



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA EDUCATIVO INGENIERO EN MECATRÓNICA

Control de un mecanismo rotacional de un grado de libertad
utilizando la plataforma myRIO y actuadores de Nitinol

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el título de ingeniero en mecatrónica, presenta:

Moreno Rodríguez Lizeth Fernanda

Asesor: Dr. David Isaías Rosas Almeida

Mexicali, B.C, a noviembre de 2021.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a Dios por darme el don de la vida, por la oportunidad de superarme y permitirme concluir mis estudios de licenciatura, así como este trabajo de tesis.

Doy gracias a mis padres por su amor incondicional, guía y apoyo constante en mi camino tanto personal como profesional.

Mi más sincero agradecimiento a mis profesores quienes fueron parte de mi formación tanto profesional como humana, por su consejo y dedicación; haciendo una mención especial a mi Director de Tesis, Dr. David Isaías Rosas Almeida por su tiempo, paciencia, apoyo y consejo para orientarme y lograr culminar este trabajo.

Extiendo el agradecimiento a mis compañeros y amigos, por ser parte de las aventuras, risas, desvelos y apoyo mutuo de esta maravillosa etapa.

A mi alma mater por todo el apoyo y conocimiento recibido.

Resumen

RESUMEN de la Tesis de Lizeth Fernanda Moreno Rodríguez, presentada como requisito para la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA. Mexicali, Baja California, México, noviembre de 2021.

CONTROL DE UN MECANISMO ROTACIONAL DE UN GRADO DE LIBERTAD UTILIZANDO LA PLATAFORMA MYRIO Y ACTUADORES DE NITINOL

Resumen aprobado por:

Dr. David Isaías Rosas Almeida

Director de Tesis

El diseño de un sistema de control de posicionamiento angular de un mecanismo de un grado de libertad, el cual utiliza un par de resortes de Nitinol como actuadores, es el objetivo de esta tesis. La actuación de los resortes se ve realizada a través de un voltaje de control, el cual se ve definido con base en una máquina de estados y un controlador PID. Esta técnica de control establece límites de voltaje y temperatura para mejorar el tiempo de enfriamiento de los mismos. La mesa de prueba consiste en una fuente de voltaje, un dispositivo myRIO-1900, una etapa de potencia, sensores de temperatura con su circuito correspondiente y un mecanismo rotacional en forma de T con un par de resortes de Nitinol a sus extremos.

Contenido

Introducción.....	5
1. Antecedentes	7
1.1 Aleación con memoria de forma Nickel-Titanio (Nitinol)	7
1.2 LabVIEW y plataforma MyRio	14
1.2.1 Descripción del programa LabVIEW.....	14
1.2.2 Plataforma myRIO-1900.....	17
1.2.3 Aplicaciones en tiempo Real	21
1.3 Controladores PID	22
1.4 Matrices de rotación y ángulos de Euler.....	29
2. Puesta en operación del sensor MPU-6050.....	38
2.1 Descripción del sensor	38
2.1.1 Registros.....	40
2.2 Protocolo de comunicación I ² C.....	44
2.3 Conversión de los datos del sensor a ángulos en grados	47
2.4 Programa para la lectura del sensor	55
3. Diseño del circuito para el sensor de temperatura	59
4. Descripción de la planta y pruebas básicas de operación	75
4.1 Conexión de la planta	75
4.2 Programa básico de operación	79
5. Diseño del algoritmo de control y pruebas de desempeño.....	88
5.1 Objetivo de control	88
5.2 Diseño y pruebas de desempeño del sistema incorporando un controlador PID	88
6. Conclusiones y trabajo futuro	100
Referencias.....	102
Anexo A	104
Anexo B	114

Introducción

Las aleaciones con memoria de forma son materiales que fueron descubiertos hace más de 50 años; sin embargo, no fue hasta estas últimas décadas que se comenzaron a estudiar de una manera más profunda. Las aplicaciones de este material van desde artefactos médicos hasta componentes para actividades de exploración en Marte. Una de sus características más importantes es su respuesta mecánica a estímulos no mecánicos, denominado efecto de memoria de forma. Una de las presentaciones más comunes y estudiadas de este tipo de aleaciones recibe el nombre de Nitinol. El Nitinol es un material compuesto por Niquel y Titanio; el cual, al ser deformado, es capaz de recuperar su forma original si es expuesto a una temperatura determinada.

Dentro de las ventajas de este material se encuentran: su comportamiento característico denominado efecto de memoria de forma, su gran fuerza de actuación en contraste a su tamaño, la superelasticidad y biocompatibilidad. Sin embargo, dentro de las desventajas que presenta este material están su alto coste de fabricación, una velocidad baja en términos de actuación y una relación de temperatura-esfuerzo-deformación en forma de histéresis.

Dentro del ámbito de la ingeniería de control, diversos autores han implementado distintos sistemas de posicionamiento utilizando elementos con memoria de forma cuya respuesta es dependiente a la temperatura, a través del calentamiento del material por efecto de la ley de Joule. Dada las características de este tipo de materiales, el principal objetivo de control ha sido incrementar la velocidad de actuación sin dañar el elemento en cuestión. Featherstone y Harn [1] implementaron un sistema que busca mejorar la velocidad de respuesta de un mecanismo estableciendo una corriente máxima de operación y utilizando el valor de la resistencia como una interpretación de la temperatura. Kuribayashi [2] en cambio, incorpora un pequeño termopar como sistema de medición de temperatura y permite el paso de una gran corriente cuando la temperatura se encuentra debajo de un límite específico.

En este trabajo se presenta un sistema de control de posicionamiento angular de un mecanismo rotacional en forma de T, cuyo movimiento se ve efectuado a través de la actuación de dos resortes de Nitinol posicionados a cada extremo del mecanismo, en

donde la magnitud de la salida de voltaje que energiza a los resortes se determina en base a un controlador PID, un voltaje de saturación y el valor de la temperatura del elemento.

La medición de la posición angular es llevada a cabo a través un dispositivo MPU-6050, mientras que la medición de temperatura es realizada mediante un par de termistores conectados a un par de amplificadores de instrumentación. El procesamiento de datos es realizado a través del dispositivo myRIO-1900 conectado a una computadora para establecer comunicación dispositivo-usuario, estando todo programado en LabVIEW.

El circuito de potencia instalado para la amplificación de la señal de control fue diseñada por el estudiante, del programa de Ingeniero en Mecatrónica, Jorge Parra López, mientras que el diseño y la construcción del mecanismo en forma de T fue un trabajo en conjunto con el estudiante Luis Fernando Zaid Díaz Mendoza del mismo programa educativo.

Este documento se encuentra dividido en 6 partes. El primer capítulo muestra los antecedentes, haciendo mención de conceptos y términos básicos entorno al comportamiento y funcionamiento de los componentes que integran este proyecto para la comprensión de este documento. El segundo capítulo hace un enfoque al dispositivo MPU6050 indicando los registros, protocolo y conversiones necesarias para obtener la orientación del dispositivo. El capítulo 3 desarrolla la descripción de los componentes, cálculos y pruebas realizadas para la obtención de un circuito capaz de interpretar la temperatura como una señal de voltaje apta para introducirla en el dispositivo myRIO-1900. En el cuarto capítulo se muestran los componentes que integran la planta para la realización de pruebas, así como su respectivo programa básico de operación. En el capítulo 5, se desarrollan los algoritmos de control para 2 series de pruebas integrando un controlador PID, así como una máquina de estados. Adicionalmente se muestran los resultados de las pruebas para determinar los valores de las ganancias de control con mejor desempeño de acuerdo al objetivo de control. En el sexto y último capítulo, se realiza la conclusión del trabajo, realizando una interpretación de los resultados de las pruebas, haciendo mención de posibles mejoras y trabajo posterior referente a este proyecto.

1. Antecedentes

1.1 Aleación con memoria de forma Nickel-Titanio (Nitinol)

Las aleaciones con memoria de forma (SMAs, por sus siglas en inglés) son aquellos materiales que tienen la capacidad de recuperar una forma predeterminada cuando su temperatura es elevada, incluso después de severas deformaciones. La aleación más conocida y estudiada recibe el nombre de Nitinol, el cual es un acrónimo de los materiales que lo componen, Níquel-Titanio y el laboratorio donde este material fue descubierto, "Naval Ordnance Laboratory".

Las aleaciones con memoria de forma pertenecen a una categoría de materiales multifuncionales denominados materiales activos, los cuales exhiben una respuesta mecánica en función de estímulos no mecánicos (magnéticos, ópticos, térmicos, eléctricos, etc.), siendo esta respuesta de una o más órdenes de magnitud mayor en comparación con la respuesta de materiales convencionales. [3]

Este material es polimórfico, de modo que tiene 2 estructuras cristalinas, las cuales determinan el comportamiento del material: martensita y austenita, siendo la primera aquella fase que se forma a bajas temperaturas y austenita aquella que aparece a temperaturas más elevadas. A la transformación entre estas dos fases se le llama transformación martensítica y da lugar a dos importantes propiedades de los SMA: el efecto de memoria de forma y la superelasticidad, también conocida como pseudoelasticidad.

Para comprender el comportamiento de las aleaciones con memoria de forma es necesario conocer los principios microscópicos del material.

Wayman, dentro de su libro "Aspectos ingenieriles de las aleaciones con memoria de forma" [4], explica que, en un nivel atómico las transformaciones de los sólidos se dividen en dos: por difusión y por desplazamiento. Las transformaciones por difusión ocurren cuando átomos realizan movimientos aleatorios a distancias relativamente grandes, rompiendo y reformando enlaces atómicos, formando así una nueva fase con una composición química diferente que la matriz desde la que fue formada. El progreso de

este tipo de transformación depende tanto de la temperatura como del tiempo. En cambio, en una transformación por desplazamiento, los átomos se reordenan formando una estructura química más estable sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Este cambio de fase usualmente depende solo de la temperatura y no de la cantidad de tiempo que el material se encuentra bajo esa temperatura.

Las transformaciones martensíticas son generalmente transformaciones por desplazamiento y de primer orden, lo que significa que liberan calor cuando la martensita es formada, existe una histéresis vinculada a la transformación y existe un rango de temperatura en el cual austenita y martensita coexisten. [4]

El efecto de memoria de forma debe su origen a un fenómeno denominado maclado, el cual es un proceso de acomodación, parte de la transformación martensítica. Este fenómeno ocurre cuando los enlaces atómicos giran en un ángulo, formando una especie de reflejo. Los enlaces pueden rotar con relativa facilidad y mantener su posición una vez rotados. Una vez que el material sea sometido a una temperatura relativamente elevada, este regresará a la fase austenita y debido a que los enlaces atómicos permanecen unidos, el material retomará su forma original. [5]

El maclado es uno de los 2 mecanismos de acomodación de la martensita. El segundo mecanismo es por deslizamiento, el cual es un proceso permanente y común en la mayoría de las martensitas. Al igual que el deslizamiento, el maclado puede acomodar cambios de forma, pero es incapaz de acomodar cambios de volumen, ver Figura 1. [6]

Es importante mencionar que solo existe una cierta cantidad de deformación que los SMA pueden soportar a través del deslizamiento, una vez superado este límite el material se deformará elásticamente y eventualmente se deformará de manera plástica, esta vez, de manera irreversible. Este comportamiento puede ser observado en la Figura 2.

Como se mencionó anteriormente, la transformación martensítica es un proceso dependiente de la temperatura del material. El punto de inicio y fin de la transformación de cada fase se denotan con sus respectivas variables, en donde A_S y A_F determinan las temperaturas de inicio y fin de la transformación de la estructura cristalina a austenita; y M_S y M_F determinan las temperaturas de inicio y fin de la transformación a la fase

martensita. [7] El valor de cada una de las variables depende de distintos factores siendo los principales: el material que lo conforma y el tratamiento térmico al que haya sido sometido.

Cuando una aleación con memoria de forma es calentada desde una estructura martensita maclada, su estructura ira cambiando hasta llegar a la fase austenita, esta transición recibe el nombre de transformación inversa. Al eliminar la fuente de calor, conforme la temperatura vaya disminuyendo, el material comenzará la transformación directa, es decir, iniciará una transición hacia una estructura martensita maclada, siempre que el material se encuentre libre de fuerzas externas. Dichas transformaciones pueden ser observadas en la Figura 3. [3]

Al ejercer una fuerza significativa en un SMA cuando el material tiene una estructura martensítica este sufre una deformación, dando lugar a una estructura martensítica demaclada. Al eliminar la carga, un calentamiento subsecuente del material a una temperatura superior a A_f , dará como resultado una fase de transformación reversible; lo que dará lugar a la recuperación de su forma original. Enfriar el material a una temperatura inferior a M_f generará una transformación directa sin un cambio de forma significativo. Esta transformación de martensita demaclada a austenita recibe el nombre de Efecto de Memoria de Forma. [3] Una representación esquemática del Efecto de Memoria de Forma se muestra en la Figura 4.

La carga mínima aplicada sobre el material para comenzar el proceso de demaclado recibe el nombre de tensión de inicio de demaclado (σ_s), mientras que el nivel de carga para completar la transformación se denomina tensión de finalización de demaclado (σ_f).

A través del esquema de la Figura 5 se puede ver la relación entre la tensión, deformación y temperatura, así como la histéresis en la relación temperatura-deformación del material.

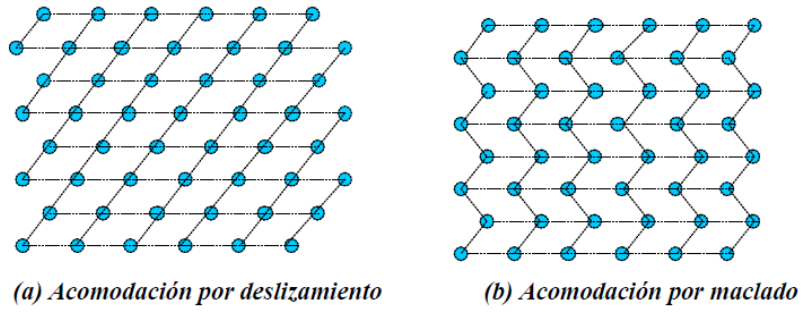


Figura 1 Mecanismos de acomodación. Fuente: [6]

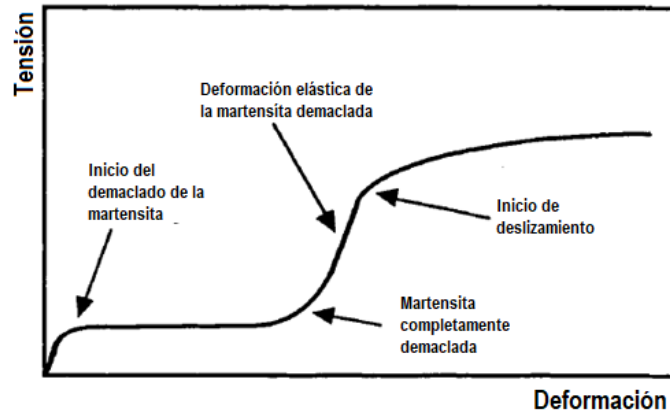


Figura 2 Típica curva tensión-desplazamiento de un material martensítico maclado. Fuente: [4]

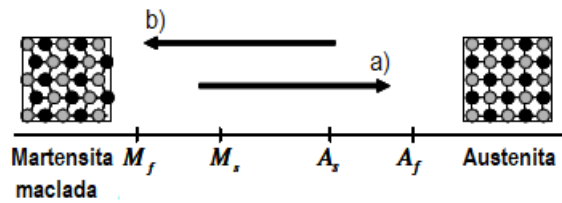


Figura 3 Transformación martensítica: a) Transformación directa, b) Transformación inversa. Fuente: [3]

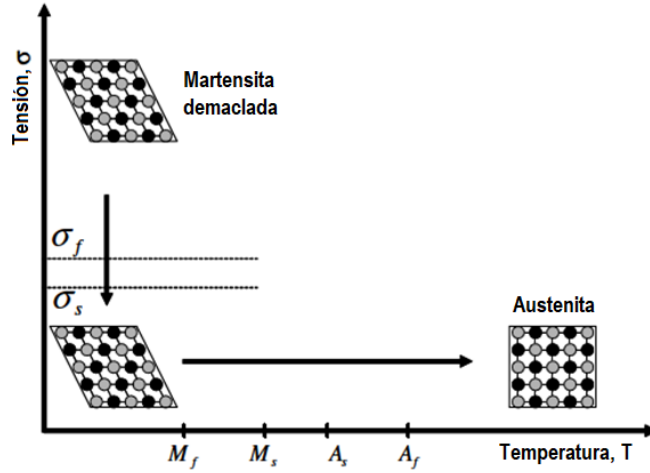


Figura 4 Representación esquemática del efecto de memoria de forma al eliminar la tensión y un subsecuente calentamiento hasta austenita del material bajo cero tensiones. Fuente: [3]

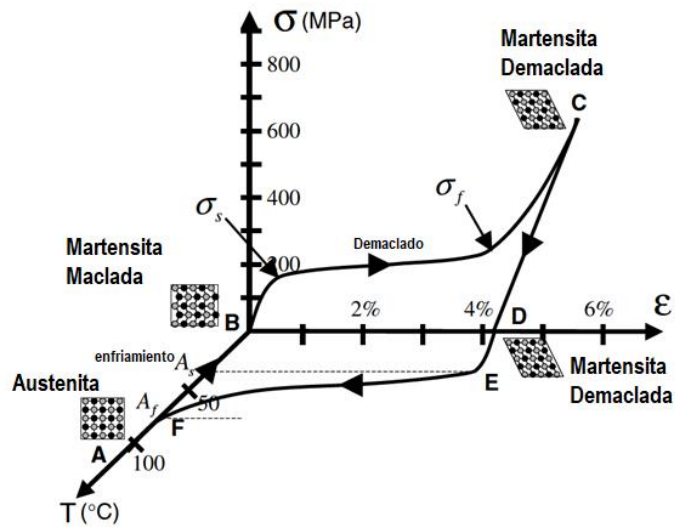


Figura 5 Representación gráfica de tensión-deformación-temperatura del efecto de memoria de forma exhibida por un resorte de NiTi. Fuente: [3]

Es posible realizar una transición desde una fase austenítica hacia una martensítica demaada. Cuando una carga mayor a σ_s es aplicada sobre un material con memoria de forma durante la fase austenítica y posteriormente enfriado manteniendo la carga, el material realizará la transición entre ambas fases sin cruzar por la fase martensítica maada.

