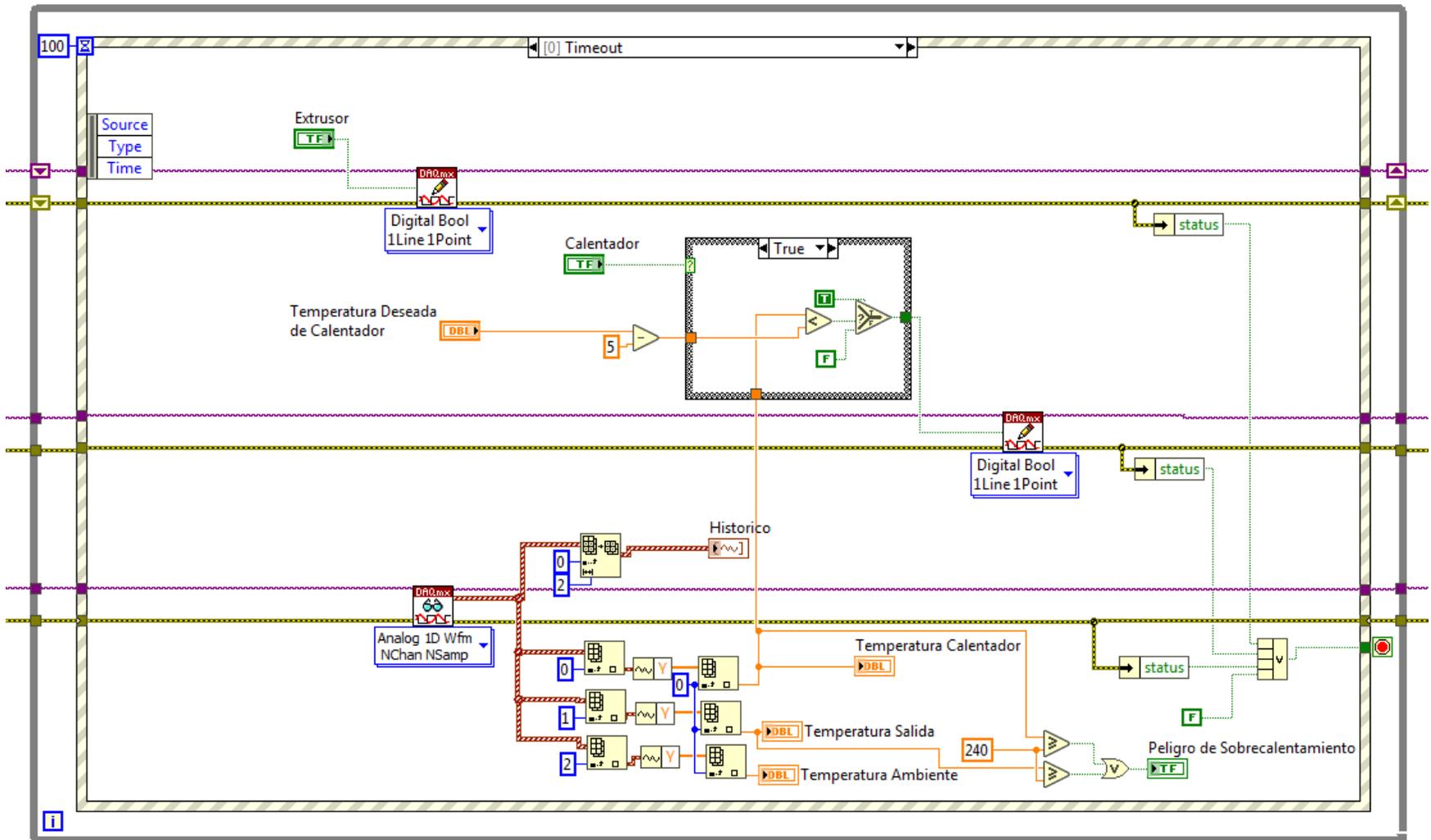


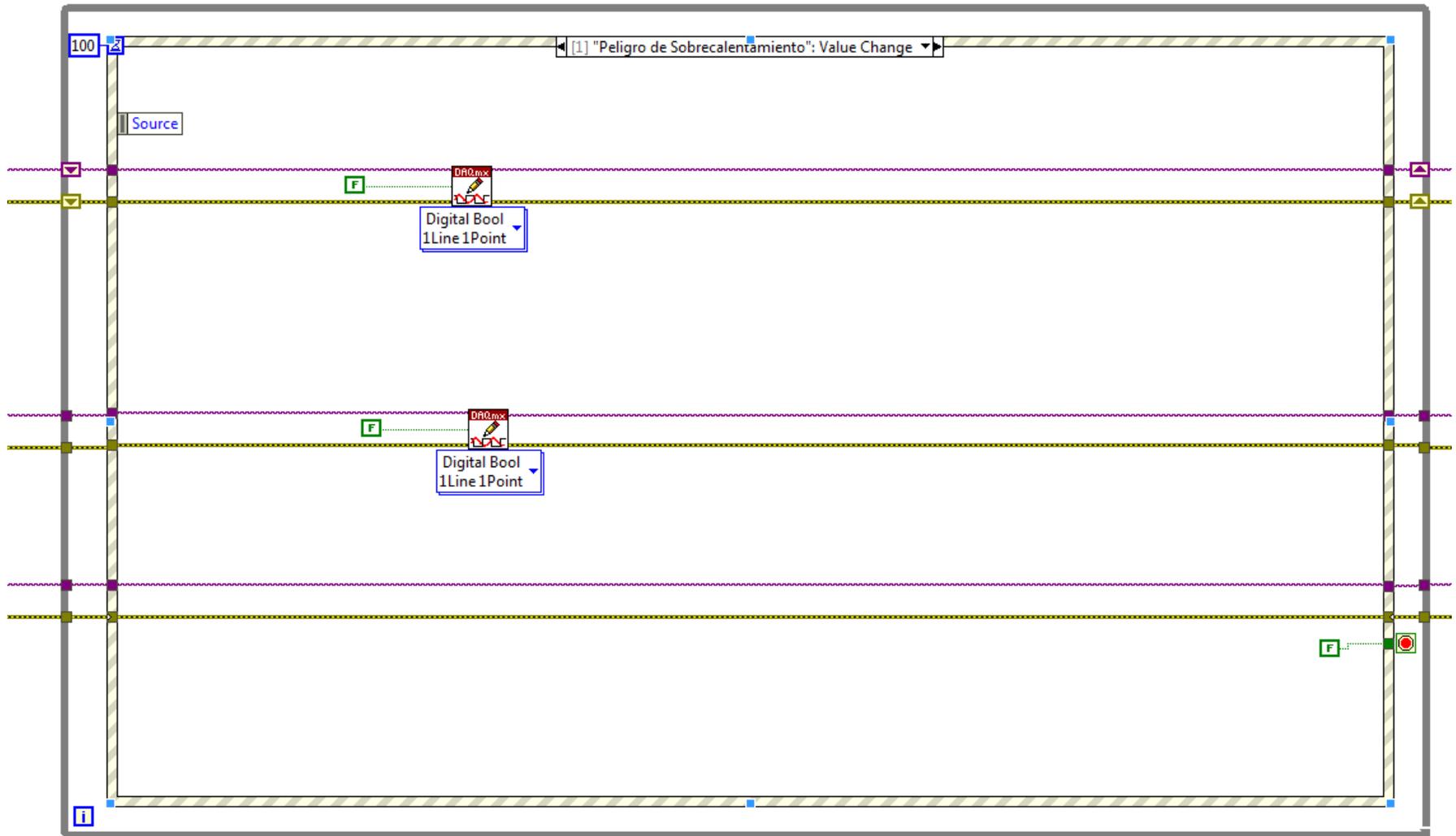
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
										TITLE:	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE			
CHK'D				Andrés Guzmán							
APPV'D											
MFG											
G.A.								MATERIAL:		DWG. NO.	
										Tornillo sin fin	
										A4	
								WEIGHT:		SCALE:1:5	
										SHEET 8 OF 8	