Las temperaturas de transición son fuertemente dependientes de la tensión aplicada en el material. Teniendo temperaturas de transición más elevadas conforme la carga (tensión o compresión) aplicada aumenta. En la Figura 6 se ejemplifica las regiones de transformación en el espacio temperatura-tensión. Las variables M_s^σ , M_f^σ , A_s^σ , A_f^σ representan las temperaturas de transformación inducidas.

Hasta este punto solo se ha hablado de la transformación de fase inducida térmicamente, sin embargo, la transformación también puede ser inducida aplicando una carga mayor a σ^{Ms} (tensión para inicio de la fase martensítica) cuando el material se encuentra en la fase Austenítica estable. En la gráfica de la Figura 7 se señalan los puntos de tensión σ^{Ms} , σ^{Mf} , σ^{As} y σ^{Af} los cuales denotan las tensiones de inicio y fin de la fase martensítica, así como las tensiones de inicio y fin de la fase austenítica, respectivamente. Al superar σ^{Mf} se obtiene como resultado martensita demaada, la cual es una forma de martensita inducida por tensión (SIM). El comportamiento descrito en este párrafo recibe el nombre de superelasticidad. [3]

La superelasticidad solo puede suceder para un rango de temperatura comprendido entre A_f y M_d (temperatura crítica mayor a A_f). Para temperaturas superiores a M_d la transformación se dificulta, porque simultáneamente con ella emergen mecanismos de deformación plástica que no permiten que el material recupere su forma en su totalidad, sufriendo de esta manera, una deformación plástica ordinaria. [8]

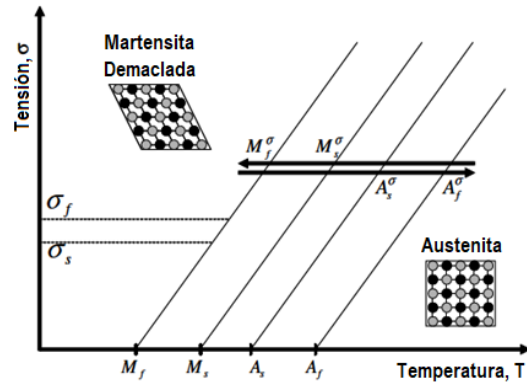


Figura 6 Transformación de fase inducida por la presencia de carga en el material. Fuente: [3]

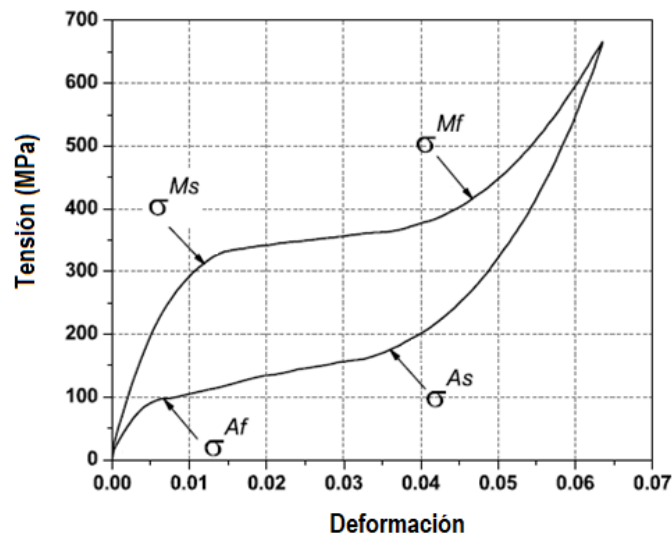


Figura 7 Ciclo de carga pseudoelástico de un SMA común. Fuente: [3]

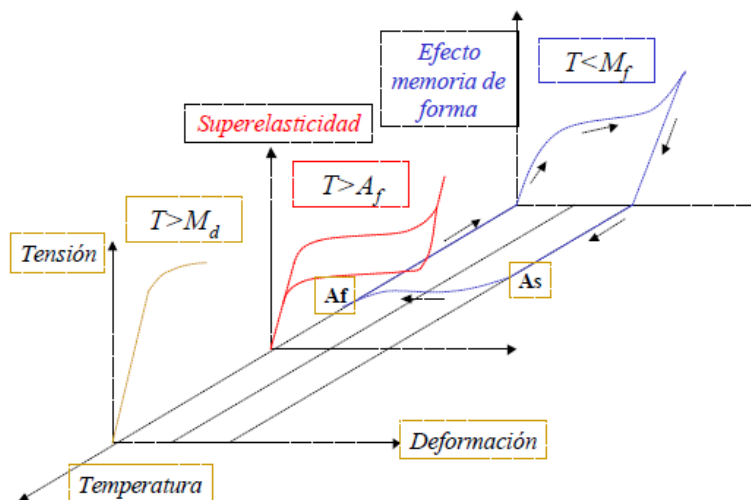


Figura 8 Diagrama tridimensional de tensión-deformación-temperatura, mostrando la deformación y efecto de memoria de forma de una aleación de NiTi deformada por debajo de M_f , por encima de A_f y por encima de M_d . Fuente: [6].

1.2 LabVIEW y plataforma MyRio

1.2.1 Descripción del programa LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación visual desarrollado por la empresa National Instruments. Una de sus principales cualidades es que es adaptable a las necesidades de los usuarios y programadores gracias a la integración de módulos, lo que le permite realizar tareas altamente especializadas a un costo competitivo en el mercado. Un uso común, es la implementación de programas que emulan funciones de instrumentación, añadiendo procesamiento de datos y presentación de resultados. Es una herramienta cuyo mercado meta es la comunidad científica y de ingeniería.

A los programas realizados en LabVIEW se les llama instrumentos virtuales (VI), ya que en un principio se inspiraron en la sustitución de equipo de medición y prueba como osciloscopios, generadores de señales, etc. Un VI se conforma de 2 elementos: el panel frontal y el diagrama de bloques.

El panel frontal, ver Figura 9, es la ventana que contiene la interfaz gráfica del usuario del VI, en otras palabras, en él se agregan todos aquellos elementos que interactúan con el usuario. A estos elementos se les denomina controles e indicadores. Los controles introducen información al programa, mientras que los indicadores presentan los resultados al usuario.

Los controles e indicadores pueden manejar diferentes tipos de datos, como números de punto flotante o enteros, cadenas, lógicos, arreglos, entre otros; y también pueden tener diferentes formas, como perillas, barras, gráficas, tanques, etc.

El diagrama de bloques, ver Figura 10, es la ventana que contiene el código del instrumento virtual, el cual se ve conformado por elementos gráficos denominados terminales, nodos y estructuras. Las terminales representan las entradas y salidas del diagrama de bloques, equivalentes a su respectivo control o indicador en el panel frontal. Los nodos, elementos análogos a instrucciones, operaciones y funciones en programación de texto, son utilizados por el programador para determinar las actividades del programa. Por último, las estructuras, elementos provistos por LabVIEW, establecen bucles y condicionales en el código.

Las terminales y los nodos se comunican entre sí a través de cables, los cuales transfieren datos de un elemento a otro. Para definir el orden de ejecución del programa, se utiliza un modelo de flujo de datos. En este modelo, los nodos del programa se ejecutan una vez que reciben todos los datos necesarios. Terminada la ejecución del nodo, este arroja el resultado de la operación, que viajará al siguiente nodo o terminal para continuar con el ciclo. Una de las ventajas de este modelo, es que permite la ejecución de operaciones simultáneas.

Dentro del entorno de programación de LabVIEW existen elementos denominados variables locales y globales, los cuales son utilizados para acceder indirectamente a terminales, con el objetivo de leer o escribir valores. Una variable local se utiliza para compartir datos entre secciones del diagrama de bloques, mientras que una variable global comparte datos entre instrumentos virtuales.

LabVIEW es capaz de ser flexible ante las necesidades especializadas del usuario gracias a los módulos. Con el objetivo de facilitar la comprensión, en esta sección se dividirán los módulos en 2 categorías: módulos de software y módulos de hardware.

Los módulos de software son complementos que proveen al programa la habilidad de integrar nuevas herramientas o capacidades para realizar tareas determinadas. Algunos ejemplos son:

Módulo de Control Design and Simulation: Permite al usuario diseñar sistemas dinámicos e implementar sistemas de control.

Módulo LabVIEW Real-Time: Permite diseñar y ejecutar programas en tiempo real en dispositivos embebidos.

Módulo LabVIEW Mathscript: Permite ingresar e implementar código matemático de texto al programa.

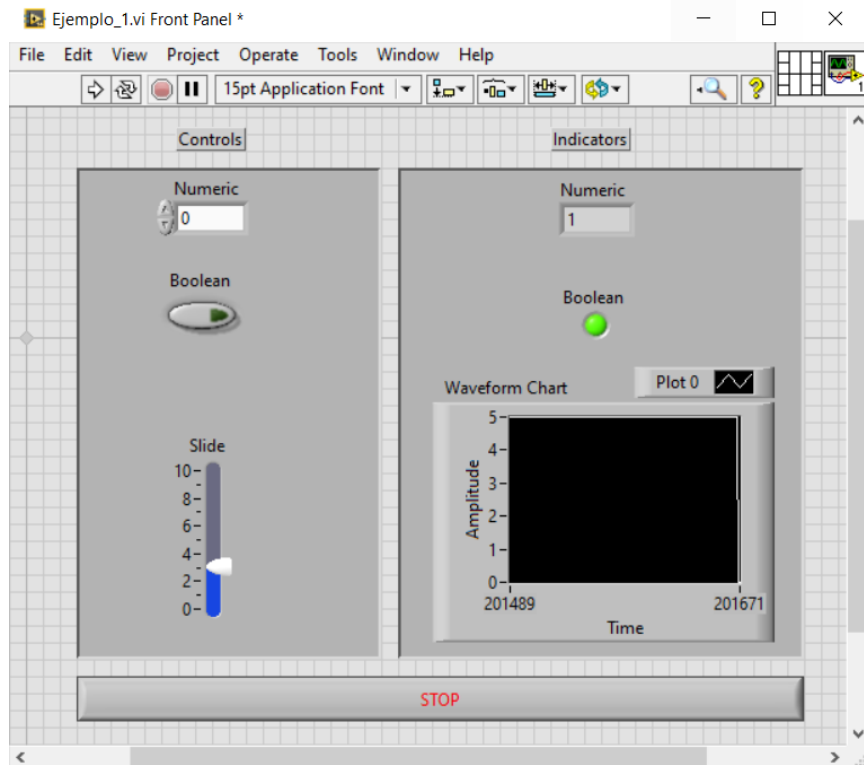


Figura 9 Ejemplo de panel frontal de un instrumento virtual.

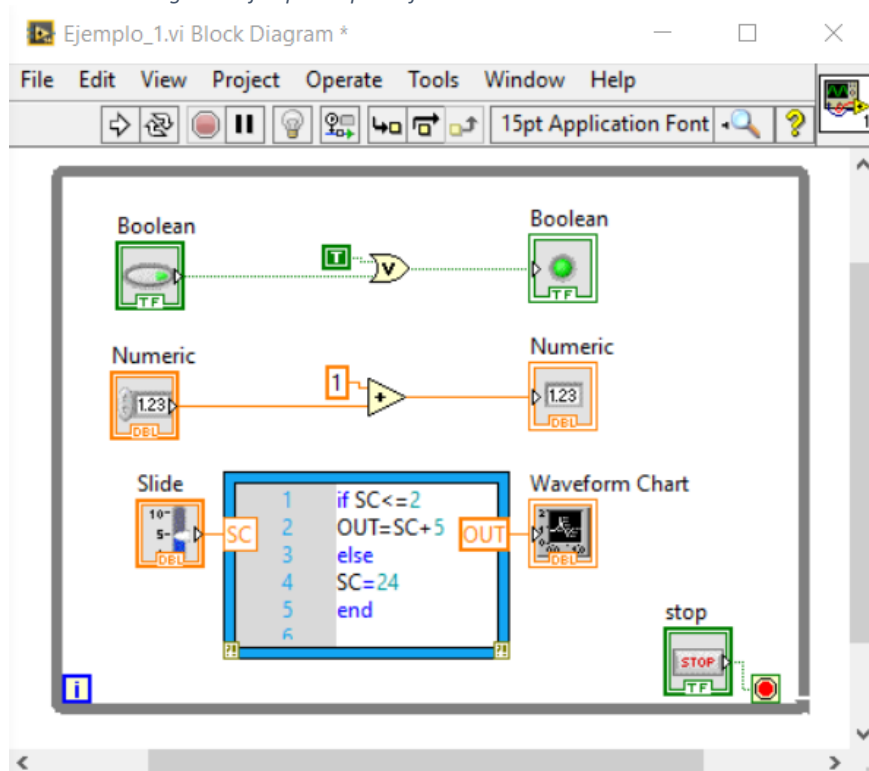


Figura 10 Ejemplo de diagrama de bloque de un instrumento virtual.

Los módulos de hardware son complementos para el control y la adquisición de datos. Estos módulos son equipo físico, diseñado por la empresa National Instruments, que permiten al programa adquirir y enviar datos de o hacia un sistema o equipo. Algunos ejemplos son:

CompaqRIO: Plataforma que permite la incorporación de módulos, los cuales, según el modelo, tienen la capacidad de adquirir y enviar señales de voltaje, corriente, temperatura, fuerza, entre otros.

NI myRIO-1900: Dispositivo portable de entradas y salidas configurables, con procesador y FPGA integrado.

1.2.2 Plataforma myRIO-1900

El contenido de esta sección se basa principalmente en el manual de usuario y especificaciones de NI myRIO-1900. [9]

NI myRIO-1900, ver Figura 11, es un dispositivo diseñado por la empresa National Instruments. Esta unidad se encuentra integrada por un acelerómetro, botones, LEDs, conexión WI-FI y USB, un procesador FPGA y un procesador ARM Cortex-A9. En los costados cuenta con 3 Puertos, denominados A, B y C, en los cuales se encuentran ubicadas las entradas y salidas analógicas y digitales. Ver Figura 12.

Cada puerto A y B, posee un set de 4 canales de entrada y 2 canales de salida, todos analógicos de 0-5V, con una precisión absoluta de $\pm 50\text{mV}$. En el puerto C, se tienen 2 canales de entrada diferencial de alta impedancia y otros 2 canales de salida. Estos 4 canales son analógicos, con un límite de voltaje de $\pm 10\text{V}$ y una precisión absoluta de $\pm 200\text{mV}$.

La resolución de cada puerto (A, B y C) es de 12 bits, con una frecuencia de muestreo de 500k muestras por segundo para entradas analógicas, y de 345k muestras por segundo para salidas analógicas.

Las entradas analógicas se ven multiplexadas por un solo convertidor analógico-digital, como se muestra en el esquema de la Figura 13. En lo que respecta a los canales de salida analógica, estos tienen un convertidor dedicado analógico-digital para realizar actualizaciones simultáneas. Los convertidores son controlados por 2 buses de

comunicación serial del FPGA. Los conectores A y B comparten un bus, mientras que el conector C y el audio comparten el otro. Ver Figura 14.

Para señales digitales, este dispositivo posee 16 canales con una resistencia pull-up, por cada puerto A y B. De la línea 0 a la 13, esta resistencia tiene un valor de 40kΩ, mientras que en las líneas 14 y 15 el valor de la resistencia es de 2.1kΩ. En el puerto C hay 8 líneas para señales digitales con una resistencia pull-down de 40kΩ a tierra. Todas las señales digitales utilizan como referencia el puerto DGNG. Ver Figura 15.

Las líneas E/S digitales del myRio-1900 son programáticamente configurables y manejan un voltaje de 3.3V. Todas pueden actuar como canales de entrada o salida. Adicionalmente, pueden ser configuradas como líneas SPI, I²C, PWM o entrada de encoder. La interpretación lógica de los valores de entrada y salida se muestran en la Tabla 1.

	<i>Voltaje de entrada bajo</i>	<i>Voltaje de entrada alto</i>	<i>Voltaje de salida alto</i>	<i>Voltaje de salida bajo</i>
<i>Rango de voltajes</i>	0V-0.8V	2V-5.25V	2.4V-3.465V	0V-0.4V

Tabla 1 Interpretación lógica de los valores de entrada y salida de los canales digitales.

MyRio-1900 reserva ciertos canales para funcionar como fuentes de voltaje constante. Estas fuentes, según su ubicación, pueden proveer tensiones de 3.3V, 5V y +/-15V. En la Tabla 2, se muestran algunas especificaciones de estas fuentes. Para mayor información consultar el manual del dispositivo.

	<i>+15V</i>	<i>-15V</i>	<i>+5V</i>	<i>+3.3V</i>
<i>Rango de voltaje de salida</i>	15 a 16V	-15V a -16V	4.75V a 5.25V	3V a 3.6V
<i>Corriente máxima por conector</i>	32mA	32mA	100mA	150mA

Tabla 2 Especificaciones de las fuentes de voltaje constante del myRio-1900.



Figura 11 Dispositivo myRio-1900

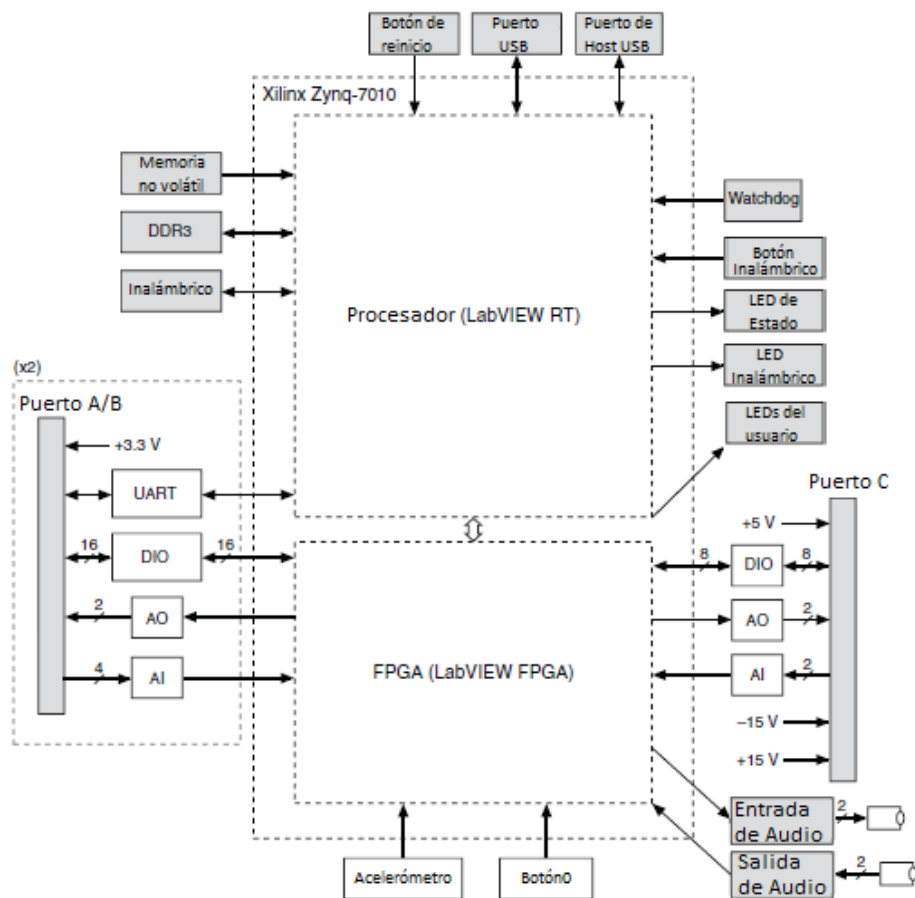


Figura 12 Diagrama de la estructura interna del myRio-1900. Fuente: [9]

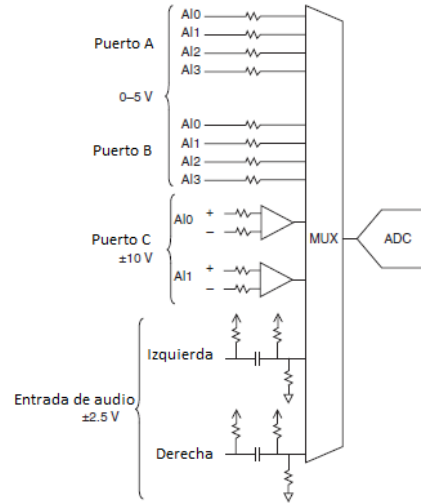


Figura 13 Esquema de la configuración interna de los canales de entrada analógica de la plataforma myRIO-1900. Fuente: [9]

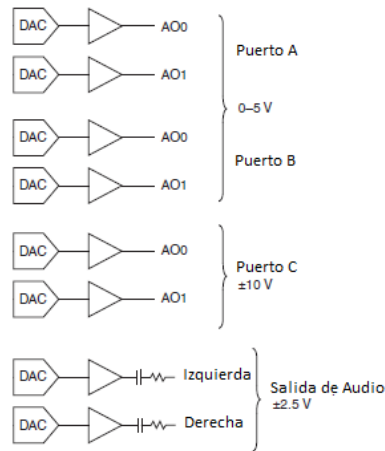


Figura 14 Esquema de la configuración interna de los canales de salida analógica de la plataforma myRIO-1900. Fuente: [9]

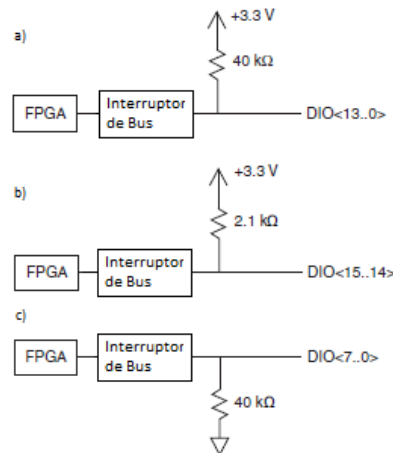


Figura 15 Esquema de la configuración interna de los canales E/S digitales. a) Líneas 0 a la 13 de los puertos A y B. b) Líneas 14 y 15 de los Puertos A y B c) Líneas 0 a la 18 del Puerto C. Fuente: [9]

1.2.3 Aplicaciones en tiempo Real

Un sistema tiene una respuesta en tiempo real cuando tiene la capacidad de ejecutar una tarea dentro de una ventana de tiempo determinada. Dentro del entorno de LabVIEW, se introduce el módulo “LabVIEW Real-Time” para proveer al programa la capacidad de realizar tareas de una manera determinística.

Para la comprensión de este tema se tendrán en cuenta 2 sistemas operativos: el sistema operativo de propósito general y el sistema operativo a tiempo real.

El primer sistema es aquel en el que el tiempo del procesador es compartido por diversos programas, por lo que no puede dar una alta prioridad a la ejecución de VIs y garantizar determinismo. Es comúnmente utilizado para la presentación y análisis de datos fuera de línea y la adquisición de datos en determinadas circunstancias. En cambio, en un sistema operativo a tiempo real, las tareas con una alta prioridad son ejecutadas primero y funciona con una mayor fiabilidad. Es importante señalar que los sistemas a tiempo real no requieren de periféricos a su entrada. Este tipo de sistema es mejor para operaciones a lazo cerrado, donde el tiempo de ejecución es crítico, se requiere fiabilidad y operará en largos periodos de tiempo. [10]

La arquitectura de una aplicación en tiempo real se compone de 2 programas: el programa base y el programa objetivo. El programa base es aquel que se ejecuta dentro de la computadora personal o laptop y contiene la interfaz de usuario, su tarea es establecer comunicación entre el usuario y el programa objetivo. El programa objetivo se encarga principalmente de ejecutar todos aquellos procesos determinísticos de alta prioridad y se ejecuta en la tarjeta myRIO. Ver Figura 16.

A través de este trabajo se realizarán aplicaciones a tiempo real para la realización de pruebas. La comunicación entre el programa base y el objetivo se realizará a través de variables globales.

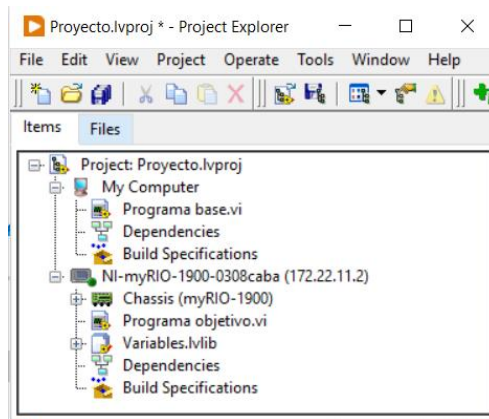


Figura 16 Ventana de un proyecto.

1.3 Controladores PID

Un sistema de control es un conjunto de componentes que interactúan entre sí a través de señales para lograr un objetivo, proporcionando una respuesta deseada. En términos generales, estos sistemas pueden ser divididos en sistemas de lazo cerrado y sistemas de lazo abierto.

Los sistemas de control a lazo cerrado introducen al controlador la señal de error, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación, con el objetivo de que la salida sea igual al valor de referencia. En cambio, en los sistemas de control de lazo abierto, no existe una señal de retroalimentación ni una medición de la salida. A cada entrada de referencia le corresponde una tarea fija, por lo que la precisión del sistema depende de la calibración de este. [11]

Antes de continuar es importante definir algunos conceptos. Denominamos planta a aquel objeto físico que se va a controlar en base a la señal de control, siendo esta señal aquella variable que el controlador modifica para llegar al objetivo de control. Un sistema puede o no tener perturbaciones, las cuales son señales de entrada no controladas que generan efectos no deseados en la planta. Las perturbaciones pueden ser internas, si se generan dentro de la planta, o pueden ser externas si se generan fuera de ella.

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que la retroalimentación los vuelve más insensibles a las perturbaciones internas o externas, así como a las variaciones de los parámetros del sistema. Para los sistemas en donde se conocen con anticipación las perturbaciones, es posible utilizar un sistema de control en lazo abierto. Adicionalmente,

debido a la simplicidad del sistema de lazo abierto, la construcción y mantenimiento suele ser más sencillo, trabajando a costos y potencias más bajas. [11]

En la Figura 17 se muestra el diagrama de bloques de un sistema a lazo abierto, en donde la referencia ref entra al controlador, dando como resultado una señal de control u a la salida del bloque, controlando así el valor de la salida y de la planta. La Figura 18 contiene el diagrama de bloques del sistema de control en lazo cerrado, en donde adicionalmente, se efectúa una resta entre el valor de la referencia ref y salida de la planta y , dando lugar a una retroalimentación de la señal.

Los modelos matemáticos son una parte importante en la implementación de sistemas de control, estos representan la relación entre la entrada y salida del sistema a través de expresiones matemáticas, las cuales se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan el sistema. Este modelo debe de ser tanto simple como preciso, tratando de mantener un equilibrio entre ambos factores de tal forma que permita resolver el problema de control de la manera más simple posible. Para lograr esto, en ciertas ocasiones es necesario ignorar algunas propiedades del sistema para mantener un modelo simple y funcional de acuerdo a los objetivos de control.

Las funciones de transferencia son comúnmente utilizadas para describir la relación entre la entrada y la salida de los elementos que componen el sistema, definidas como ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo. La función de transferencia se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida, función de respuesta, y la transformada de Laplace de entrada, función de excitación, bajo el supuesto de que todas las condiciones iniciales son cero. [11]

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\mathcal{L}[salida]}{\mathcal{L}[entrada]} \Big|_{\text{condiciones iniciales cero}} \quad (1)$$

En un sistema de control, los diagramas de bloques son usados para describir la función de los diferentes componentes del sistema, indicando la relación que existe entre las señales de entrada y salida de los componentes o del sistema en general. Cada bloque representa la operación matemática que se realiza sobre la señal de entrada para producir la salida. Cada bloque es conectado mediante flechas para indicar la dirección de flujo de las señales. [11]

En el diagrama de la Figura 19 se muestran 3 operaciones básicas de los diagramas de bloques: Punto suma, Punto resta y Ganancia.

En el diagrama de bloques de la Figura 20 se muestra un sistema de control en lazo cerrado con retroalimentación negativa, basado en un control Proporcional-Integral-Derivativo (PID). En el sistema, la referencia $Ref(s)$ se resta con la salida de la planta para dar como resultado el error, el cual entra a cada uno de los bloques del controlador PID obteniendo a la salida del punto de suma, el valor de la señal de control $u(s)$. La señal $u(s)$ es introducida a la planta, multiplicando matemáticamente el valor de la señal de control $u(s)$ por la transformada de Laplace de la planta $F(s)$, obteniendo como resultado una salida $y(s)$, la cual retroalimentará al sistema.

Podemos decir que tenemos un sistema estable si al excitarlo con una entrada acotada tiene una respuesta acotada a medida que el tiempo tiende a infinito, caso contrario, si la entrada acotada produce una salida que tiende a infinito a medida que el tiempo tiende a infinito, tenemos un sistema inestable. [12]

Desde el punto de vista de la estabilidad, los sistemas de control a lazo cerrado son más difíciles de desarrollar ya que pueden corregir en exceso los errores, lo que puede producir grandes oscilaciones o incluso inestabilizar el sistema. [11] Esto se puede presentar debido a tiempos de retardo entre el cambio en la variable y la señal de retroalimentación; a diferencia de los sistemas de control de lazo abierto, en donde no existe retroalimentación, por lo que la estabilidad del sistema no es un problema si los sistemas en forma independiente son estables.

Para un sistema lineal, la estabilidad se puede definir en términos de polos y ceros, en donde los polos representan las raíces del denominador de la función de transferencia y los ceros las raíces del numerador de la función de transferencia. Los polos o ceros pueden tener valores reales o complejos.

Los polos y ceros de una función de transferencia se pueden representar en un diagrama patrón de polos y ceros. En donde los polos serán representados por una cruz (x) y los ceros por un círculo (o). El eje de las abscisas representará la parte compleja del valor del polo o cero y el eje de ordenadas la parte real.

Tomando en consideración el patrón de polos y ceros, el criterio de la estabilidad dice que el sistema es estable si todos sus polos se encuentran estrictamente en el semiplano izquierdo del plano complejo (Figura 21-a); el sistema será inestable si al menos un polo se encuentra en el semiplano derecho del plano complejo (Figura 21-b); y marginalmente estable, si algunos polos están en el eje imaginario y el resto se encuentra en el semiplano izquierdo del plano complejo (Figura 21-c).