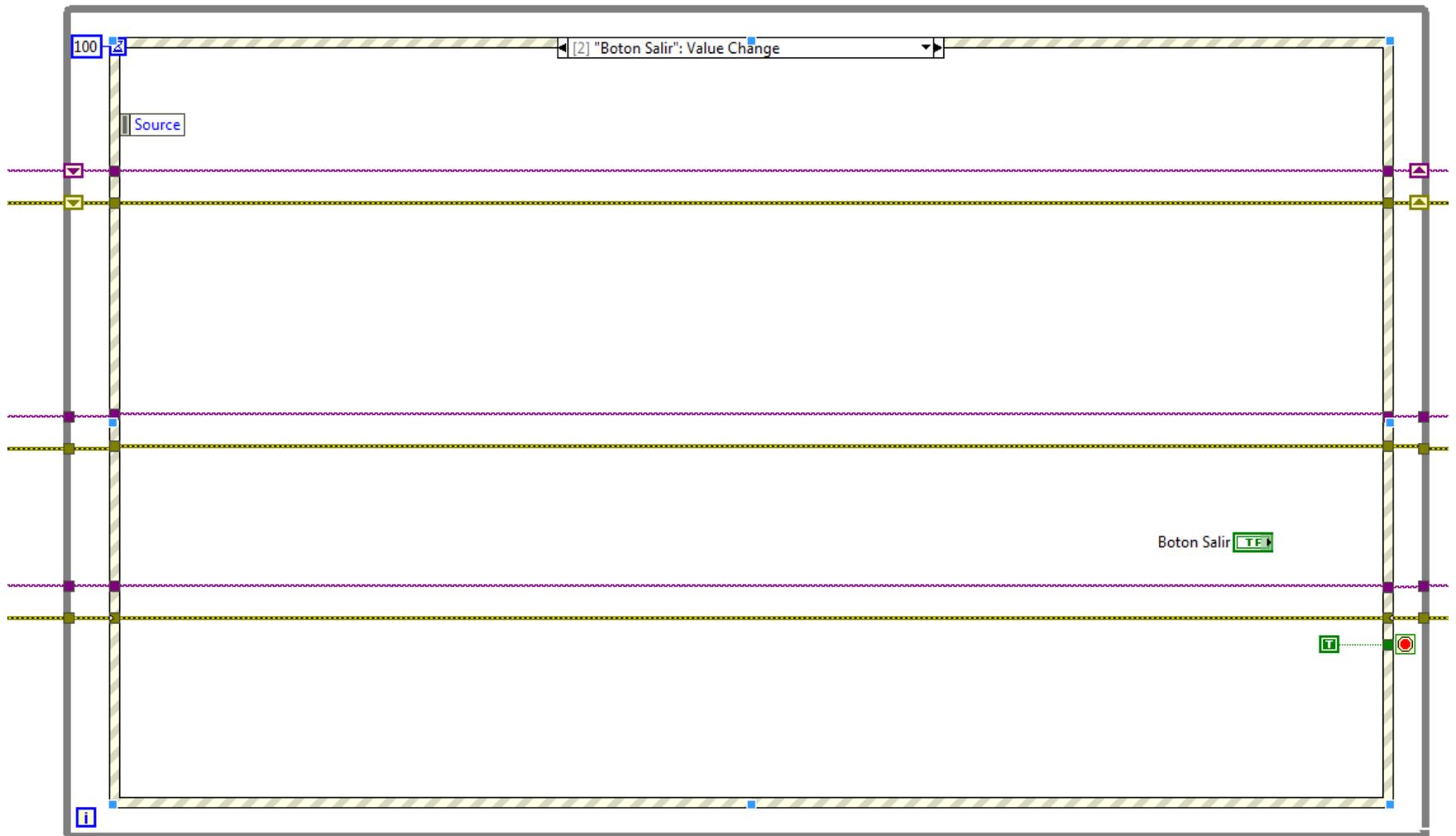
# Anexo I. Subsistema de programación

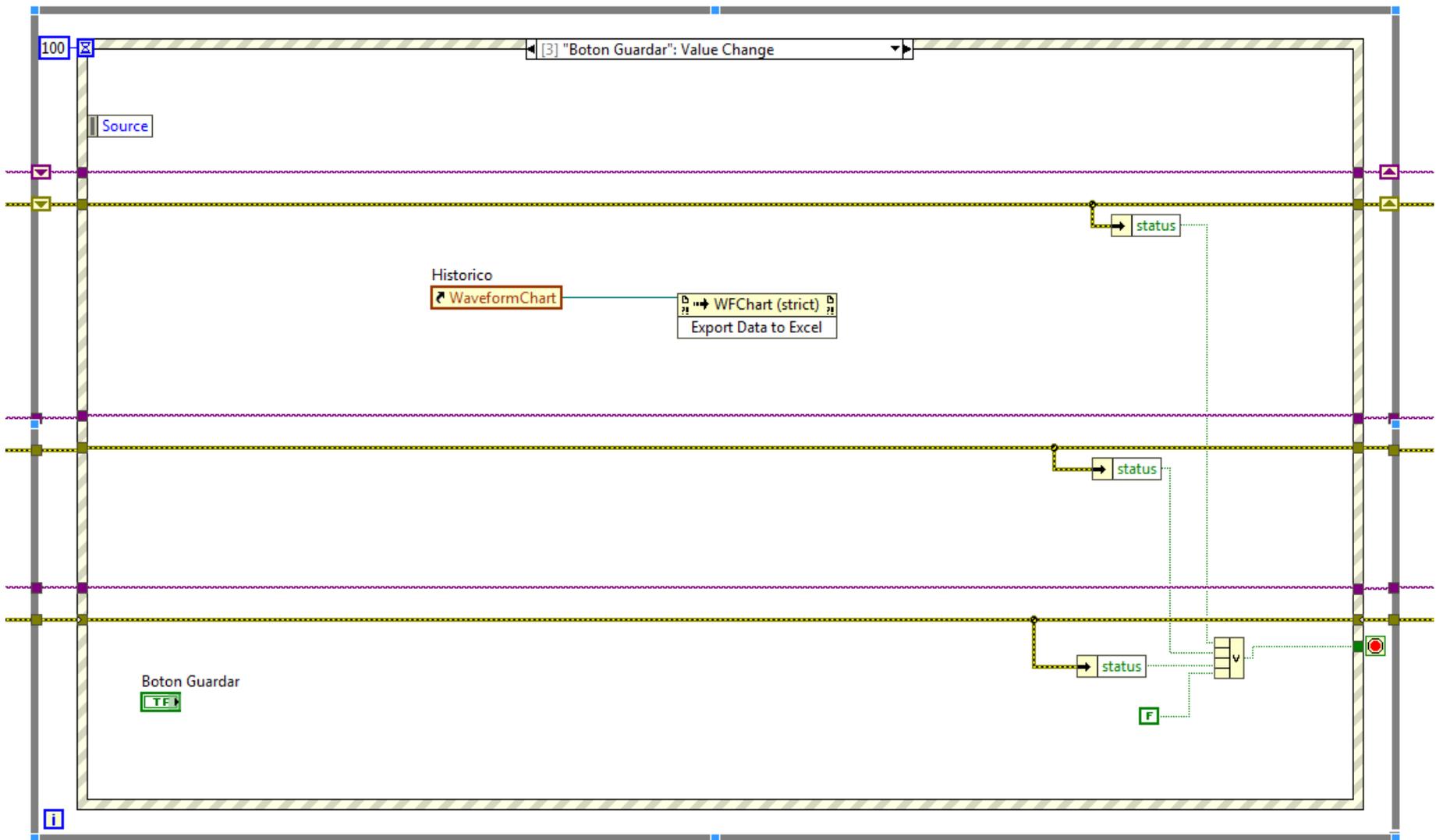
## Declaración e inicialización de canales



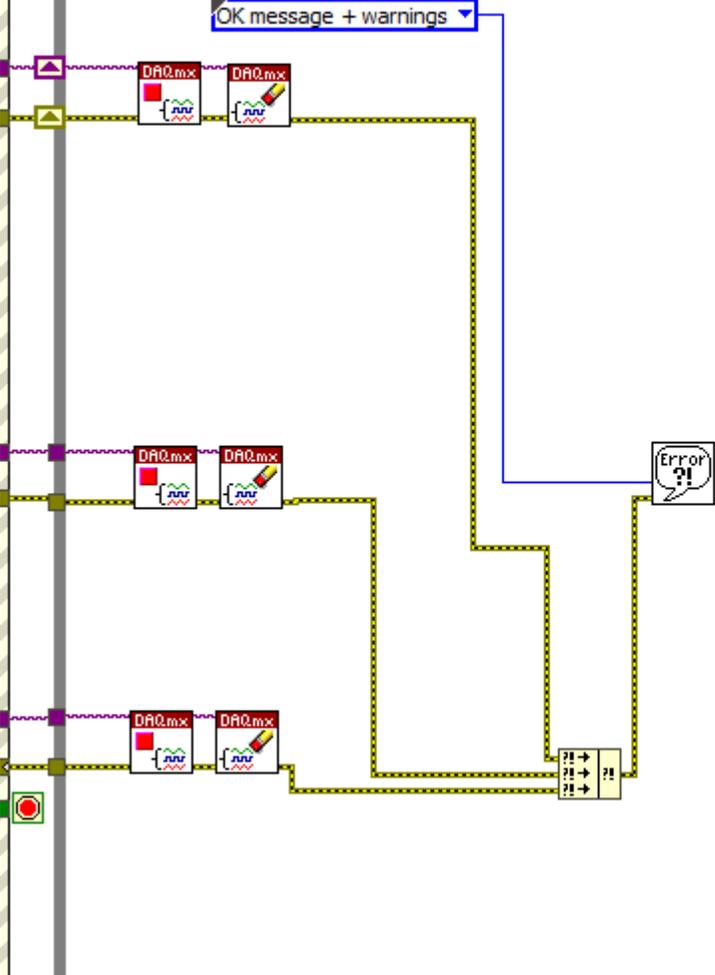








Manejo de errores y cierre seguro de las tareas.



## Apéndice A. Hoja de datos de filamento

# tonerplastics

### ABS 3D Filament Data Sheet

#### Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

ABS is a high strength, flexible thermoplastic suitable for printing objects which may be used in high temperature or industrial settings. Due to its high glass transition temperature, a heated bed is required to successfully print with ABS. For the best results when printing with ABS, a fully enclosed print bed is recommended.