En un sistema a lazo cerrado, el controlador produce una salida que se convierte en la entrada del elemento correctivo. La relación entre la salida y la entrada del controlador con frecuencia se denomina ley de control. Existen tres formas básicas de dicha ley: proporcional, integral y derivativo. [12] Sin embargo en el entorno de control existen muchas otras más.

En el controlador proporcional la señal de salida (U) es directamente proporcional a la señal de error (e), la cual es una función del tiempo, teniendo por ecuación:

$$U(t) = K_p e(t) \quad (2)$$

donde K_p es la constante de ganancia proporcional, por lo tanto, el controlador funcionará como un amplificador con ganancia ajustable. [12] Como se muestra en la Figura 22 a), siendo su función de transferencia en términos de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (3)$$

En el controlador integral la salida (U) será proporcional a la integral de la señal de error (e) con el tiempo, es decir:

$$U(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4)$$

Donde K_i es la constante de ganancia integral, por lo tanto, para una entrada escalón, la integral será el área bajo la curva desde 0 a t , por lo que la salida del controlador será proporcional a la acumulación de errores pasados. Siendo su función de transferencia en términos de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

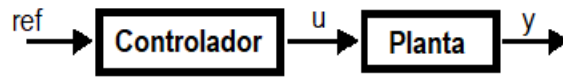


Figura 17 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo abierto.

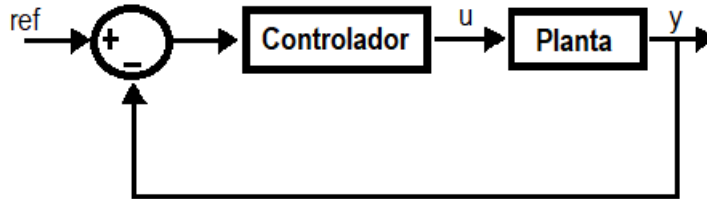


Figura 18 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.

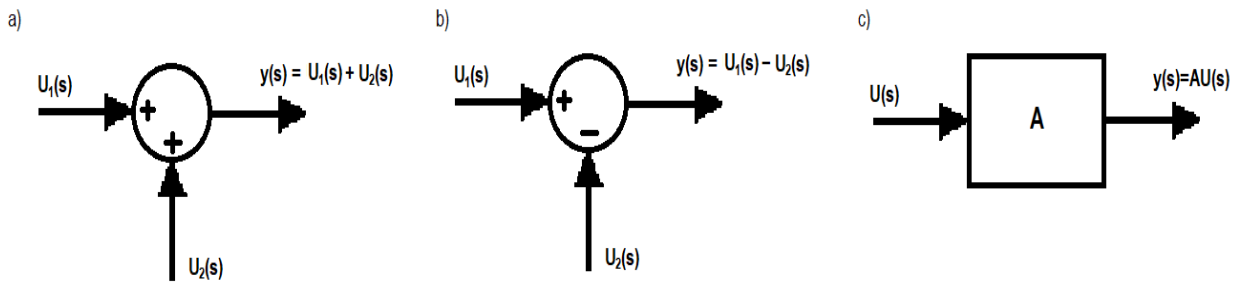


Figura 19 Diagrama de bloques de operaciones básicas. a) Punto suma b) Punto resta c) Ganancia A.

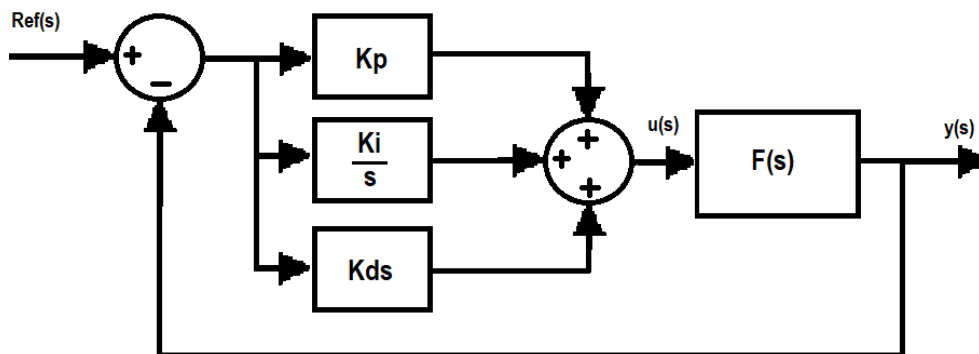


Figura 20 Diagrama de bloques de un sistema de control lazo cerrado basado en un controlador PID.

Una ventaja de este controlador es que tiene la capacidad de eliminar el error en estado estable, el cual se define como la diferencia entre la salida de la planta y la referencia después de transcurrir el estado transitorio del sistema; sin embargo, el controlador tiene la desventaja de introducir el término $(s - 0)$ en el denominador de la función de transferencia, lo que significa que habrá un polo en el origen, haciendo que la estabilidad del sistema en lazo cerrado se ponga en riesgo. [12]

La Figura 22 b) muestra la relación entre una entrada escalón como error (e) y la respuesta a la salida de control (u) para un controlador integral.

En el controlador proporcional-integral se reduce la inestabilidad del sistema, así como el error en estado estable, teniendo como salida:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (6)$$

En donde su función de transferencia se ve representada por la siguiente ecuación:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (7)$$

En el gráfico de la Figura 22 d) se muestra la respuesta del controlador a una entrada escalón como señal de error.

La salida de un controlador derivativo es proporcional a la razón de cambio con el tiempo del error (e), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$U(t) = K_d \frac{de}{dt} \quad (8)$$

donde K_d es la constante de ganancia derivativa. Su función de transferencia se ve representada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (9)$$

En la Figura 22 inciso c, se muestra la respuesta del controlador en función de una entrada tipo escalón. El controlador derivativo anticipa el efecto del controlador proporcional aumentando la velocidad de respuesta del sistema después de una perturbación. Es importante mencionar que este controlador, suele estar acompañado de otro controlador, ya sea proporcional o proporcional-integral debido a que tan pronto como la señal de error inicia, puede existir una salida de control muy grande, ya que es proporcional a la razón de cambio de la señal de error y no a su valor, además de ser un controlador insensible a señales de error constantes o que varían con lentitud. [12]

El controlador proporcional-derivativo se define de la siguiente manera:

$$U(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

Siendo su función de transferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s \quad (11)$$

Debido a que solo se introduce un cero al sistema, no habrá cambios en el mismo ni en la corrección del error en estado estable.

Como su nombre lo indica, el control proporcional-integral-derivativo (PID) combina las 3 acciones de control aportando al sistema cada una de las ventajas individuales de cada control, por lo tanto, la ecuación se muestra de la siguiente manera:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

Teniendo por función de transferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (13)$$

Es importante mencionar que existen muchas otras técnicas de control en adición a los controladores PID; sin embargo, para efectos de este trabajo solo se tomarán en cuenta estos últimos.

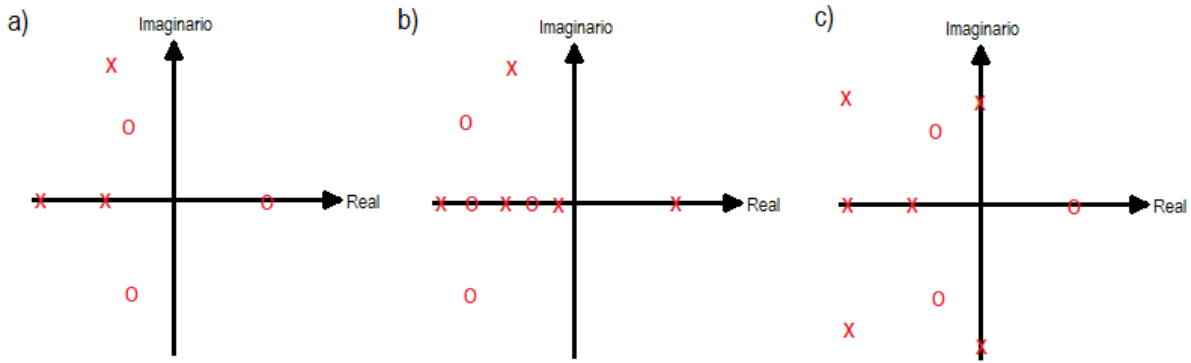


Figura 21 Patrón de polos y ceros de un sistema: a) Estable b) Inestable c) Marginalmente estable.

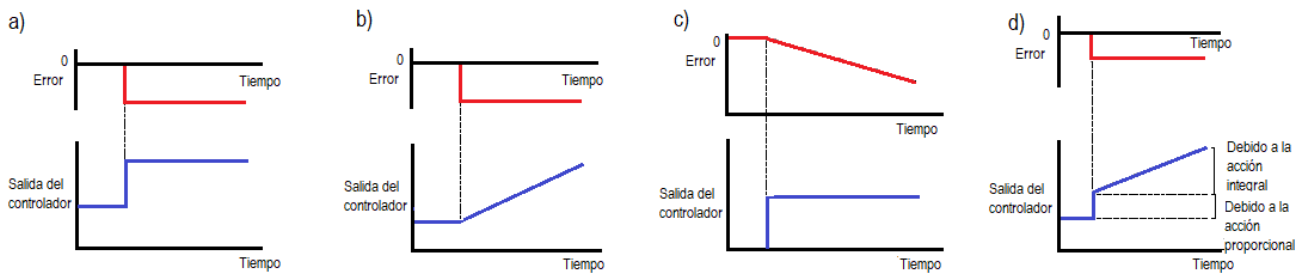


Figura 22 Respuesta de un controlador: a) proporcional ante una entrada escalón b) Integral ante una entrada escalón c) Derivativo ante una entrada rampa d) proporcional integral ante una entrada escalón. Fuente: [12]

1.4 Matrices de rotación y ángulos de Euler

Los sistemas de coordenadas son utilizados como sistemas de referencia en términos de posición y orientación de un objeto en el espacio. De manera analítica, la posición de dicho objeto en términos de coordenadas será siempre relativo a un punto o plano de referencia, modificando el valor de las coordenadas al cambiar la referencia.

En la Figura 23 se muestran 2 marcos de coordenadas. En el libro “Robot Modeling and Control” (por su título en inglés) [13] el autor explica que para poder definir las coordenadas del punto P de la figura, es necesario primero definir el marco de referencia, el cual puede ser tanto el marco $o_0x_0y_0$ como el marco $o_1x_1y_1$. En el primer caso, se establecen las coordenadas $(5,6)^T$, y en el segundo caso $(-2.8,4.2)^T$. Para identificar el marco de referencia se utiliza una anotación en el superíndice de la variable, como sigue:

$$p^0 = \begin{bmatrix} 5 \\ 6 \end{bmatrix}, p^1 = \begin{bmatrix} -2.8 \\ 4.2 \end{bmatrix}$$

Es importante mencionar que tanto p^0 como p^1 son vectores de coordenadas que representan la ubicación en el espacio de un punto en base a sus respectivos planos.

Es posible representar un punto en el espacio respecto a distintos sistemas de coordenadas, sin embargo, si se desea hacer un análisis u operaciones algebraicas con diferentes vectores de coordenadas es necesario que todos tengan el mismo marco de referencia en términos de posición y orientación.

En esta sección se definirá la orientación de un marco de referencia respecto a otro a través de la matriz de rotación.

Una matriz de rotación representa la rotación de un marco de referencia respecto a otro.

Observando la Figura 24, en un plano bidimensional, al girar el marco de referencia $o_0x_0y_0$ en un ángulo θ se obtiene un nuevo plano $o_1x_1y_1$, cuya matriz de rotación se compone de dos vectores x_1^0 y y_1^0 . Ambos vectores x_1^0 y y_1^0 representan las nuevas coordenadas obtenidas mediante razones trigonométricas, como se muestra a continuación:

$$R_1^0 = [x_1^0][y_1^0]$$

Donde:

$$x_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$y_1^0 = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}$$

Lo que da como resultado la siguiente matriz de rotación R_1^0 :

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Para un plano tridimensional la dinámica es similar al plano bidimensional; se utilizan vectores de coordenadas para determinar la rotación de los ejes, sin embargo, 3 variables ϕ , θ y ψ son usadas para representar el ángulo de rotación al girar en cada eje x , y , z , respectivamente.

Por cuestiones de simplicidad, para planos tridimensionales, el eje de rotación de la variable que denota la matriz se coloca como un subíndice; mientras que la letra que representa el ángulo de rotación se escribe dentro de un paréntesis, representando así las matrices $R_x(\phi), R_y(\theta), R_z(\psi)$.

Partiendo de la Figura 25, los valores de las matrices $R_x(\phi), R_y(\theta), R_z(\psi)$ son obtenidos mediante razones trigonométricas, en donde:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Siendo:

- $R_x(\phi)$ la rotación de ϕ grados del marco de referencia en el eje x . Ver Figura 25 a).
- $R_y(\theta)$ la rotación de θ grados del marco de referencia en el eje y . Ver Figura 25 b).
- $R_z(\psi)$ la rotación de ψ grados del marco de referencia en el eje z . Ver Figura 25 c).

A estas 3 matrices $R_x(\phi), R_y(\theta), R_z(\psi)$, se les denomina matrices fundamentales.

Existen ocasiones en que el plano de referencia del objeto de estudio presenta rotaciones en más de un eje, para tales casos la matriz de rotación resultante es el producto de la matriz de rotación de un eje y otro eje, por ejemplo:

Suponga que la orientación actual de un avión es el resultado de la rotación del plano en ϕ grados alrededor del eje x , seguida de una rotación de θ grados en el eje y , y una rotación final en el eje z de ψ grados. La matriz resultante estaría dada por:

$$R_{xyz} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \phi \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Es importante mencionar que el orden de la multiplicación de las matrices debe de seguir la secuencia de ejecución de las rotaciones; esto, debido a que la rotación a diferencia de la posición, no es un vector de cantidad. [13]

Aunque comúnmente las matrices de rotación son utilizadas en términos de dos o tres dimensiones, es posible definir una matriz de rotación en más dimensiones.

Los ángulos de Euler describen la orientación de un marco de referencia móvil con respecto a un marco de referencia fijo, teniendo cada sistema ejes ortogonales. Los ángulos de Euler son 3 ángulos ϕ , θ y ψ que representan la rotación en cada eje x , y , z , respectivamente. Convencionalmente el orden de rotación en cada eje es XYZ, como en el ejemplo anterior; sin embargo, es posible manejar hasta 12 diferentes secuencias de rotación en los ejes.

En términos generales, podemos dividir los ángulos de Euler en dos grupos:

- Ángulos Propios de Euler: XYX, XZX, YXY, YZY, ZXZ, ZYZ.
- Ángulos de Tait-Bryan: XYZ, XZY, YXZ, YZX, ZXY, ZYX.

En los ángulos de Tait-Bryan, también denominados ángulos de cardán, se denomina a cada rotación x , y , z como “roll”, “pitch” y “yaw”, por sus siglas en inglés. El movimiento de estos ángulos toma como referencia el movimiento del dispositivo de cardán. El cardán consiste en 3 anillos concéntricos que rotan sobre un eje en particular, de tal manera en que 2 anillos adyacentes forman un ángulo perpendicular entre ellos, como

se puede observar en la Figura 26 a). Hablamos de un bloqueo de cardán cuando dos de los 3 anillos de cardán se alinean perdiendo el mecanismo uno de los tres grados de libertad. Ver Figura 26 b). [14] En lo referente a los ángulos de Tait-Bryan el fenómeno es similar, cuando 2 de los 3 ejes del marco de referencia se alinean, dan como resultado un marco de referencia que se mueve en 2 dimensiones.

A continuación, se desarrolla la matriz de rotación de cada una de las 6 secuencias Tait-Bryan:

$$R_{xyz} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \phi \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_{xzy} = R_x(\theta)R_z(\phi)R_y(\psi)$$

$$R_{xzy} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_{xzy} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \psi & -\sin \theta \cos \psi \\ -\cos \phi \cos \theta \sin \psi + \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ \sin \phi \cos \theta \sin \psi + \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta + \sin \phi \sin \theta \sin \psi \end{bmatrix}$$

$$R_{yxz} = R_y(\phi)R_x(\theta)R_z(\psi)$$

$$R_{yxz} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{yxz} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \theta \\ -\cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \\ \sin \phi \cos \theta \sin \psi + \sin \theta \cos \psi & -\sin \phi \cos \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_{yzx} = R_y(\phi)R_z(\psi)R_x(\theta)$$

$$R_{yzx} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$R_{yzx} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \psi \cos \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \theta & \sin \phi \cos \theta \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \\ -\sin \psi & \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \psi \\ \sin \theta \cos \psi & -\sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \theta + \sin \phi \sin \theta \sin \psi \end{bmatrix}$$

$$R_{zxy} = R_z(\phi)R_x(\theta)R_y(\psi)$$

$$R_{zxy} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_{zxy} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \cos \theta \sin \psi - \sin \theta \cos \psi \\ -\cos \theta \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \psi \\ \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_{zyx} = R_z(\phi)R_y(\psi)R_x(\theta)$$

$$R_{zyx} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$R_{zyx} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ -\cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ \sin \theta & -\sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

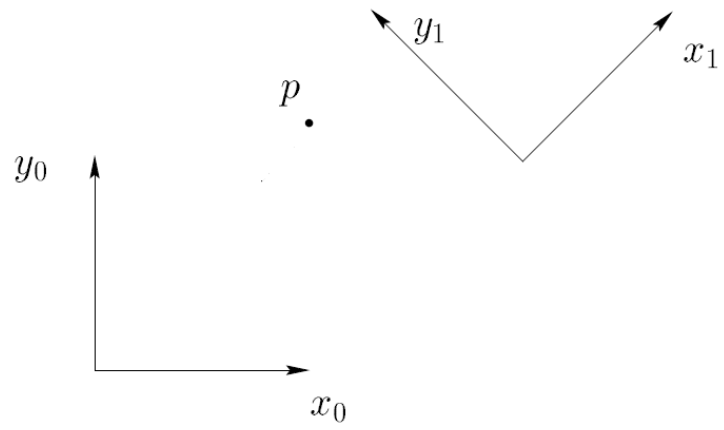


Figura 23 Dos marcos de referencia de 2 dimensiones y un punto P . Fuente: [13]

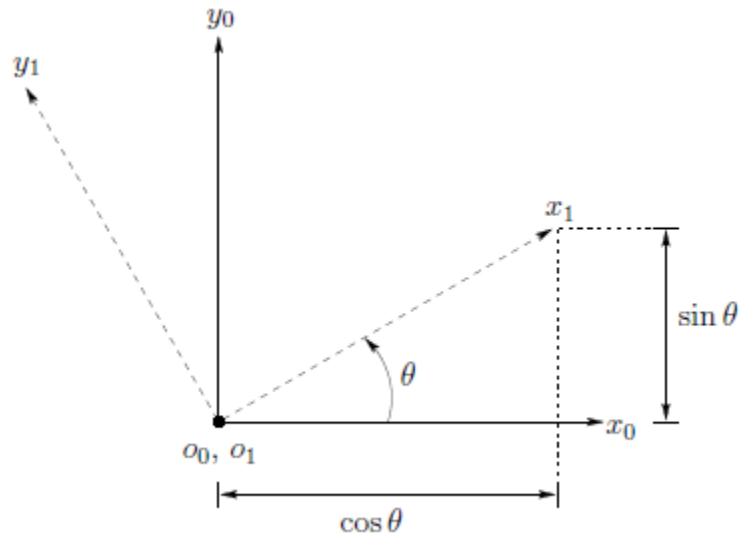


Figura 24 Marco de referencia $o_1x_1y_1$ rotado θ grados con respecto al marco de referencia $o_0x_0y_0$. Fuente: [13]

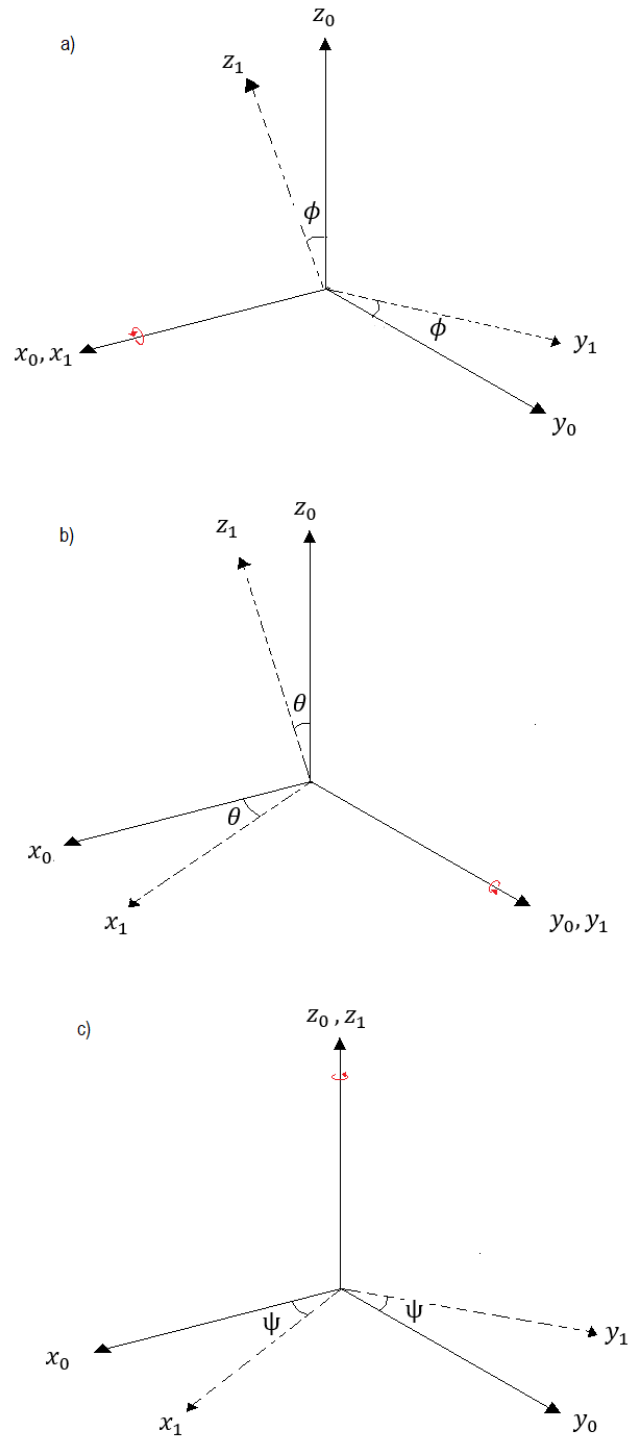


Figura 25 a) Marco de referencia $x_1y_1z_1$ rotado Φ grados sobre el eje x . b) Marco de referencia $x_1y_1z_1$ rotado θ grados sobre el eje y . c) Marco de referencia $x_1y_1z_1$ rotado ψ grados sobre el eje z .

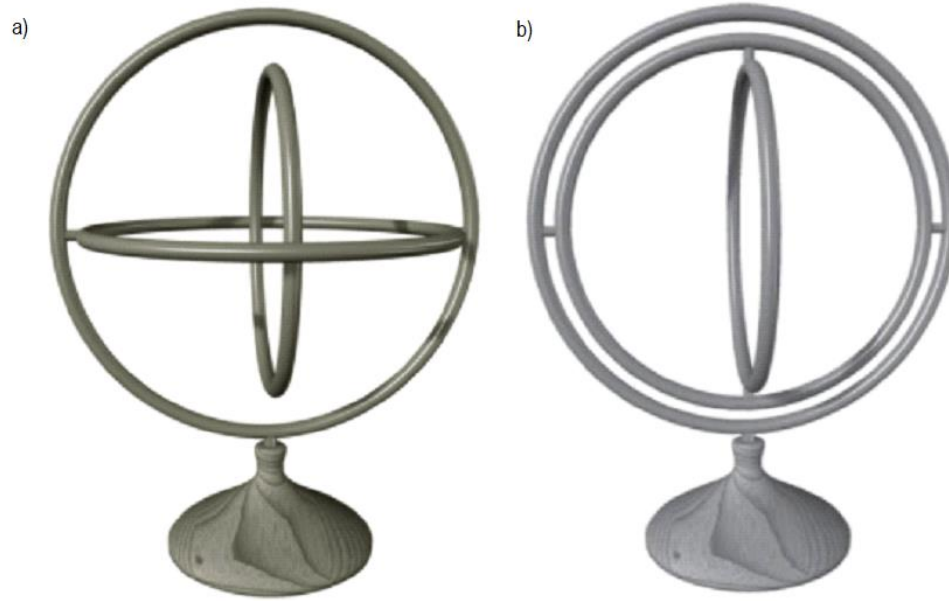


Figura 26 a) Mecanismo de cardán en su estado inicial. b) Bloqueo de cardán. Fuente: [14]

2. Puesta en operación del sensor MPU-6050

2.1 Descripción del sensor

El módulo GY-521, ver Figura 27, es una placa genérica, comúnmente conocida como “breakout board”, utilizada como base para acceder al dispositivo MPU-6050. Generalmente se emplea como periférico en tareas de diseño y pruebas. En la región izquierda de la placa se encuentran las terminales de alimentación, entrada y salida del módulo, mientras que en la derecha se encuentra instalado el circuito de operación.

Este módulo integra, en adición al circuito de operación básico, un módulo regulador de voltaje en placa de 3.3V, para admitir entradas de voltaje de 5V; un par de resistencias pull-up en los pines SCL y SDA, para una conexión directa a un dispositivo; y una resistencia en el pin ADO conectada directamente a tierra. El objetivo de esta última es establecer una dirección por defecto en 0x68 cuando la terminal permanezca al aire.

El contenido de esta sección se basa principalmente en los manuales del MPU-6050 de InvenSense [15] [16]. En este apartado solo se describen las funciones, registros y configuraciones del MPU-6050 que se utilizan para la implementación de este proyecto. Una descripción más detallada del funcionamiento y configuración del dispositivo puede consultarse en sus respectivos manuales.

El MPU-6050, integrado al módulo GY-521, es un pequeño dispositivo (4mmx4mmx0.9mm) que combina un giroscopio de 3 ejes, un acelerómetro de 3 ejes y un procesador de movimiento digital. Adicionalmente incluye un pequeño sensor de temperatura y un oscilador con una variación de +/-1% sobre el rango de temperatura de operación.

El giroscopio del sensor MPU-6050 emplea 3 sensores vibratorios que detectan la rotación de los ejes ‘X’, ‘Y’ y ‘Z’, respectivamente. Al rotar el dispositivo, el efecto Coriolis causa una pequeña vibración, la cual es detectada por un perceptor capacitivo. La señal resultante es amplificada, demodulada y filtrada para producir un voltaje proporcional a la velocidad angular. Después, este voltaje se pasa por un convertidor analógico-digital para muestrear cada eje.

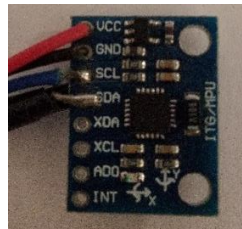


Figura 27 Placa GY-521.

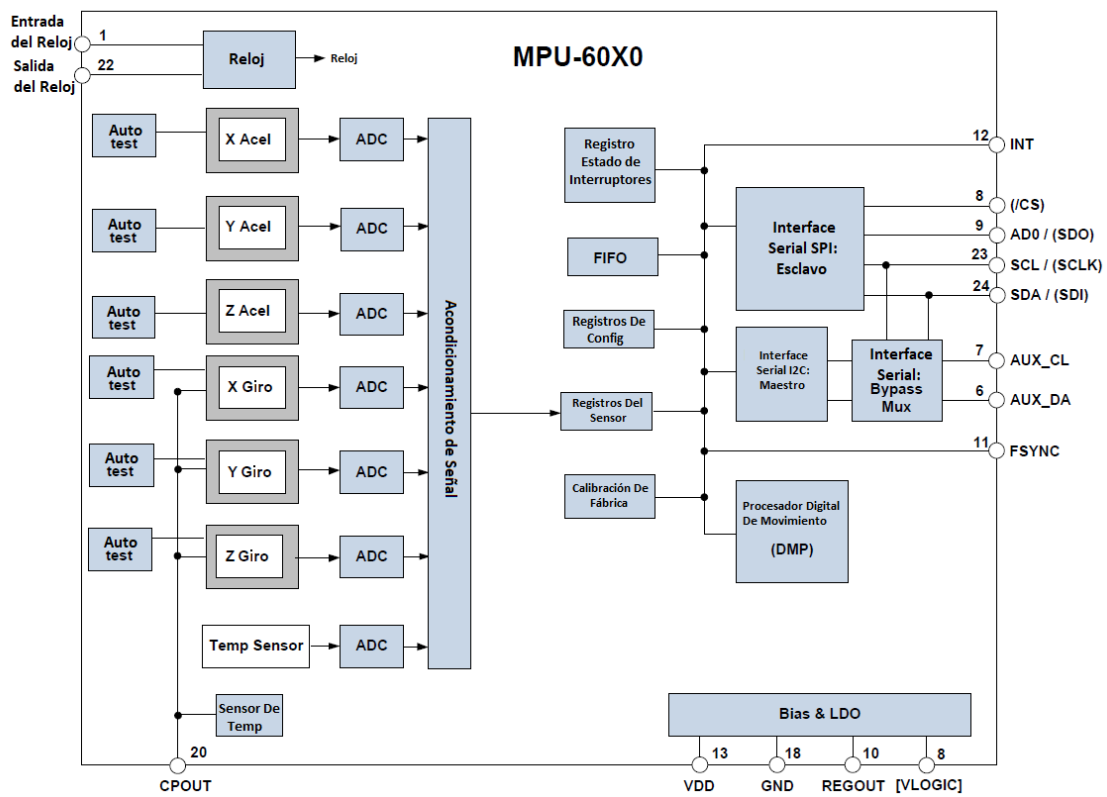


Figura 28 Diagrama de la configuración interna del MPU-6050. Fuente [15].

El acelerómetro de 3 ejes del sensor emplea masas de prueba separadas por cada eje (X, Y, Z). La aceleración que se ejerce a través de un eje en particular causa un desplazamiento en la masa de prueba correspondiente, el cual es detectado por sensores capacitivos. Cada sensor tiene su propio convertidor analógico-digital por el cual se obtienen las salidas digitales del acelerómetro.

Tanto el giroscopio como el acelerómetro poseen una salida de 16 bits de longitud en sus respectivos convertidores analógico-digital. Los rangos de escala de las mediciones realizadas por el giroscopio y el acelerómetro son programables por el usuario a través de sus registros. Los rangos disponibles para el giroscopio son de +/-250, +/-500, +/-1000 y +/-2000 grados por segundo, y para el acelerómetro son de +/-2g, +/-4g, +/-8g y +/-16g.

2.1.1 Registros

Los valores de configuración predeterminados de los registros programables del MPU-6050 son 0x00 en su mayoría, de acuerdo con el registro 107. A continuación, se muestra la descripción y configuración de los registros modificados o directamente leídos en el dispositivo para la implementación de este proyecto.

Registro 107: Administración de energía 1

Administración de energía									
Registro (hex)	Registro (dec)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
6B	107	DEVICE_RESET	SLEEP	CYCLE	-	TEMP_DIS	CLKSEL[2:0]		
		0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 3 Configuración del registro 107.

El registro 107 es el primero, de dos registros, encargado de la administración de la energía en el dispositivo. A través de la variable “SLEEP”, se habilita la suspensión en baja energía; y mediante la variable “CYCLE”, se habilita la función de ciclos.

Mediante la variable “DEVICE_RESET”, el usuario tiene la capacidad de reestablecer todos los registros a sus valores predeterminados. Adicionalmente, es posible deshabilitar el sensor de temperatura a través de la variable “TEMP_DIS”.

El reloj se ve definido de acuerdo con la variable “CLKSEL”, como se muestra en la Tabla 4.

CLKSEL	Fuente de Reloj
0	Oscilador interno de 8MHz
1	PPL con el eje X del giroscopio como referencia
2	PPL con el eje X del giroscopio como referencia
3	PPL con el eje X del giroscopio como referencia
4	PPL con el eje X del giroscopio como referencia
5	PPL con el eje X del giroscopio como referencia
6	Reservado
7	Detiene el reloj y mantiene el generador de tiempo restablecido

Tabla 4 Configuración del reloj del dispositivo de acuerdo al valor de la variable "CLKSEL".