Mechanical Properties		Test Method
Tensile Strength @ Break, PSI	5800	ASTM D638
Yield Strength, PSI	6520	ASTM D638
Tensile Elongation, %	2.6	ASTM D638
Notched Izon Impact, ft-lb/in	1.12	ASTM D256
Size Specifications		
Nominal Outer Diameter, mm	1.75/2.88	-
OD Tolerance, mm	±0.08	-
Ovality, mm	< 0.05	-

#### Applications

- General purpose 3D printing
- Heavy use prints
- Objects which will be exposed to high temperatures

#### Recommended Printer Settings

- Extruder Temperature: 220-240 °C
- Bed Temperature: 100-130 °C
- Printing Speed: 50-90 mm/s
- Bed Adhesion: Hair Spray or ABS Glue

#### Additional Information

- Standard Sizes Available: 1.75/2.88mm
- Spool Weight: 1kg., 1lb., 5lb., and 10lb
- Custom packaging methods available upon request
- All filaments are sealed with desiccants

#### Regulatory Compliance

- RoHS
- REACH
- Toy Safe

#### Disclaimer:

The above information is provided in good faith. It is solely the customer's responsibility to determine if the product and information in this document are appropriate for the customer's end use. Customers are always advised to consult their 3D printer manufacturer before using Toner Plastic's filaments.

# Apéndice B. Hoja de datos de motor GF-ZY45 DC

**GF-ZY45  
GEARED MOTOR  
SERIES**



直流减速电机 DC Carbon-brush Motors

电压/Main voltage: 6VDC、12VDC、24VDC

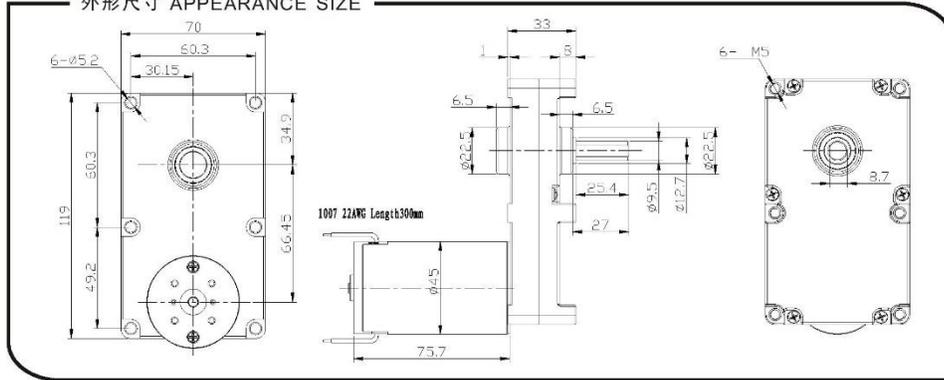
用途/Typical applications: 烤箱、烤炉、光学望远镜、自动门、广告灯箱、医疗器械、航模、碎纸机、办公设备、家用设备、执行器  
Grill, Oven, Angular telescope, Garage gate, Electric advertising, Medical equipment, Aeromodelling, Paper shredder, Office equipment, Household appliances, Automatic actuator.

重量/Weight: 900~950g/pcs(approx)

包装外形尺寸/Packing details: CTN size: 31X30XH28cm 12pcs/CTN G.W.12kgs

**RANSI**

外形尺寸 APPEARANCE SIZE



减速箱力矩&转速/Gear Box Torque&Speed

减速箱级数 Number of stages	3 减速比 Stages reduction	4 减速比 Stages reduction	4 减速比 Stages reduction	5 减速比 Stages reduction	6 减速比 Stages reduction
减速比 Reduction ratio	127	251	389, 590, 722, 897	1269, 1601, 1929	3385, 5078
最大额定力矩 Max. Running torque	30kgf.cm	30kgf.cm	50kgf.cm	80kgf.cm	100kgf.cm
最大破坏力矩 Max. Gear breaking torque	90kgf.cm	90kgf.cm	150kgf.cm	240kgf.cm	300kgf.cm
最高齿轮效率 Max. Gearing efficiency	73%	65%	65%	59%	53%

其它输出轴尺寸请致电或邮件给我司 Other dimensions of the output shaft can be customized, please telephone or e-mail to us.

光电机参数/Motor Date

马达型号 Motor Model	电压 Rated Volt. V	空载 No load		负载 Load torque				堵转 Stall torque	
		电流 Current	转速 Speed	电流 Current	转速 Speed	扭矩 Torque	输出功率 Output power	扭矩 Torque	电流 Current
		mA	r/min	mA	r/min	gf.cm	W	gf.cm	A
ZY45123000	12	≤210	3000	≤1200	2430	390	9.5	2470	6.6
ZY45124500	12	≤440	4500	≤2050	3710	480	17.8	2706	10.2
ZY45126000	12	≤630	6000	≤4150	5240	610	31.9	4700	20.3
ZY45243000	24	≤120	3000	≤620	2590	380	9.84	2160	3.4
ZY45244500	24	≤270	4500	≤1340	3850	490	18.8	3233	5.5
ZY45246000	24	≤360	6000	≤2050	5120	650	33.2	4715	12.2

· 马达和齿轮箱装配成减速电机后输出扭矩 = 马达扭矩X减速比X齿轮效率; 输出转速 = 马达转速 / 减速比 .  
· After connecting motor and gearbox which is named gearmotor the output torque: motor torque x reduction ratio x gearing efficiency; output speed: motor speed/reduction ratio .

# Apéndice E. Hojas de datos cDAQ 9178

## SPECIFICATIONS

# NI cDAQ™ -9178

## NI CompactDAQ Eight-Slot USB Chassis

These specifications are for the National Instruments CompactDAQ 9178 chassis only. These specifications are typical at 25 °C unless otherwise noted. For the C Series I/O module specifications, refer to the documentation for the C Series I/O module you are using.

### Analog Input

---

Input FIFO size.....	127 samples per slot
Maximum sample rate <sup>1</sup> .....	Determined by the C Series I/O module or modules
Timing accuracy <sup>2</sup> .....	50 ppm of sample rate
Timing resolution <sup>3</sup> .....	12.5 ns
Number of channels supported.....	Determined by the C Series I/O module or modules

### Analog Output

---

Number of channels supported	
Hardware-timed task	
Onboard regeneration.....	16
Non-regeneration.....	Determined by the C Series I/O module or modules

<sup>1</sup> Performance dependent on type of installed C Series I/O module and number of channels in the task.

<sup>2</sup> Does not include group delay. For more information, refer to the documentation for each C Series I/O module.

<sup>3</sup> Does not include group delay. For more information, refer to the documentation for each C Series I/O module.



Non-hardware-timed task.....	Determined by the C Series I/O module or modules
Maximum update rate	
Onboard regeneration.....	1.6 MS/s (multi-channel, aggregate)
Non-regeneration.....	Determined by the C Series I/O module or modules
Timing accuracy.....	50 ppm of sample rate
Timing resolution.....	12.5 ns
Output FIFO size	
Onboard regeneration.....	8,191 samples shared among channels used
Non-regeneration.....	127 samples per slot
AO waveform modes.....	Non-periodic waveform, periodic waveform regeneration mode from onboard memory, periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update

## Digital Waveform Characteristics

---

Waveform acquisition (DI) FIFO..... 127 samples per slot

### Waveform generation (DO) FIFO

  Slots 1 to 4..... 2,047 samples

  Slots 5 to 8..... 1,023 samples



**Note** When modules are installed in slots 1 through 4, FIFO is 2,047 samples per slot for all slots. When any module is installed in slots 5 through 8, FIFO is 1,023 samples per slot for all eight slots.

### Digital input sample clock frequency

  Streaming to application..... System-dependent memory

  Finite..... 0 to 10 MHz

### Digital output sample clock frequency

  Streaming from application..... System-dependent memory

  Regeneration from FIFO..... 0 to 10 MHz

  Finite..... 0 to 10 MHz

Timing accuracy.....50 ppm

## General-Purpose Counters/Timers

---

Number of counters/timers.....4  
Resolution.....32 bits  
Counter measurements.....Edge counting, pulse, semi-period, period,  
two-edge separation, pulse width  
Position measurements.....X1, X2, X4 quadrature encoding with  
Channel Z reloading; two-pulse encoding  
Output applications.....Pulse, pulse train with dynamic updates,  
frequency division, equivalent time sampling  
Internal base clocks.....80 MHz, 20 MHz, 100 kHz  
External base clock frequency.....0 to 20 MHz  
Base clock accuracy.....50 ppm  
Output frequency.....0 to 20 MHz  
Inputs.....Gate, Source, HW\_Arm, Aux, A, B, Z,  
Up\_Down  
Routing options for inputs.....Any module PFI, chassis PFI BNC, analog  
trigger, many internal signals  
FIFO.....Dedicated 127-sample FIFO

## Frequency Generator

---

Number of channels.....1  
Base clocks.....20 MHz, 10 MHz, 100 kHz  
Divisors.....1 to 16 (integers)  
Base clock accuracy.....50 ppm  
Output.....Any chassis PFI BNC or module PFI terminal

## Module PFI Characteristics

---

Functionality.....Static digital input, static digital output, timing input, and timing output  
 Timing output sources<sup>4</sup>.....Many analog input, analog output, counter, digital input, and digital output timing signals  
 Timing input frequency.....0 to 20 MHz  
 Timing output frequency.....0 to 20 MHz

## Chassis PFI Characteristics

---

Maximum input or output frequency.....1 MHz  
 Cable length.....3 m (10 ft)  
 Cable impedance.....50 Ω  
 TRIG 0 (PFI 0), TRIG 1 (PFI 1).....BNC  
 Power-on state.....High impedance

**Table 1.** Input/Output Voltage Protection

Voltage	Minimum	Maximum
Input	-20 V	25 V
Output	-15 V	20 V

Maximum operating conditions<sup>5</sup>

$I_{OL}$  output low current.....8 mA maximum  
 $I_{OH}$  output high current.....-8 mA maximum

<sup>4</sup> Actual signals available dependent on type of installed C Series I/O module.

<sup>5</sup> Stresses beyond those listed under *Maximum operating conditions* may cause permanent damage to the chassis.

**Table 2.** DC Input Characteristics

Voltage	Minimum	Maximum
Positive going threshold	1.43 V	2.28 V
Negative going threshold	0.86 V	1.53 V
Hysteresis	0.48 V	0.87 V

**Table 3.** DC Output Characteristics

Voltage	Conditions	Minimum	Maximum
High	-	-	5.25 V
	Sourcing 100 $\mu$ A	4.65 V	-
	Sourcing 2 mA	3.60 V	-
	Sourcing 3.5 mA	3.44 V	-
Low	Sinking 100 $\mu$ A	-	0.10 V
	Sinking 2 mA	-	0.64 V
	Sinking 3.5 mA	-	0.80 V

## Digital Triggers

Source.....	Any chassis PFI BNC or module PFI terminal
Polarity.....	Software-selectable for most signals
Analog input function.....	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Analog output function.....	Start Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Counter/timer function.....	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down

## Module I/O States

---

At power-on.....Module-dependent. Refer to the documentation for each C Series I/O module.



**Note** The chassis may revert the input/output of the modules to their power-on state when the USB cable is removed.

## Power Requirements

---



**Caution** You must use a National Electric Code (NEC) Class 2 power source with the NI cDAQ-9178 chassis.



**Note** Some C Series I/O modules have additional power requirements. For more information about C Series I/O module power requirements, refer to the documentation for each C Series I/O module.



**Note** Sleep mode for C Series I/O modules is not supported in the NI cDAQ-9178.

Input voltage range.....9 to 30 V

Maximum required input power<sup>6</sup>.....15 W

Power input connector.....2 positions 3.5 mm pitch pluggable screw terminal with screw locks similar to Sauro CTMH020F8-0N001

Power input mating connector.....Sauro CTF020V8, Phoenix Contact 1714977, or equivalent

Power consumption from USB,.....500  $\mu$ A maximum  
4.10 to 5.25 V

---

<sup>6</sup> Includes maximum 1 W module load per slot across rated temperature and product variations.

## Bus Interface

---

USB specification.....	USB 2.0 Hi-Speed
High-performance data streams .....	7
Data stream types available.....	Analog input, analog output, digital input, digital output, counter/timer input, counter/timer output, NI-XNET <sup>7</sup>



**Note** If you are connecting the NI cDAQ-9178 chassis to a USB hub, the hub must be externally powered.

## Physical Characteristics

---

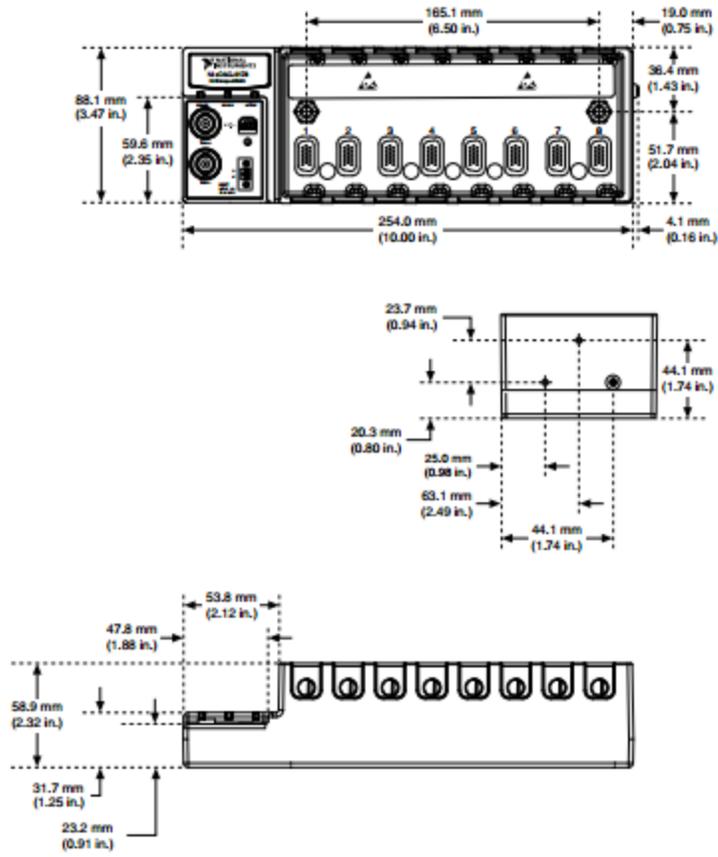
Weight (unloaded).....	Approx. 878 g (31.0 oz)
Dimensions (unloaded).....	254.0 mm × 88.1 mm × 58.9 mm (10 in. × 3.47 in. × 1.31 in.) Refer to the following figure.

If you need to clean the chassis, wipe it with a dry towel.

---

<sup>7</sup> When a session is active, CAN or LIN (NI-XNET) C Series modules use a total of two data streams regardless of the number of NI-XNET modules in the chassis.

**Figure 1. NI cDAQ-9178 Dimensions**



## Environmental

Operating temperature <sup>8</sup> .....	-20 °C to 55 °C (IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Storage temperature.....	-40 °C to 85 °C (IEC-600068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Ingress protection.....	IP 30

<sup>8</sup> When operating the NI cDAQ-9178 in temperatures below 0 °C, you must use the PS-15 power supply or another power supply rated for below 0 °C.

Operating humidity .....	10 to 90% RH, noncondensing (IEC-60068-2-56)
Storage humidity .....	5 to 95% RH, noncondensing (IEC-60068-2-56)
Pollution Degree (IEC 60664).....	2
Maximum altitude .....	5,000 m
Indoor use only.	

## Shock and Vibration

---

To meet these specifications, you must panel mount the NI cDAQ-9178 system, use an NI locking USB cable, and affix ferrules to the ends of the terminal lines.

Operational shock.....	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (Tested in accordance with IEC 60068-2-27. Test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F.)
------------------------	---

### Random vibration

Operating.....	5 to 500 Hz, 0.3 $g_{rms}$
Non-operating.....	5 to 500 Hz, 2.4 $g_{rms}$ (Tested in accordance with IEC 60068-2-64. Non-operating test profile exceeds the requirements of MIL PRF-28800F, Class 3.)

## Safety

---

This product meets the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



**Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Online Product Certification](#) section.

## Electromagnetic Compatibility

---

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



**Note** In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia, and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



**Note** Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



**Note** For EMC declarations and certifications, refer to the *Online Product Certification* section.

## CE Compliance

---

This product meets the essential requirements of applicable European Directives as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

## Online Product Certification

---

To obtain product certifications and the DoC for this product, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

## Environmental Management

---

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *Minimize Our Environmental Impact* web page at [ni.com/environment](http://ni.com/environment). This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

# Apéndice F. Hojas de datos NI 9211

DATASHEET

## NI 9211 Datasheet

4 TC,  $\pm 80$  mV, 24 Bit, 14 S/s Aggregate



- Screw-terminal connectivity
- 50 Hz/60 Hz noise rejection
- 250 Vrms, CAT II, channel-to-earth isolation

The NI 9211 thermocouple input module for use with CompactDAQ and NI CompactRIO chassis includes a 24-bit delta-sigma analog-to-digital converter, anti-aliasing filters, open-thermocouple detection, and cold-junction compensation for high-accuracy thermocouple measurements. The NI 9211 features NIST-traceable calibration and a channel-to-earth ground double isolation barrier for safety, noise immunity, and high common-mode voltage range.

	<b>Kit Contents</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• NI 9211</li><li>• NI 9211 Getting Started Guide</li></ul>
	<b>Accessories</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• NI 9932 Backshell Connector Kit</li></ul>



C SERIES THERMOCOUPLE MODULE COMPARISON							
Product Name	Channels	Maximum Accuracy* (°C)	Sample Rate	Software Selectable OTD	Autozero	Connectivity	Isolation Continuous
NI 9211	4	2.11	14 S/s	No	Yes	Screw Terminal	250 Vrms Ch-Earth
NI 9212	8	1.29	95 S/s/ch	No	No	Isothermal Terminal Block	250 Vrms Ch-Ch
NI 9213	16	2.25	75 S/s	No	Yes	Spring Terminal	250 Vrms Ch-Earth
NI 9214	16	1.24	68 S/s	Yes	Yes	Isothermal Terminal Block	250 Vrms Ch-Earth

\* For a J type thermocouple at 100 °C using high-resolution mode when applicable.