Para el desarrollo de este proyecto, las funciones de suspensión de baja energía, la función de ciclos, el restablecimiento de valores del dispositivo y el sensor de temperatura, permanecerán deshabilitados. El MPU-6050 utilizará el oscilador interno de 8MHz como fuente de reloj.

Registro 26: Configuración

Configuración (CONFIG)									
Registro (hex)	Registro (dec)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
1A	26	-	-	EXT_SYNC_SET[2:0]			DLPF_CFG[2:0]		
		0	0	0	0	0	1	0	0

Tabla 5 Configuración del registro 26.

Este registro configura el filtro pasa bajas digital del giroscopio y del acelerómetro, así como el pin de muestreo del módulo de sincronización externo, FSYNC por sus siglas en inglés. Sin embargo, debido a la configuración del circuito en la placa GY-521, la configuración de los bits del 3 al 5 será irrelevante.

El acelerómetro y el giroscopio se ven filtrados de acuerdo con el valor de la variable “DPF_CFG”, como se muestra en la Tabla 6.

DLPF_CFG	Acelerómetro (f=1kHz)		Giroscopio		
	Ancho de banda (Hz)	Retraso (ms)	Ancho de banda (Hz)	Retraso (ms)	Fs(Hz)
0	260	0	256	0.98	8
1	184	2.0	188	1.9	1
2	94	3.0	98	2.8	1
3	44	4.9	42	4.8	1
4	21	8.5	20	8.3	1
5	10	13.8	10	13.4	1
6	5	19.0	5	18.6	1
7	RESERVADO		RESERVADO		8

Tabla 6 Configuración del filtro pasa bajas de acuerdo al valor de la variable DLP_CFG.

De acuerdo con la configuración mostrada en la Tabla 5, el valor de la variable “DLPF_CFG” es de 4, por lo tanto, el acelerómetro operará en un ancho de banda de 21Hz, con un retraso de 8.5ms, a una frecuencia de 1kHz. En cambio, el giroscopio operará en un ancho de banda de 20Hz, con un retraso de 8.3ms, a una frecuencia de 1kHz.

Registro 25: Divisor de frecuencia de muestreo

Divisor de frecuencia de muestreo (SMPRT_DIV)									
Registro (hex)	Registro (dec)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
19	25	SMPLRT_DIV [7:0]							
		0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 7 Configuración del registro 25.

El registro 25 especifica el divisor de la Ecuación 14, la cual se utiliza para obtener la tasa de muestreo del MPU-6050, donde el valor de la tasa de salida del giroscopio viene dado por el registro 26.

$$Tasa\ de\ muestreo = \frac{Tasa\ de\ salida\ del\ giroscopio}{1+SMPLRT_{DIV}} \quad (14)$$

En este proyecto, el registro 26 se configura de tal manera en que la variable “DLPF” esté habilitada, por lo que la tasa de salida del giroscopio es de 1kHz. Al resolver la Ecuación 14, se obtiene como resultado una tasa de muestreo de 1kHz para el MPU-6050.

Registros del 59 al 64 & del 67 al 72: Mediciones del giroscopio y del acelerómetro

Mediciones del acelerómetro									
Registro (hex)	Registro (dec)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
3B	59	ACCEL_XOUT[15:8]							
3C	60	ACCEL_XOUT[7:0]							
3D	61	ACCEL_YOUT[15:8]							
3E	62	ACCEL_YOUT[7:0]							
3F	63	ACCEL_ZOUT[15:8]							
40	64	ACCEL_ZOUT[7:0]							

Tabla 8 Configuración de los registros del acelerómetro.

Mediciones del giroscopio									
Registro (hex)	Registro (dec)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
43	67	GYRO_XOUT[15:8]							
44	68	GYRO_XOUT[7:0]							
45	69	GYRO_YOUT[15:8]							
46	70	GYRO_YOUT[7:0]							
47	71	GYRO_ZOUT[15:8]							
48	72	GYRO_ZOUT[7:0]							

Tabla 9 Configuración de los registros del giroscopio.

Los registros de las Tabla 8 y la Tabla 9 contienen los valores más recientes de las mediciones del acelerómetro y del giroscopio, respectivamente. Cada una de las mediciones tiene una longitud de 16 bits, por lo que son proporcionadas en sets de 2 registros, en un formato de complemento a dos.

Es importante señalar que los registros de las mediciones del acelerómetro y del giroscopio son de solo lectura.

2.2 Protocolo de comunicación I²C

El contenido de esta sección se basa principalmente en la sección 9, Interfaz Digital, del manual de especificaciones del MPU-6050 de InvenSense. [15]

La comunicación con el MPU-6050 se establece a través del protocolo de comunicación I²C a una velocidad máxima de 400kHz. Este tipo de comunicación está diseñada para manejarse como un bus esclavo-maestro y utiliza una interfaz de 2 cables compuesta por la señal serial de datos (SDA, por sus siglas en inglés) y la señal serial de reloj (SCL, por sus siglas en inglés), siendo ambas señales bidireccionales.

El MPU-6050 siempre opera como esclavo cuando se comunica con el procesador del sistema, el cual actúa como maestro. La dirección del MPU es b110100X, estando el séptimo bit determinado por el valor lógico del pin AD0. Si AD0 tiene un valor lógico bajo, el bit 7 será 0, en caso contrario el bit 7 será 1; esto permite que diversos dispositivos MPU-6050 sean conectados al mismo bus.

La comunicación I²C se inicia cuando el maestro ingresa la condición de inicio (S) en el bus, la cual se interpreta como un flanco de bajada en la línea SDA, mientras que la señal de la línea SCL se mantiene en alto, véase Figura 29. Se considera que el bus está libre, en el momento que el maestro ingresa la condición de paro (P), la cual se interpreta como un flanco de subida en la línea SDA, mientras que la señal de la línea SCL se mantiene en alto, véase Figura 29.

El protocolo I²C no tiene una restricción respecto a la cantidad de bytes transmitidos; sin embargo, después de cada byte transmitido se debe activar la condición de reconocimiento (ACK), la cual se interpreta como una señal lógica baja en el SDA, mientras se ejecuta la porción lógica alta de la señal de reloj SCL, siendo esta última generada por el maestro. Existe una segunda condición, definida como no reconocida, en la cual, a diferencia de la ACK, la línea SDA permanece en un valor lógico alto en el noveno ciclo. Véase Figura 29.

Una secuencia estándar para la transferencia de datos en el MPU-6050, comienza con el ingreso de la condición de inicio (S), ver Figura 30. Después el maestro envía la dirección del esclavo de 7 bits, seguido por un octavo bit, el cual señala si la operación

será de escritura o lectura. Finalizado este paso, se activa la condición de reconocimiento y se inicia la fase de transmisión de datos, como se describe en el párrafo anterior. Una vez concluida la transferencia de datos, el maestro genera la condición de paro (P) y el bus queda libre hasta que se genere nuevamente la condición de inicio.

El proceso de escritura en los registros del dispositivo es similar a la secuencia de transferencia de datos del párrafo anterior, con el octavo bit de la dirección del esclavo en modo escritura (AD+W). Sin embargo, antes de comenzar la transferencia de datos por parte del maestro, se agrega un proceso en donde el maestro introduce la dirección del registro en el bus (RA) y el condicional de reconocimiento (ACK), como se muestra en la Tabla 10. En caso de que se desee transmitir múltiples bytes de datos, el maestro tiene la capacidad de continuar con el proceso de transferencia de datos antes de generar la condición de paro. En el caso del MPU-6050, este automáticamente incrementa la dirección del registro y carga los datos en el registro correspondiente.

Secuencia de escritura para un solo byte										
Maestro	S	AD+W		RA		DATA				P
Esclavo			ACK		ACK			ACK		
Secuencia de escritura para más de un byte										
Maestro	S	AD+W		RA		DATA		DATA		P
Esclavo			ACK		ACK		ACK		ACK	

Tabla 10 Secuencia de escritura I2C para el dispositivo MPU-6050. Fuente [15].

Para dar lectura a los registros internos del dispositivo, el maestro y el esclavo siguen la secuencia de inicio estándar, en donde el maestro comienza con la condición de inicio (S), envío de la dirección del esclavo (AD+W) y envío de la dirección de registro a leer (RA). Véase Tabla 11. Después de que se genere el condicional de reconocimiento (ACK) correspondiente, el maestro transmite un condicional de inicio (S) seguido de la dirección del esclavo y el bit de lectura (AD+R). Como respuesta, el esclavo genera un condicional de reconocimiento (ACK) y envía los datos. La comunicación se finaliza cuando se genera el condicional de no reconocimiento (NACK) seguido del condicional de Paro (P).

2.3 Conversión de los datos del sensor a ángulos en grados

Los rangos predeterminados del MPU-6050 son +/-2g para el acelerómetro y +/-250°/seg para el giroscopio. Al contar con una resolución de 16 bits, el rango de lectura será de -32768 a +32767 debido a que el dispositivo entrega cada una de las lecturas en un formato de complemento a dos del valor. [16]

Para escalar cada una de las mediciones se utiliza una ecuación de conversión de unidades, ver ecuación 15.

$$\text{Datos a escala} = \text{datos proporcionados por el dispositivo} * \left(\frac{\text{unidades}}{\text{resolución}} \right) \quad (15)$$

Para efectos de este trabajo, se utilizará el sistema internacional (m/s²) para interpretar la lectura de aceleración. Las unidades del giroscopio permanecerán en grados (°/s).

Es posible obtener la posición angular del dispositivo utilizando los valores de aceleración proporcionados por el dispositivo MPU-6050 y las matrices de rotación mencionadas en la sección “1.4 Matrices de rotación y ángulos de Euler” dentro de los antecedentes de este trabajo.

Cuando el sensor se encuentra en una posición inicial horizontal estática, como se muestra en la Figura 31, el eje z del dispositivo se encuentra alineado con el campo gravitatorio de la tierra por lo que se asume que el vector resultante (G_p) de la aceleración en cada eje es el siguiente:

$$G_p = \begin{bmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{bmatrix} = Rg = R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

En donde, R representa la matriz de rotación de la orientación del dispositivo y g la salida del acelerómetro en cada eje. [17]

Al sustituir R por cada una de las matrices de rotación de Tait-Bian se obtiene lo siguiente:

$$G_{pxyz} = Rg = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pxyz} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \phi \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pxyz} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} ()$$

$$G_{pxzy} = R_x(\theta)R_z(\phi)R_y(\psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pxzy} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \psi & -\sin \theta \cos \psi \\ -\cos \phi \cos \theta \sin \psi + \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ \sin \phi \cos \theta \sin \psi + \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta + \sin \phi \sin \theta \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pxzy} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \cos \psi \\ \sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ \cos \phi \cos \theta + \sin \phi \sin \theta \sin \psi \end{bmatrix} (18)$$

$$G_{pyxz} = R_y(\phi)R_x(\theta)R_z(\psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pyxz} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \theta \\ -\cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \\ \sin \phi \cos \theta \sin \psi + \sin \theta \cos \psi & -\sin \phi \cos \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pyxz} = \begin{bmatrix} -\cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} (19)$$

$$G_{pyzx} = R_y(\phi)R_z(\psi)R_x(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pyzx} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \psi \cos \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \theta & \sin \phi \cos \theta \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \\ -\sin \psi & \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \psi \\ \sin \theta \cos \psi & -\sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \theta + \sin \phi \sin \theta \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pyzx} = \begin{bmatrix} \sin \phi \cos \theta \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \cos \psi \\ \cos \phi \cos \theta + \sin \phi \sin \theta \sin \psi \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$G_{pzxy} = R_z(\phi)R_x(\theta)R_y(\psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pzxy} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \cos \theta \sin \psi - \sin \theta \cos \psi \\ -\cos \theta \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \psi \\ \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pzxy} = \begin{bmatrix} \sin \phi \cos \theta \sin \psi - \sin \theta \cos \psi \\ \sin \phi \cos \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \psi \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$G_{pzyx} = R_z(\phi)R_y(\psi)R_x(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pzyx} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ -\cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ \sin \theta & -\sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{pzyx} = \begin{bmatrix} \sin \phi \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (22)$$

Es una realidad que todos los acelerómetros son insensibles a rotaciones en el eje z debido a que este se encuentra alineado con el eje gravitatorio de la tierra, por lo que automáticamente 4 de los 6 resultados de las ecuaciones anteriores quedan descartados, dejando únicamente como opción las matrices G_{pxyz} y G_{pyxz} . [17]

Para determinar los ángulos roll (ϕ) y pitch (θ) para la secuencia XYZ se utiliza la ecuación 18, mientras que para la secuencia YXZ se utiliza la ecuación 19.

Para la secuencia XYZ, la ecuación 16 puede ser reescrita relacionando los ángulos ϕ y θ con la lectura de acelerómetro normalizada G_p . Entonces:

$$\frac{G_p}{\|G_p\|} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Lo que es igual a:

$$\frac{1}{\sqrt{G_{px}^2 + G_{py}^2 + G_{pz}^2}} \begin{bmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (23)$$

Debido a que el vector $(0 \ 0 \ 1)^T$ tiene módulo 1, y las rotaciones conservan módulos, entonces:

$$\frac{G_p}{\|G_p\|} = \left\| R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\| = 1 \quad (24) \quad [18]$$

Lo que da como resultado:

$$G_{px} = -\sin \theta$$

$$G_{py} = \sin \phi \cos \theta$$

$$G_{pz} = \cos \phi \cos \theta$$

Al resolver la ecuación 23, se obtienen los valores de los ángulos de ϕ y θ :

$$\frac{G_{py}}{G_{pz}} = \frac{\cos \theta \sin \phi}{\cos \theta \cos \phi} = \frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \mathbf{\tan \phi}$$

$$\frac{-G_{px}}{\sqrt{G_{px}^2 + G_{py}^2}} = \frac{-G_{px}}{G_{py} \sin \phi + G_{pz} \cos \phi} = \frac{-(-\sin \theta)}{(\sin \phi \cos \theta) \sin \phi + (\cos \phi \cos \theta) \cos \phi}$$

$$\frac{\sin \theta}{\cos \theta \sin^2 \phi + \cos \theta \cos^2 \phi} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi)} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta (1)} = \mathbf{\tan \theta}$$

Lo que es igual a:

$$\tan \phi = \frac{G_{py}}{G_{pz}} \quad (25)$$

$$\tan \theta = \frac{-G_{px}}{\sqrt{G_{px}^2 + G_{py}^2}} \quad (26)$$

En el caso de la secuencia YXZ la ecuación 16 puede ser reescrita relacionando los ángulos ϕ y θ con la lectura de acelerómetro normalizada G_p . Siguiendo la metodología anterior obtenemos:

$$\frac{G_p}{\|G_p\|} = \begin{bmatrix} -\cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{\sqrt{G_{px}^2 + G_{py}^2 + G_{pz}^2}} \begin{bmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (27)$$

Tomando en cuenta la ecuación 24, se tiene:

$$G_{px} = -\cos \phi \sin \theta$$

$$G_{py} = \sin \phi$$

$$G_{pz} = \cos \phi \cos \theta$$

Al resolver la ecuación 27, se obtienen los valores de los ángulos de ϕ y θ , como se muestra:

$$\frac{G_{py}}{\sqrt{(G_{px})^2 + (G_{pz})^2}} = \frac{\sin \phi}{\sqrt{(-\cos \phi \sin \theta)^2 + (\cos \phi \cos \theta)^2}}$$

$$\frac{\sin \phi}{\sqrt{\cos^2 \phi \sin^2 \theta + \cos^2 \phi \cos^2 \theta}} = \frac{\sin \phi}{\sqrt{\cos^2 \phi (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta)}}$$

$$\frac{\sin \phi}{\cos \phi \sqrt{1}} = \frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \mathbf{\tan \phi}$$

$$-\frac{G_{px}}{G_{pz}} = -\frac{\cos \phi \sin \theta}{\cos \phi \cos \theta} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \mathbf{\tan \theta}$$

Lo que es igual a:

$$\tan \phi = \frac{G_{py}}{\sqrt{(G_{px})^2 + (G_{pz})^2}} \quad (28)$$

$$\tan \theta = -\frac{G_{px}}{G_{pz}} \quad (29)$$

Para efectos de este trabajo, se pretende utilizar un solo eje de rotación, el cual es el x , por lo cual, la ecuación a implementar viene dada por la secuencia R_{YXZ} ángulo ϕ (Ecuación 28).

Existe un segundo método para obtener la posición angular, el cual se basa en la utilización de la velocidad angular del dispositivo MPU6050. Para esto es necesario conocer el ángulo inicial, así como realizar un proceso de integración en el tiempo de la velocidad angular, como se muestra en la ecuación 30.

$$\theta = \theta_{in} + \omega * dt \quad (30)$$

Donde:

θ = posición angular presente del dispositivo (°).

θ_{in} = posición angular inicial del dispositivo (°).

ω = velocidad angular del dispositivo (°/s).

dt = diferencial de tiempo (s)

En lo que se refiere a la ecuación 30, los ángulos obtenidos no serán exactos debido a la acumulación de ruido con cada iteración, producto de la integración de la velocidad angular. A esta acumulación de error se le denomina “Deriva” o por su nombre en inglés “Drift”.

Uno de los filtros más utilizados para estos casos es el Filtro Kalman, el cual ha sido muy estudiado en aplicaciones aeroespaciales; sin embargo, es difícil de aplicar robustamente.

Otro filtro muy usado es el filtro complemento, el cual combina mediciones con diferentes propiedades en términos de ruido para obtener la estimación de una variable en particular. Es decir, la primera medición será aquella que presente un buen comportamiento solo a bajas frecuencias, mientras que la otra medición presentará un buen comportamiento a altas frecuencias. Para efectos de este trabajo, las estimaciones a partir de los datos proporcionados por el giroscopio presentan una respuesta no ideal a altas frecuencias debido a la integración, haciendo un buen trabajo en el corto plazo; mientras que los datos recopilados por el acelerómetro, tienen una buena respuesta en el largo plazo, pero no son muy precisos cuando se presentan movimientos rápidos. [19]

La ganancia total de ambas mediciones debe de dar como resultado un 1. [20]

Para determinar el valor a utilizar entre una serie de ganancias se hizo una pequeña prueba en donde se varió el valor de las ganancias del filtro complemento. Dentro de la Figura 32 se pueden observar dos señales, la ganancia variable representa una ganancia que se modifica de acuerdo a los valores de la Tabla 12, mientras que la ganancia constante representa la ganancia utilizada en las estimaciones realizadas en las secciones posteriores. Como se puede observar, entre más alta la ganancia del giroscopio menos ruido existe; sin embargo, la señal se aleja cada vez un poco más de la referencia 0 al incrementar el valor de la ganancia de los datos recibidos por parte del acelerómetro, siendo este cambio no tan pronunciado.

Ganancia giroscopio	Ganancia acelerómetro
0.90	0.1
0.92	0.08
0.94	0.06
0.96	0.04
0.98	0.02

Tabla 12

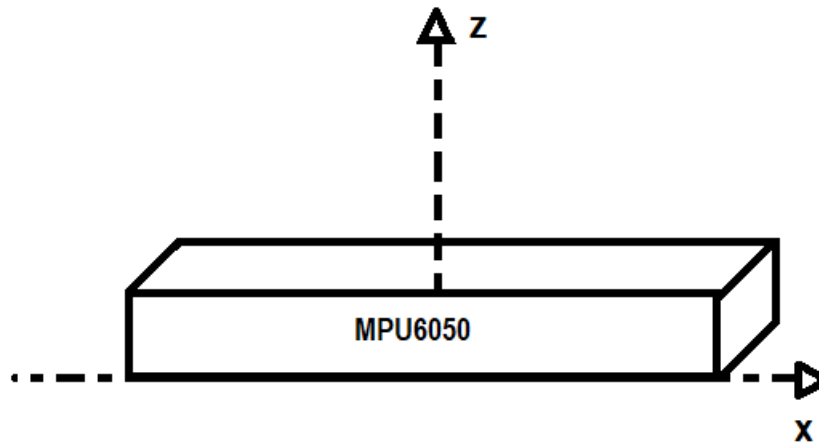


Figura 31 Imagen ilustrativa del MPU6050 posicionado en forma horizontal

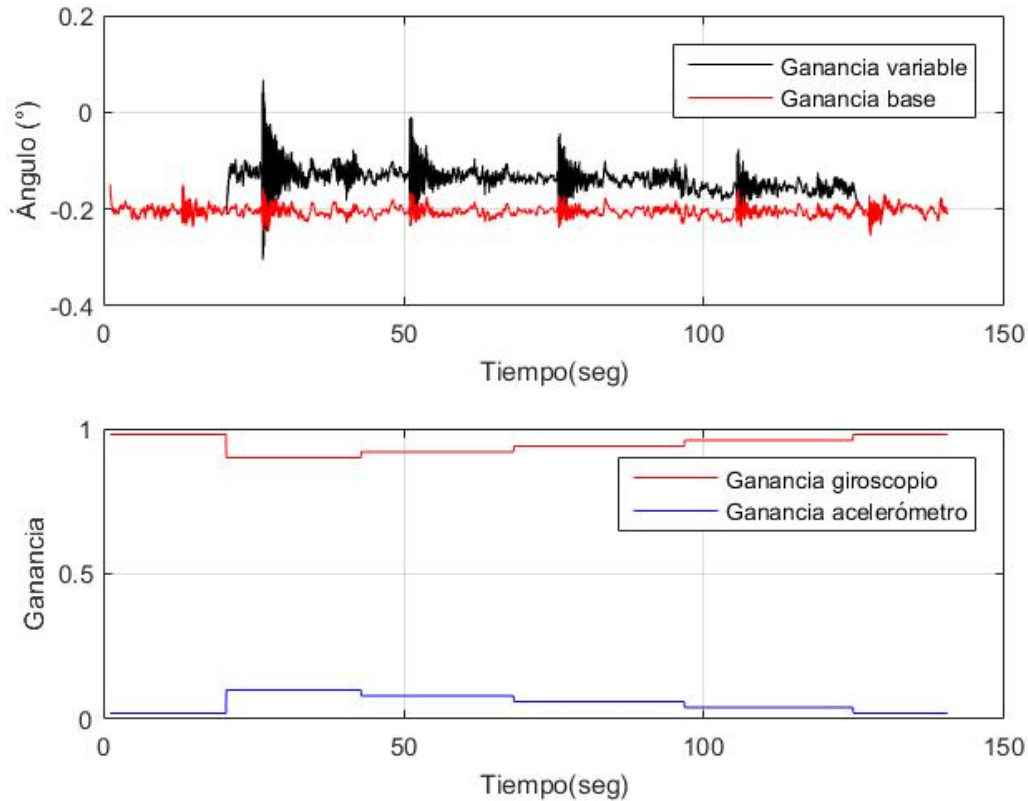


Figura 32 Gráfica comparativa de las distintas ganancias del filtro complemento con la ganancia elegida (base).

2.4 Programa para la lectura del sensor

El programa para la lectura del sensor es ejecutado como una aplicación RT en el dispositivo myRIO-1900.

El VI ejecutado en el ordenador se muestra en la Figura 33. La interfaz de usuario está compuesta por un gráfico encargado de mostrar la inclinación del mecanismo en grados, así como de un indicador para señalar el tiempo de ejecución actual del VI en el myRIO-1900. Los botones de Paro de los respectivos VIs se ubican en la región baja de la ventana.

El VI dentro del myRIO, ver Figura 34, contiene la programación necesaria para inicializar el sensor, leer y procesar los datos. Al dar inicio al programa, se inicializa el sensor señalando el canal de entrada I²C del puerto A e indicando una tasa de transferencia de datos de 400kbps. A continuación, se configuran los registros del sensor de acuerdo al apartado “2.1.1 Registros” de la sección “2. Puesta en operación del sensor MPU-6050” de este trabajo, para después entrar al lazo de simulación y control, el cual tiene un

periodo de ejecución de 3 milisegundos. A través del “Write Read.vi” se definen los registros y la cantidad de bytes a los cuales se les dará lectura. Debido a que el primer registro a leer en términos de numeración es el del valor del acelerómetro en el eje x (3B), se introduce la dirección hexadecimal “BB” en la terminal “Bytes to write”, debido a que se interpone un 1 en el octavo bit de la dirección. La última dirección a dar lectura es la del eje x del giroscopio (68), por lo que en la terminal “Byte Count” se introducirá el número 10, representando los 10 siguientes bytes que serán leídos. Finalmente se ingresará al subsistema “Giroscopio_Sub” en donde se agruparán los correspondientes bytes para formar un número de 16 bits que representará la lectura de cada elemento del dispositivo, para posteriormente ser convertido en un número flotante.

Las lecturas del MPU-6050 son utilizadas para determinar la posición del mecanismo en términos de grados, utilizando las Ecuaciones 31 y 32. Finalmente, el valor obtenido a través de la función “Mathscript Node” es procesado a través de la Ecuación de ajuste 33 y un filtro digital. Ver Figura 35.

$$ACCangx = \tan^{-1} \left(\frac{Ay}{\sqrt{Ax^2 + Az^2}} \right) \quad (31)$$

$$angx = 0.98 * \left(angx_{prev} + \left(\frac{Gx}{131} \right) * dt \right) + 0.02 * ACCangx \quad (32)$$

$$y(x) = 1.29114429x - 0.53674713 \quad (33)$$

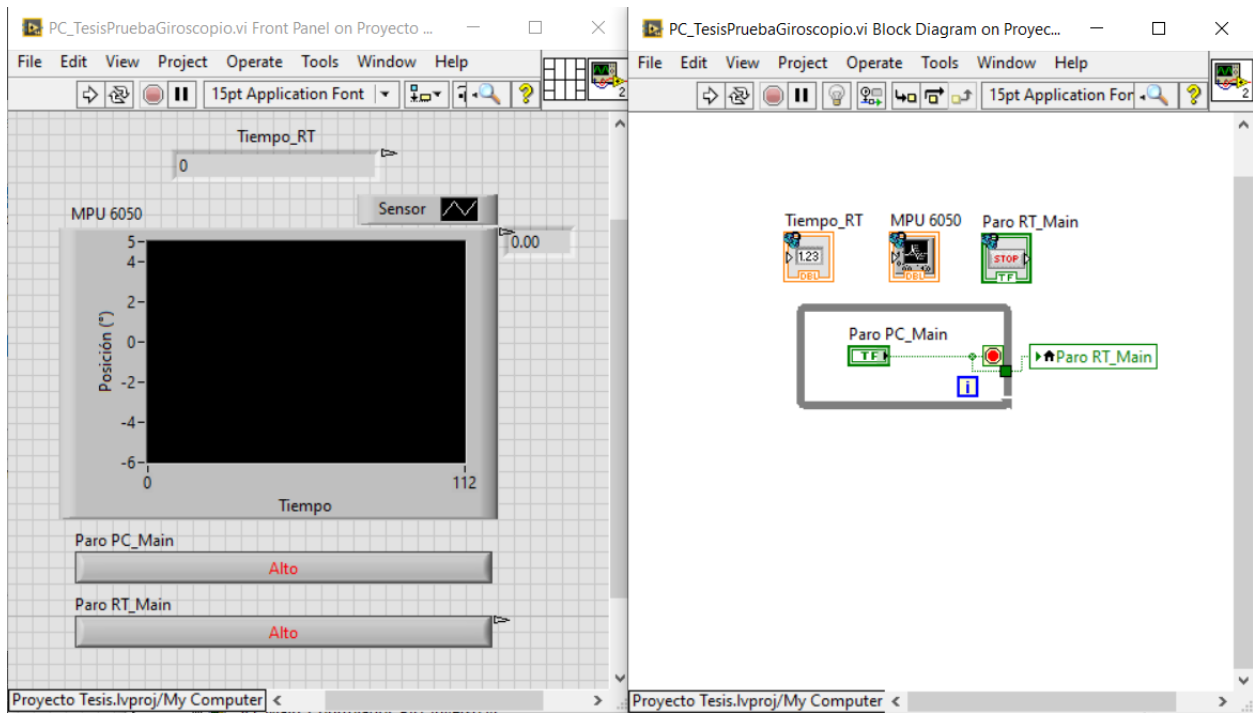


Figura 33 Panel frontal (derecha) y diagrama de bloques (izquierda) del programa ejecutado en el ordenador para dar lectura a sensor MPU-6050.

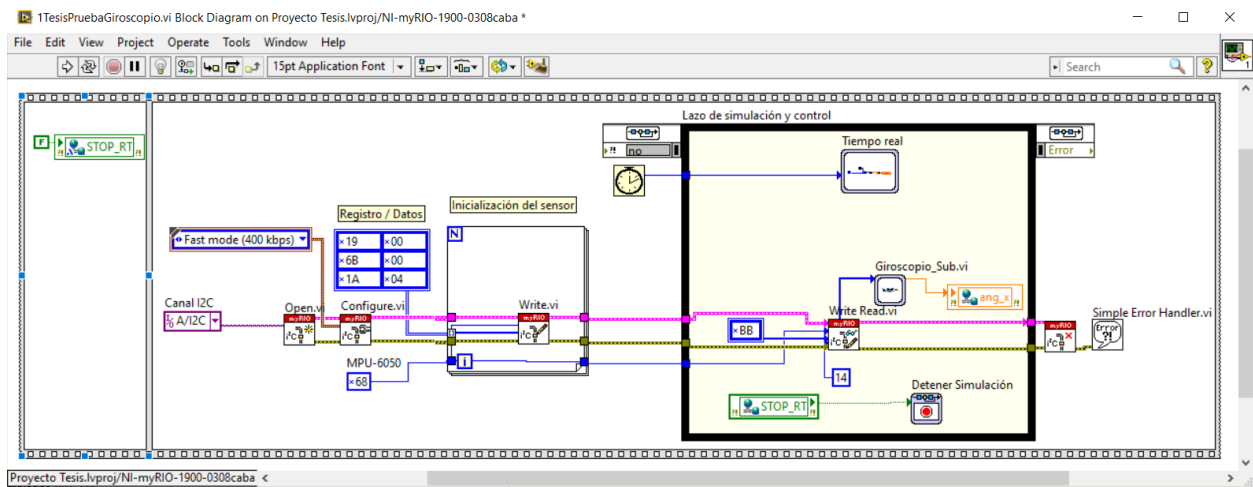


Figura 34 Diagrama de bloques del ejecutado en el ordenador para dar lectura al sensor MPU-6050.

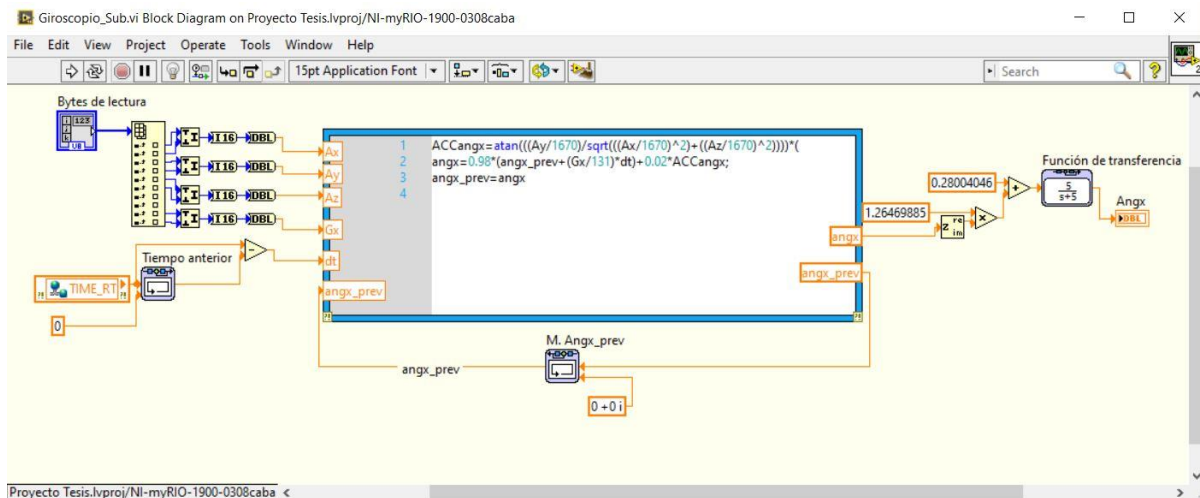


Figura 35 Diagrama de bloques del subsistema "Giroscopio_Sub".