## NI C Series Overview



NI provides more than 100 C Series modules for measurement, control, and communication applications. C Series modules can connect to any sensor or bus and allow for high-accuracy measurements that meet the demands of advanced data acquisition and control applications.

- Measurement-specific signal conditioning that connects to an array of sensors and signals
- Isolation options such as bank-to-bank, channel-to-channel, and channel-to-earth ground
- -40 °C to 70 °C temperature range to meet a variety of application and environmental needs
- Hot-swappable

The majority of C Series modules are supported in both CompactRIO and CompactDAQ platforms and you can move modules from one platform to the other with no modification.

## CompactRIO



CompactRIO combines an open-embedded architecture with small size, extreme ruggedness, and C Series modules in a platform powered by the NI LabVIEW reconfigurable I/O (RIO) architecture. Each system contains an FPGA for custom timing, triggering, and processing with a wide array of available modular I/O to meet any embedded application requirement.

## CompactDAQ

CompactDAQ is a portable, rugged data acquisition platform that integrates connectivity, data acquisition, and signal conditioning into modular I/O for directly interfacing to any sensor or signal. Using CompactDAQ with LabVIEW, you can easily customize how you acquire, analyze, visualize, and manage your measurement data.



## Software

### LabVIEW Professional Development System for Windows



- Use advanced software tools for large project development
- Generate code automatically using DAQ Assistant and Instrument I/O Assistant
- Use advanced measurement analysis and digital signal processing
- Take advantage of open connectivity with DLLs, ActiveX, and .NET objects
- Build DLLs, executables, and MSI installers

### NI LabVIEW FPGA Module



- Design FPGA applications for NI RIO hardware
- Program with the same graphical environment used for desktop and real-time applications
- Execute control algorithms with loop rates up to 300 MHz
- Implement custom timing and triggering logic, digital protocols, and DSP algorithms
- Incorporate existing HDL code and third-party IP including Xilinx IP generator functions
- Purchase as part of the LabVIEW Embedded Control and Monitoring Suite



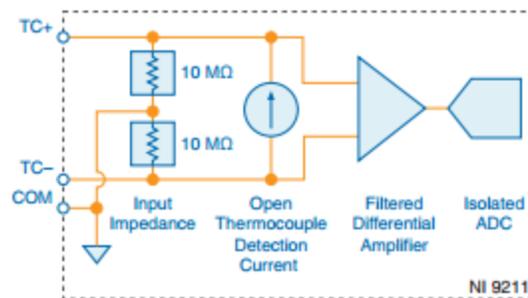
### NI LabVIEW Real-Time Module

- Design deterministic real-time applications with LabVIEW graphical programming
- Download to dedicated NI or third-party hardware for reliable execution and a wide selection of I/O
- Take advantage of built-in PID control, signal processing, and analysis functions
- Automatically take advantage of multicore CPUs or set processor affinity manually
- Take advantage of real-time OS, development and debugging support, and board support
- Purchase individually or as part of a LabVIEW suite

## Input Circuitry

The NI 9211 channels share a common ground isolated from other modules in the system. Each channel passes through a filter and then a 24-bit analog-to-digital converter (ADC) samples the channel.

**Figure 1.** Input Circuitry for One Channel of the NI 9211



### Open Thermocouple Detection

Each channel has an open thermocouple detection (OTD) circuit, which consists of a current source between the TC+ and TC- terminals. If an open thermocouple is connected to the channel, the current source forces a full-scale voltage across the terminals.

### Input Impedance

Each channel has a resistor that produces an input impedance between the TC and COM terminals. The gain and offset errors resulting from the source impedance of connected thermocouples are negligible for most applications. Thermocouples with a higher lead resistance can introduce more significant errors.

## Thermocouple Measurement Accuracy

---

Thermocouple measurement errors depend partly on the following factors:

- the type of thermocouple
- the accuracy of the thermocouple
- the temperature that you are measuring
- the resistance of the thermocouple wires
- the cold-junction temperature

For the best accuracy performance, set up the NI 9211 according to the getting started guide on [ni.com/manuals](http://ni.com/manuals) to minimize thermal gradients across the NI 9211 terminals.

### Cold-Junction Accuracy

Heat dissipated by adjacent C Series modules or nearby heat sources can cause errors in thermocouple measurements by heating the NI 9211 terminals to a different temperature than the cold-junction compensation sensor. Thermal gradient across the terminals can cause the terminals of different NI 9211 channels to be at different temperatures, which creates accuracy errors and affects the relative accuracy between channels.

The temperature measurement accuracy specifications include errors caused by the thermal gradient across the NI 9211 terminals for configurations with the NI 9211 terminals facing forward or upward.

### Autozero Channel

The NI 9211 has an internal autozero channel, which can be subtracted from each thermocouple reading to compensate for offset errors. Use the autozero channel if the ambient temperature is less than 15 °C or more than 35 °C. Refer to the documentation for the software that you are using for information about using the NI 9211 autozero channel.

## NI 9211 Specifications

---

The following specifications are typical for the range -40 °C to 70 °C unless otherwise noted. Accuracy within typical use can vary based on chassis, mounting parameters, other modules present in the system, and installed accessories.



**Caution** The input terminals of this device are not protected for electromagnetic interference. As a result, this device may experience reduced measurement accuracy or other temporary performance degradation when connected cables are routed in an environment with radiated or conducted radio frequency electromagnetic interference. To limit radiated emissions and to ensure that this device functions within specifications in its operational electromagnetic environment, take precautions when designing, selecting, and installing measurement probes and cables.

## Input Characteristics

Number of channels	4 thermocouple channels, 1 internal autozero channel, 1 internal cold-junction compensation channel
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-Sigma
Sampling mode	Scanned
Voltage measurement range	±80 mV
Temperature measurement ranges	Works over temperature ranges defined by NIST (J, K, T, E, N, B, R, S thermocouple types)
Conversion time	70 ms per channel; 420 ms total for all channels including the autozero and cold-junction channels
Common-mode voltage range	
Channel-to-COM	±1.5 V
COM-to-earth ground	±250 V
Common-mode rejection ratio (0 Hz to 60 Hz)	
Channel-to-COM	95 dB
COM-to-earth ground	>170 dB
Input bandwidth (-3 dB)	15 Hz
Noise rejection (at 50 Hz and 60 Hz)	85 dB minimum
Overvoltage protection	±30 V between any input and COM
Differential input impedance	20 MΩ
Input current	50 nA
Input noise	1 μVrms
Gain error (at -40 °C to 70 °C)	0.06% typical, 0.1% maximum
Offset error (with autozero channel on)	±15 μV typical, ±20 μV maximum
Gain error from source impedance	Add 0.05 ppm per Ω when source impedance >50 Ω
Offset error from source impedance	Add ±0.05 μV typical, ±0.07 μV maximum per Ω when source impedance >50 Ω

#### Cold-junction compensation sensor accuracy

0 °C to 70 °C	±0.6 °C typical, ±1.3 °C maximum
-40 °C to 70 °C	±1.7 °C maximum
MTBF	633,012 hours at 25 °C; Bellcore Issue 2, Method 1, Case 3, Limited Part Stress Method

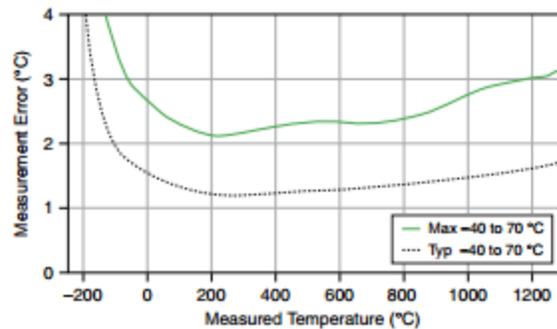
## Temperature Measurement Accuracy

### Measurement sensitivity<sup>1</sup>

With autozero channel on	
Types J, K, T, E, N	<0.07 °C
Type B	<0.25 °C
Types R, S	<0.60 °C
With autozero channel off	
Types J, K, T, E, N	<0.05 °C
Type B	<0.20 °C
Types R, S	<0.45 °C

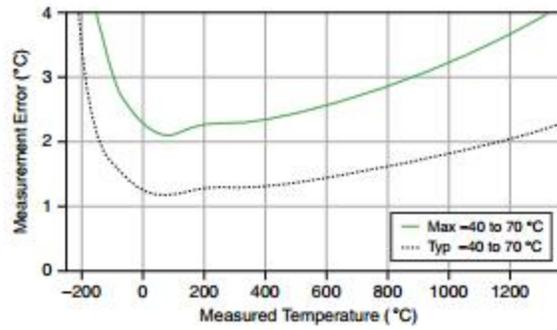
The following figures show the typical and maximum errors for each thermocouple type when used with the NI 9211 over the full temperature range and autozero on. The figures account for gain errors, offset errors, differential and integral nonlinearity, quantization errors, noise errors, and isothermal errors. The figures do not account for the accuracy of the thermocouple itself.

**Figure 2. Thermocouple Type J and N Errors**

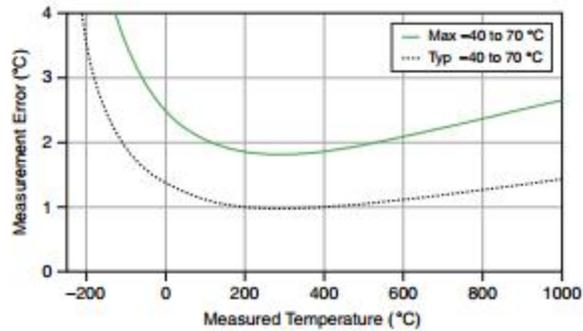


<sup>1</sup> Measurement sensitivity represents the smallest change in temperature that a sensor can detect. It is a function of noise. The values assume the full measurement range of the standard thermocouple sensor according to ASTM E230-87.

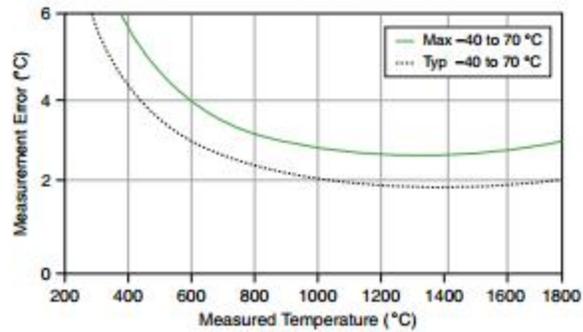
**Figure 3. Thermocouple Type K Errors**



**Figure 4. Thermocouple Type T and E Errors**

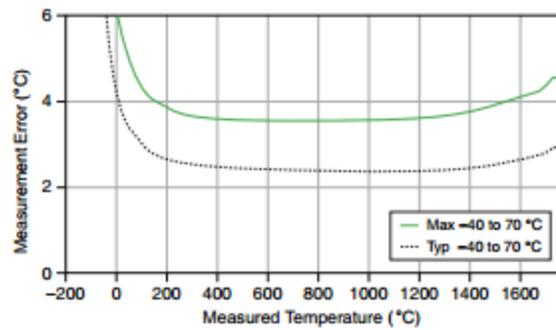


**Figure 5. Thermocouple Type B Errors**





**Figure 6. Thermocouple Type R and S Errors**



## Power Requirements

### Power consumption from chassis

Active mode	170 mW maximum
Sleep mode	4 mW maximum

### Thermal dissipation (at 70 °C)

Active mode	170 mW maximum
Sleep mode	4 mW maximum

## Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.



**Tip** For two-dimensional drawings and three-dimensional models of the C Series module and connectors, visit [ni.com/dimensions](http://ni.com/dimensions) and search by module number.

### Screw-terminal wiring

Gauge	0.25 mm <sup>2</sup> to 2.5 mm <sup>2</sup> (24 AWG to 12 AWG) copper conductor wire
Wire strip length	7 mm (0.28 in.) of insulation stripped from the end
Temperature rating	90 °C minimum
Torque for screw terminals	0.3 N · m (2.66 lb · in.)
Wires per screw terminal	One wire per screw terminal

### Connector securement

Securement type	Screw flanges provided
Torque for screw flanges	0.2 N · m (1.80 lb · in.)

Weight 150 g (5.3 oz)

## Safety Voltages

Connect only voltages that are within the following limits.

Channel-to-COM	±30 V maximum
Isolation	
Channel-to-channel	None
Channel-to-earth ground	
Continuous	250 Vrms, Measurement Category II
Withstand	2,300 Vrms, verified by a 5 s dielectric withstand test

Measurement Category II is for measurements performed on circuits directly connected to the electrical distribution system. This category refers to local-level electrical distribution, such as that provided by a standard wall outlet, for example, 115 V for U.S. or 230 V for Europe.



**Caution** Do not connect the NI 9211 to signals or use for measurements within Measurement Categories III or IV.

## Hazardous Locations

U.S. (UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, AEx nA IIC T4
Canada (C-UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, Ex nA IIC T4
Europe (ATEX) and International (IECEX)	Ex nA IIC T4 Gc

## Safety and Hazardous Locations Standards

This product is designed to meet the requirements of the following electrical equipment safety standards for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1
- EN 60079-0:2012, EN 60079-15:2010
- IEC 60079-0: Ed 6, IEC 60079-15; Ed 4
- UL 60079-0; Ed 5, UL 60079-15; Ed 3
- CSA 60079-0:2011, CSA 60079-15:2012



**Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Online Product Certification](#) section.



## Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for sensitive electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326-2-1 (IEC 61326-2-1): Class A emissions; Industrial immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



**Note** In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



**Note** Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



**Note** For EMC declarations and certifications, and additional information, refer to the [Online Product Certification](#) section.

## CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as follows:

- 2014/35/EU; Low-Voltage Directive (safety)
- 2014/30/EU; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)
- 94/9/EC; Potentially Explosive Atmospheres (ATEX)

## Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

## Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the system.

### Operating vibration

Random (IEC 60068-2-64)	5 $g_{rms}$ , 10 Hz to 500 Hz
Sinusoidal (IEC 60068-2-6)	5 g, 10 Hz to 500 Hz

Operating shock (IEC 60068-2-27)	30 g, 11 ms half sine; 50 g, 3 ms half sine; 18 shocks at 6 orientations
----------------------------------	---

## Environmental

Refer to the manual for the chassis you are using for more information about meeting these specifications.

Operating temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40 °C to 70 °C
Storage temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40 °C to 85 °C
Ingress protection	IP40
Operating humidity (IEC 60068-2-78)	10% RH to 90% RH, noncondensing
Storage humidity (IEC 60068-2-78)	5% RH to 95% RH, noncondensing
Pollution Degree	2
Maximum altitude	2,000 m

Indoor use only.

## Environmental Management

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *Minimize Our Environmental Impact* web page at [ni.com/environment](http://ni.com/environment). This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

## Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



**EU Customers** At the end of the product life cycle, all NI products must be disposed of according to local laws and regulations. For more information about how to recycle NI products in your region, visit [ni.com/environment/weee](http://ni.com/environment/weee).

## 电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



**中国客户** National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china)。(For information about China RoHS compliance, go to [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china).)

## Calibration

You can obtain the calibration certificate and information about calibration services for the NI 9211 at [ni.com/calibration](http://ni.com/calibration).

---

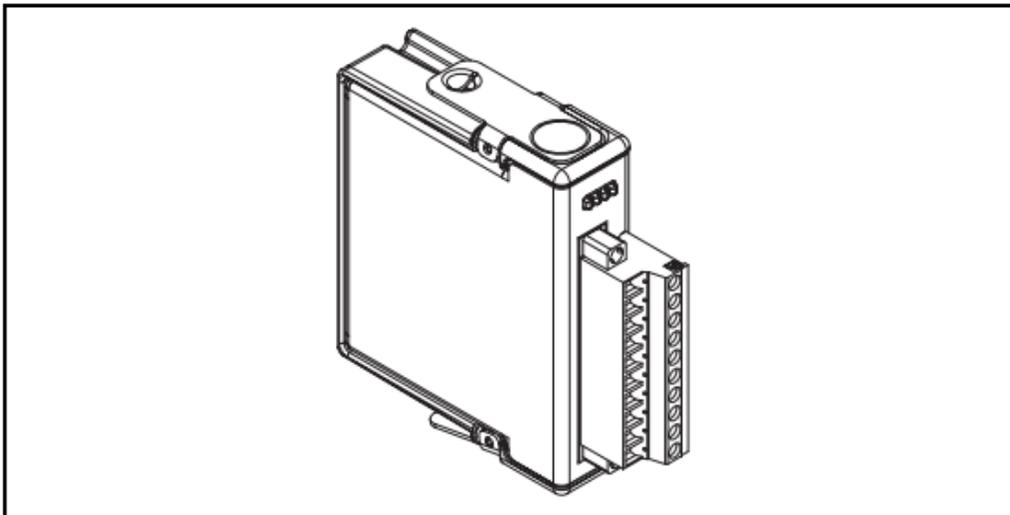
Calibration interval	1 year
----------------------	--------

---

**OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS**  
**NI 9481**  
**4-Channel SPST Electromechanical Relay Module**

Français Deutsch 日本語 한국어 简体中文

[ni.com/manuals](http://ni.com/manuals)



This document describes how to use the National Instruments 9481 and includes specifications and terminal assignments for the NI 9481. Visit `ni.com/info` and enter `rdsoftwareversion` to determine which software you need for the modules you are using. For information about installing, configuring, and programming the system, refer to the system documentation. Visit `ni.com/info` and enter `cseriesdoc` for information about C Series documentation.



**Note** The safety guidelines and specifications in this document are specific to the NI 9481. The other components in the system might not meet the same safety ratings and specifications. Refer to the documentation for each component in the system to determine the safety ratings and specifications for the entire system. Visit `ni.com/info` and enter `cseriesdoc` for information about C Series documentation.

## Safety Guidelines

---

Operate the NI 9481 only as described in these operating instructions.



**Hot Surface** This icon denotes that the component may be hot. Touching this component may result in bodily injury.

## Safety Guidelines for Hazardous Voltages

If hazardous voltages are connected to the module, take the following precautions. A hazardous voltage is a voltage greater than 42.4 V<sub>pk</sub> or 60 VDC to earth ground.



**Caution** Ensure that hazardous voltage wiring is performed only by qualified personnel adhering to local electrical standards.



**Caution** Do *not* mix hazardous voltage circuits and human-accessible circuits on the same module.

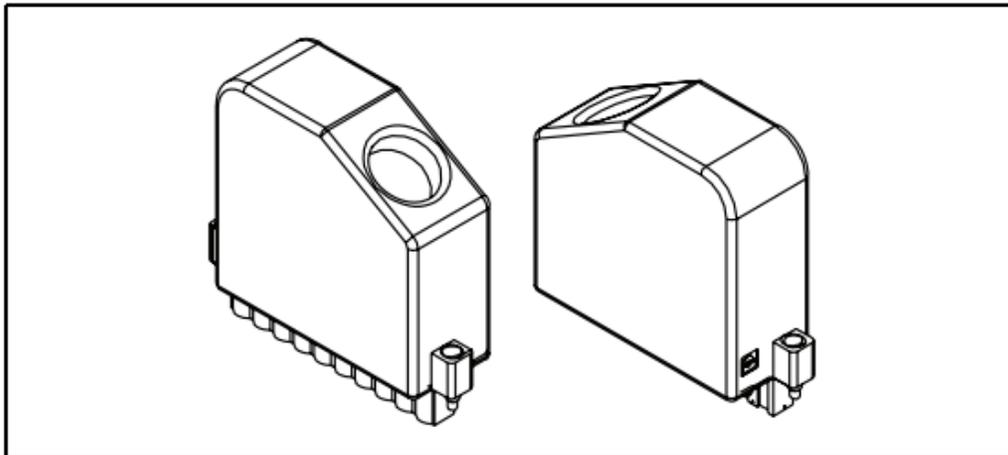


**Caution** Make sure that devices and circuits connected to the module are properly insulated from human contact.



**Caution** When module terminals are hazardous voltage LIVE ( $>42.4 V_{pk}/60 VDC$ ), you must ensure that devices and circuits connected to the module are properly insulated from human contact. You must use the NI 9932 connector backshell to ensure that the terminals are *not* accessible.

Figure 1 shows the NI 9932 connector backshell.



**Figure 1.** NI 9932 Connector Backshell

## Safety Guidelines for Hazardous Locations

The NI 9481 is suitable for use in Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4 hazardous locations; Class I, Zone 2, AEx nC IIC T4 hazardous locations; and nonhazardous locations only. Follow these guidelines if you are installing the NI 9481 in a potentially explosive environment. Not following these guidelines may result in serious injury or death.



**Caution** Do *not* disconnect I/O-side wires or connectors unless power has been switched off or the area is known to be nonhazardous.



**Caution** Do *not* remove modules unless power has been switched off or the area is known to be nonhazardous.



**Caution** Substitution of components may impair suitability for Class I, Division 2.



**Caution** For Zone 2 applications, install the system in an enclosure rated to at least IP 54 as defined by IEC 60529 and EN 60529.

## Special Conditions for Marine Applications

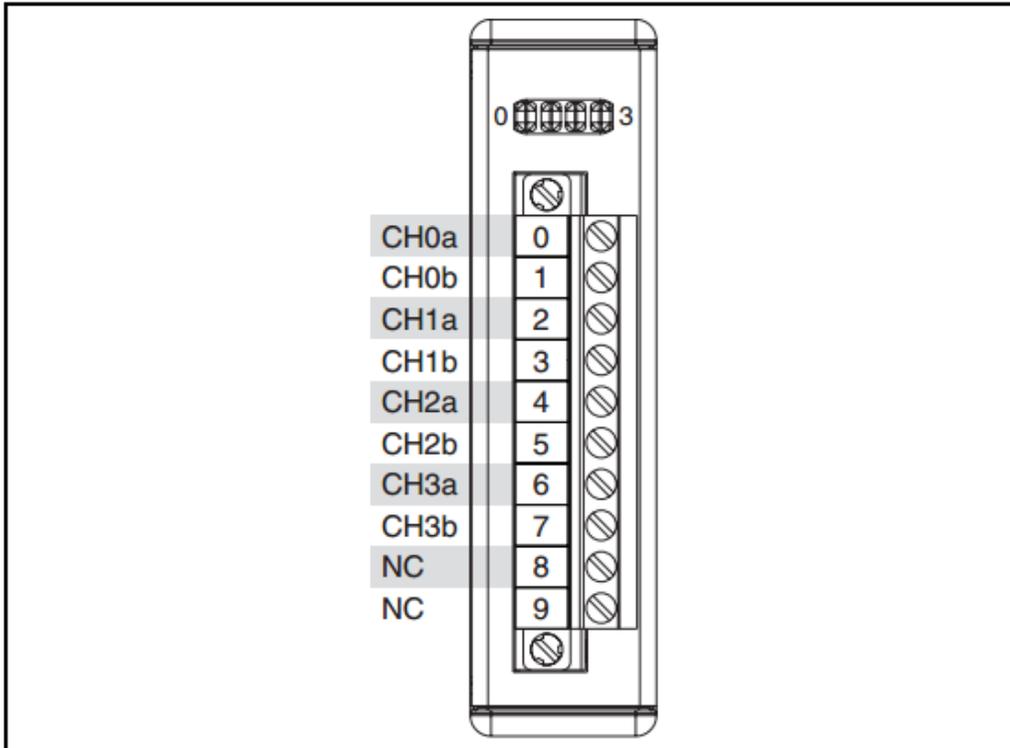
Some modules are Lloyd's Register (LR) Type Approved for marine applications. To verify Lloyd's Register certification, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification) and search for the LR certificate, or look for the Lloyd's Register mark on the module.



**Caution** To meet radio frequency emission requirements for marine applications, use shielded cables and install the system in a metal enclosure. Suppression ferrites must be installed on power supply inputs near power entries to modules and controllers. Power supply and module cables must be separated on opposite sides of the enclosure and must enter and exit through opposing enclosure walls.

## Connecting the NI 9481

The NI 9481 has a 10-terminal detachable screw-terminal connector that provides connections for 4 electromechanical relay channels.

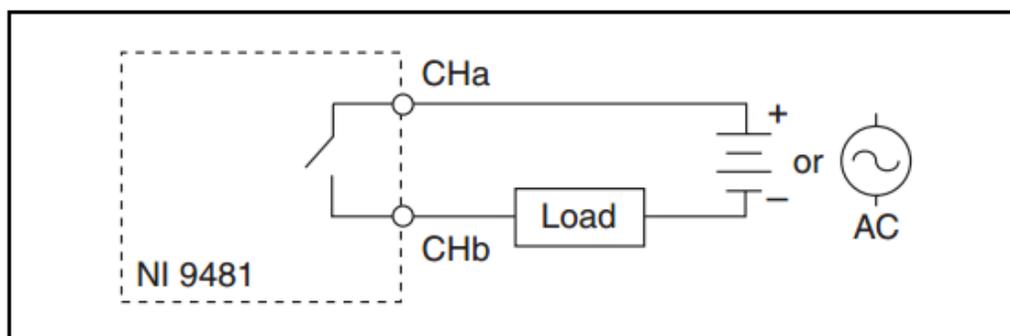


**Figure 2.** NI 9481 Terminal Assignments

Each electromechanical relay channel has two interchangeable terminals, CHa and CHb.

Each channel has an LED that indicates the state of the channel. When a channel LED is lit, the channel is on. When the LED is dark, the channel is off. The LEDs are disabled when the chassis is in sleep mode. Refer to the *Sleep Mode* section for more information about sleep mode.

When connecting a load to the NI 9481, connect the positive lead of the load to either the CHa or the CHb terminal, and the ground of the load to one of the leads of the power supply. Connect the remaining CHa or CHb terminal to the other lead of the power supply. Figure 3 shows a possible configuration.



**Figure 3.** Connecting a Load to the NI 9481

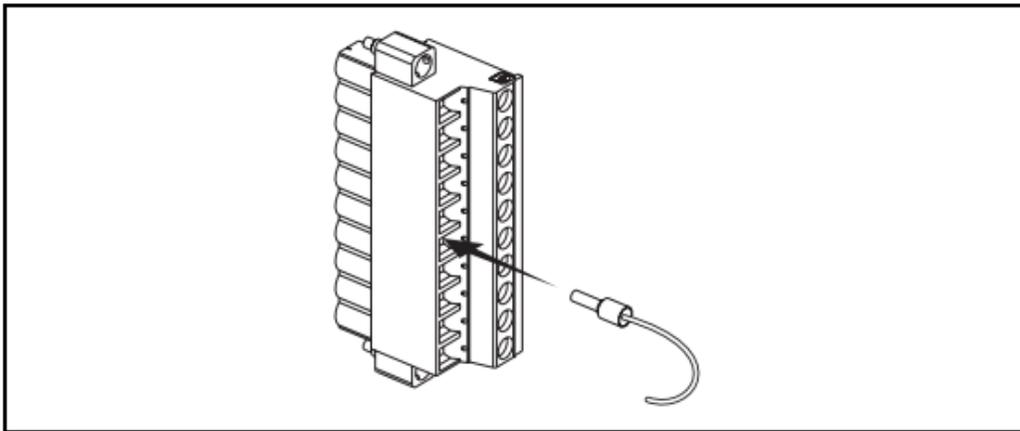


**Note** You must use 2-wire ferrules to create a secure connection when connecting more than one wire to a single terminal on the NI 9481.

When the channel is turned on, the terminal connected to the load drives current or applies voltage to the load. When the channel is off, the terminal does not drive current or apply voltage to the load.

### **Wiring for High-Vibration Applications**

If an application is subject to high vibration, National Instruments recommends that you either use ferrules to terminate wires to the detachable screw-terminal connector or use the NI 9932 backshell kit to protect the connections. Refer to Figure 4 for an illustration of using ferrules. Refer to Figure 1 for an illustration of the NI 9932 connector backshell.



**Figure 4.** 10-Terminal Detachable Screw-Terminal Connector with Ferrule

## Sleep Mode

---

This module supports a low-power sleep mode. Support for sleep mode at the system level depends on the chassis that the module is plugged into. Refer to the chassis manual for information about support for sleep mode. If the chassis supports sleep mode, refer to the software help for information about enabling sleep mode. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter `cseriesdoc` for information about C Series documentation.

Typically, when a system is in sleep mode, you cannot communicate with the modules. In sleep mode, the system consumes minimal power and may dissipate less heat than it does in normal mode. Refer to the *Specifications* section for more information about power consumption and thermal dissipation.

## Specifications

---

The following specifications are typical for the range  $-40$  to  $70$  °C unless otherwise noted.

### Output Characteristics

Number of channels .....	4 electromechanical relay channels
Relay type .....	Single pole single throw (SPST)
Power-on output state .....	Channels off

Switching capacity (resistive load)

Switching voltage ..... 60 VDC max, 250 V<sub>rms</sub> max

Switching current, per channel

One channel on ..... 4 A max at 30 VDC,  
1 A max at 60 VDC,  
4 A max at 250 V<sub>rms</sub>

All channels on ..... 2 A max at 30 VDC,  
1 A max at 60 VDC,  
2 A max at 250 V<sub>rms</sub>

Resistance per channel,

channel on ..... 50 mΩ

Switching rate ..... 1 operation per second

Relay release time ..... 5 ms max

Relay operate time ..... 10 ms max

Relay bounce time ..... 3 ms

Off state leakage ..... 10 μA max

Life expectancy

Mechanical (no load) ..... 20,000,000 operations

Electrical (connecting to load) ... 100,000 operations

MTBF ..... 460,321 hours at 25 °C;  
Bellcore Issue 2, Method 1,  
Case 3, Limited Part Stress  
Method



**Note** Contact NI for Bellcore MTBF specifications at other temperatures or for MIL-HDBK-217F specifications.

## Power Requirements

Power consumption from chassis

Active mode ..... 580 mW max

Sleep mode ..... 5 mW max

Thermal dissipation (at 70 °C)

Active mode ..... 1.5 W max

Sleep mode ..... 5 mW max

## Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Screw-terminal wiring .....	12 to 24 AWG copper conductor wire with 10 mm (0.39 in.) of insulation stripped from the end
Torque for screw terminals .....	0.5 to 0.6 N · m (4.4 to 5.3 lb · in.)
Ferrules .....	0.25 mm <sup>2</sup> to 2.5 mm <sup>2</sup>
Weight.....	150 g (5.3 oz)

## Safety

### Safety Voltages

Connect only voltages that are within the following limits.

CHa-to-CHb.....	250 V <sub>rms</sub> max, Measurement Category II
-----------------	--

Measurement Category II is for measurements performed on circuits directly connected to the electrical distribution system. This category refers to local-level electrical distribution, such as

that provided by a standard wall outlet, for example, 115 V for U.S. or 230 V for Europe.



**Caution** Do *not* connect the NI 9481 to signals or use for measurements within Measurement Categories III or IV.

### Isolation

#### Channel-to-channel

Continuous ..... 250 V<sub>rms</sub>

Withstand ..... 1,400 V<sub>rms</sub>, verified by a 5 s dielectric withstand test

#### Channel-to-earth ground

Continuous ..... 250 V<sub>rms</sub>

Withstand ..... 2,300 V<sub>rms</sub>, verified by a 5 s dielectric withstand test

### Hazardous Locations

U.S. (UL) ..... Class I, Division 2,  
Groups A, B, C, D, T4;  
Class I, Zone 2,  
AEx nC IIC T4

## Safety Standards

This product meets the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



**Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Online Product Certification](#) section.

## Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 (IEC 61326): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



**Note** For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the *Online Product Certification* section.



**Note** For EMC compliance, operate this device with shielded cabling.

## CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

## Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by module number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

## Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the system and either affix ferrules to the ends of the terminal wires or use the NI 9932 backshell kit to protect the connections.

Operating vibration,  
sinusoidal (IEC 60068-2-6) ..... 5 g, 40 to 500 Hz; 0.062 in.  
double amplitude,  
10 to 40 Hz

## Environmental

National Instruments C Series modules are intended for indoor use only but may be used outdoors if installed in a suitable enclosure. Refer to the manual for the chassis you are using for more information about meeting these specifications.

Operating temperature  
(IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2) ..... -40 to 70 °C

Storage temperature  
(IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2) ..... -40 to 85 °C

Ingress protection..... IP 40

Operating humidity (IEC 60068-2-56).....	10 to 90% RH, noncondensing
Storage humidity (IEC 60068-2-56).....	5 to 95% RH, noncondensing
Maximum altitude.....	2,000 m
Pollution Degree (IEC 60664) .....	2

## **Environmental Management**

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at [ni.com/environment](http://ni.com/environment). This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

## Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



**EU Customers** At the end of the life cycle, all products *must* be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit [ni.com/environment/weee](http://ni.com/environment/weee).

## 电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



**中国客户** National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china)。(For information about China RoHS compliance, go to [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china).)

# Apéndice H. Hojas de datos de resistencia eléctrica

W A T L O W

## Band Heaters

### Special Mica Barrel and Nozzle

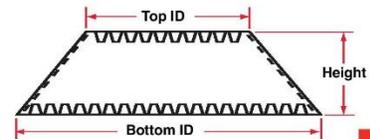
#### Special Construction Variations

Continued

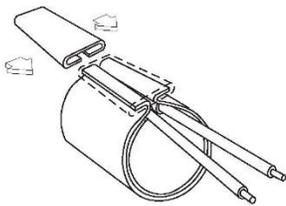
#### Cone Shapes

Cone shaped heaters are ideal for applications where heat is required for hoppers or funnels. The preferred method of attachment is with bent-up flange clamping. Cone shaped heaters are made to exact customer specifications.

To order, specify **cone shape adapter**. A **dimensional drawing or customer supplied sample heater is required**.

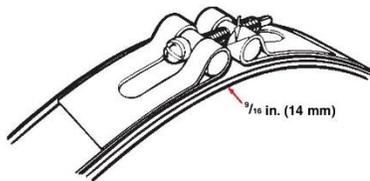
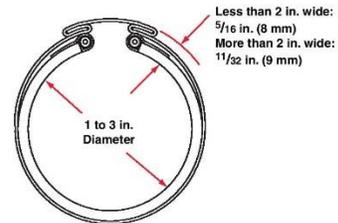


#### Clamping Variations



#### HV Wedge-Lok

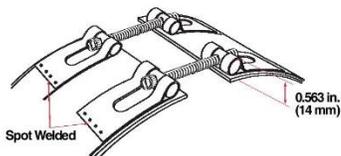
HV wedge-lok is designed to provide excellent clamping where mounting space is limited. It is available with Type A and L leads only. Clearance from I.D. of the heater to the outside edge of the wedge-lok is  $\frac{3}{16}$  inch (8 mm) nominal. Available on certain sizes from stock. To order, specify **HV wedge-lok**.



#### Standard and Low-Profile Clamping Strap

The standard clamping strap requires  $\frac{1}{16}$  inch (14 mm) clearance above the heated surface, at the barrel nuts. When clearance is limited, smaller barrel nuts can be used which require only  $\frac{3}{16}$  inch (9 mm) clearance. The clearance required by the clamping screw

depends on the screw length and the diameter of the heater. The low-profile clamping strap is standard on units less than 1 $\frac{1}{2}$  inches (45 mm) wide and utilizes a  $\frac{1}{2}$  inch (13 mm) wide strap. Consult Watlow for more information. To order, specify **low-profile clamping strap**.



#### Welded Barrel Nuts

An ideal way to provide access for instrumentation is to specify an oversized gap between the heater ends. If the clamp strap interferes with the positioning of the instrumentation device,

welded barrel nuts are recommended. Maximum gap is one inch (25 mm). Specify **welded barrel nuts with dimensional location and gap dimension** when ordering.

Band Heaters