Se tomaron 9 pares de mediciones, para obtener la ecuación de ajuste (Ecuación 33) a través del método de regresión lineal. Cada una de las mediciones representa la posición del mecanismo. Los resultados se muestran en la Tabla 13, estando la primera columna compuesta por los valores leídos por el dispositivo MPU6050 y la segunda por la posición del mecanismo determinada de manera visual. Al realizar los cálculos pertinentes de acuerdo a las Ecuaciones 34 y 35 se obtiene una pendiente (m) de 1.29114429 y una constante de intersección (b) de -0.53674713.

Valor real (x)	Valor ideal (y)
12.27°	15°
8.12°	10°
4.22°	5°
0°	0°
-3.43°	-5°
-7.15°	-10°
-11.12°	-15°

Tabla 13 Medición de posición del mecanismo para obtener la ecuación de ajuste.

$$m = \frac{n \sum xy - (\sum x \sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (34)$$

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n} \quad (35)$$

3. Diseño del circuito para el sensor de temperatura

Para la realización de las pruebas de la sección “5. Diseño del algoritmo de control y pruebas de desempeño” fue necesario contar con un sensor de temperatura que se ajustara a las necesidades del sistema. A continuación, se describe el diseño del circuito medidor de temperatura utilizado, así como las pruebas realizadas para conocer el comportamiento del mismo.

El circuito de medición de temperatura emplea un termistor NTCLE317E4103SBA del fabricante Vishay, el cual cuenta con un rango de temperatura de -55°C a 150°C y un tiempo de respuesta (en aceite) de 0.3s [21]. Las dimensiones de este sensor, ver Figura 36, lo hacen apto para realizar mediciones de temperatura en los resortes de Nitinol; sin embargo, reducir la circunferencia del sensor y tiempo de respuesta sería lo óptimo.

Un punto importante de la estructura física del sensor, es que tanto la cabeza como ambas terminales del termistor se encuentran aisladas eléctricamente, por lo que el flujo de corriente a través del objeto a medir no causará cortos circuitos en el sistema. Para más información consultar la hoja de datos del dispositivo.

Los termistores NTC son sensores resistivos con un coeficiente de temperatura negativo. Para calcular la temperatura (T) en base a la respuesta resistiva (R) del semiconductor, se utiliza la versión extendida de la ecuación Steinhart-Hart, ver Ecuación 36, en donde A_1 , B_1 , C_1 y D_1 son coeficientes que dependen de la marca y modelo de termistor y R_{ref} es la resistencia de referencia.

$$T_{(R)} = \left(A_1 + B_1 \ln \frac{R}{R_{ref}} + C_1 \ln \frac{R}{R_{ref}}^2 + D_1 \ln \frac{R}{R_{ref}}^3 \right)^{-1} \quad (36)$$

Los valores de A_1 , B_1 , C_1 y D_1 pueden ser calculados de manera experimental, sin embargo, fueron proporcionados por el fabricante, al igual que el valor de la resistencia R_{ref} ; estos valores pueden ser consultados en la Tabla 14. En la Figura 37, se puede observar la curva RT del termistor.

Coefficientes	Valor
A ₁	3.354016e-03
B ₁	2.565236e-04
C ₁	2.605970e-06
D ₁	6.329261e-08

Tabla 14 Coeficientes del termistor NTCLE317E4103SBA.

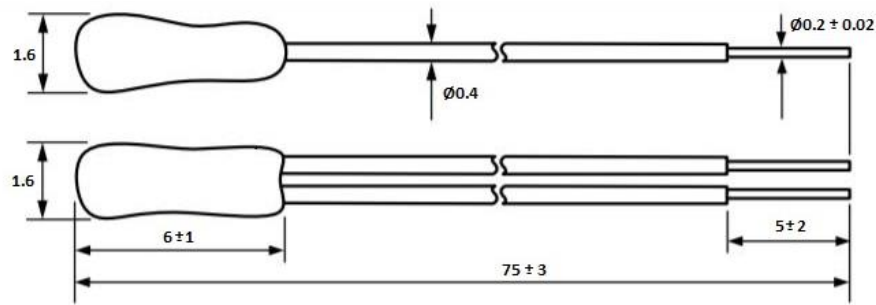


Figura 36 Dimensiones del termistor NTCLE317E4103SBA en milímetros.

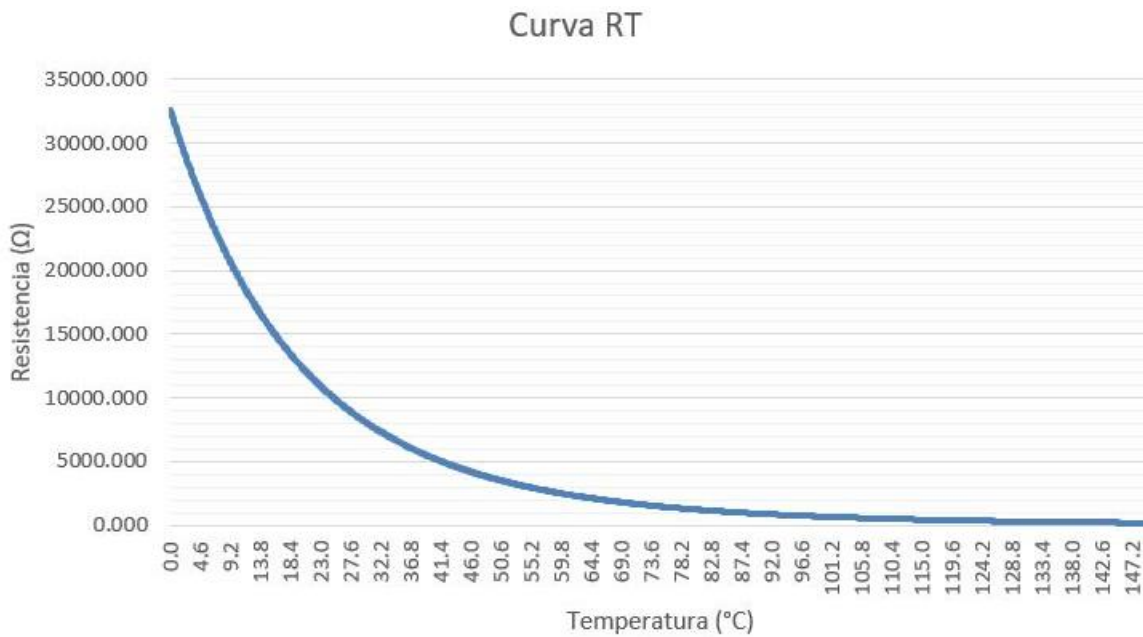


Figura 37 Curva de resistencia contra temperatura del termistor.

La etapa inicial del circuito integra un puente de Wheatstone para interpretar el valor de la resistencia como una señal proporcional de voltaje mediante la ley de Ohm, ver Figura 38. Después se utiliza un amplificador de instrumentación para amplificar la señal de salida entre los puntos A y B a un nivel dentro del rango permitido del dispositivo que adquirirá la señal. Para cada una de las pruebas, será el myRio-1900, el dispositivo que adquirirá las señales, el cual posee un rango de +/- 10V en la entrada analógica del puerto C. Al definir los valores de cada una de las resistencias, hay que tener en consideración la resolución entre los puntos A y B de la salida que habrá entre cada grado, así como el rango del mismo. Adicionalmente, se tiene que tomar en cuenta el valor máximo de la corriente permitida para evitar un sobrecalentamiento del sensor y consecuentemente un error en la medición.

La corriente máxima permitida para el termistor (I_{max}) estará en función del factor de la resistencia mínima (R_{Tmin}) del elemento, la disipación del elemento (δ), la exactitud de la medición (ex) y una ventana para el error (e). La corriente máxima será calculada a partir de la fórmula de la potencia, ver Ecuación 37. Al dar solución a la ecuación se obtiene una corriente máxima de 1.05mA para una exactitud de 0.5K y una ventana del 50%. El factor de disipación para el elemento es de 0.8mW/K según su hoja de datos.

$$I_{max} = \sqrt{\frac{\delta * ex * e}{R_{Tmin}}} \quad (37)$$

Al calcular la resistencia mínima (R_{3min}) mediante la ley de Ohm, se obtiene un valor de 784.24 Ω . Sin embargo, teniendo en cuenta la resolución de los valores del voltaje en el circuito y resistencias disponibles, se optó por utilizar una resistencia de 9.97k Ω . Ver Figura 39.

Para la etapa de amplificación del circuito se determinó una ganancia (G) óptima de 25.5. Para determinar la resistencia (R_G) del amplificador de instrumentación seleccionado, AD620, el fabricante proporciona las fórmulas de las Ecuaciones 38 y 39 a través de su hoja de datos [22], obteniendo así, una resistencia de 1937.25 Ω . Por conveniencia se redondeó la resistencia a un valor de 2k Ω , obteniendo consecuentemente una ganancia de 25.7.

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1 \quad (38)$$

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G-1} \quad (39)$$

Antes de integrar el termistor al circuito, se realizaron una serie de pruebas en la etapa de amplificación para conocer la ganancia real del circuito. Estas pruebas consistieron en aplicar una señal de voltaje a la entrada del amplificador de instrumentación AD620 y comparar el voltaje a la salida del mismo, con el nivel de voltaje esperado.

Los resultados de las pruebas se pueden observar en la Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17.

La fuente de voltaje variable fue la salida analógica del myRio-1900 del puerto C, siendo el “voltaje de entrada ideal” el valor ingresado en el programa, y el “voltaje de entrada real” el valor medido manualmente con un multímetro a la entrada del amplificador. El valor “voltaje de salida ideal” fue determinado con respecto al “valor de entrada real”. Finalmente, el “voltaje de salida real” representa el voltaje medido manualmente con multímetro a la salida del amplificador.

A partir de los resultados de la prueba realizada, se determinó una ganancia real promedio de 25.77 para la etapa de amplificación del circuito. Todo cálculo realizado posteriormente tomará como referencia la ganancia real promedio del circuito.

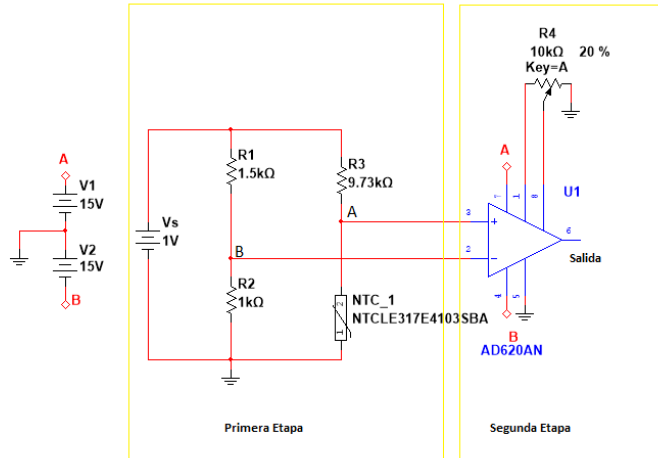


Figura 38 Diagrama del circuito para la medición de temperatura.

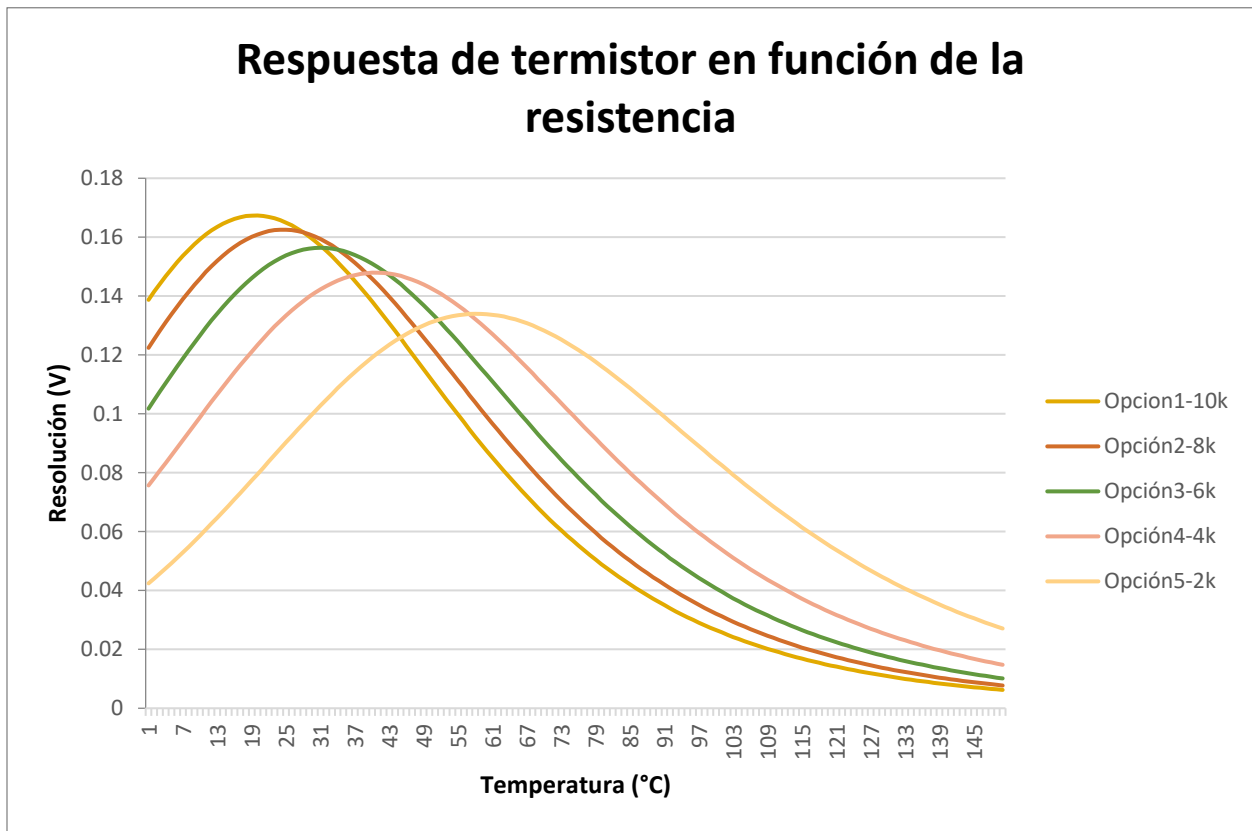


Figura 39 Resolución de voltaje del termistor en base al valor de R_3 .

Número de Medición	Temperatura	Voltaje de entrada ideal	Voltaje de entrada Real	Voltaje de salida ideal	Voltaje de salida Real	Ganancia Real
1	0	0.377054677	0.3847	9.8228321	9.91	25.760333
2	10	0.276984393	0.2872	7.3351134	7.4	25.766017
3	20	0.166030563	0.174	4.4350158	4.484	25.770115
4	30	0.055280405	0.0613	1.5739361	1.58	25.774878
5	40	-0.045393893	-0.0362	-0.917528	-0.932	25.745856
6	50	-0.130222369	-0.1249	-3.183682	-3.222	25.796637
7	60	-0.197791735	-0.193	-4.921445	-4.975	25.777202
8	70	-0.2496	-0.2423	-6.17773	-6.242	25.761453
9	80	-0.28841547	-0.2817	-7.179515	-7.26	25.772098
10	90	-0.31713813	-0.3108	-7.924287	-8.01	25.772201
11	100	-0.33830017	-0.33	-8.419906	-8.5	25.757576
12	110	-0.353905126	-0.3447	-8.792219	-8.88	25.761532
13	120	-0.365461628	-0.3593	-9.162096	-9.26	25.772335
14	130	-0.374075104	-0.3692	-9.414843	-9.52	25.785482
15	140	-0.380544578	-0.3744	-9.54832	-9.65	25.774573
16	150	-0.385444576	-0.3793	-9.672982	-9.77	25.757975

Tabla 15 Resultados de las pruebas en la etapa de amplificación.

Número de Medición	Temperatura	Temperatura "Real"	Error Temperatura	VinIdeal	VinReal	Error Vin
1	0	-0.9	0.9	0.3770547	0.3847	7.65E-03
2	10	9	1	0.2769844	0.2872	1.02E-02
3	20	19.3	0.7	0.1660306	0.174	7.97E-03
4	30	29.3	0.7	0.0552804	0.0613	6.02E-03
5	40	39	1	-0.045394	-0.0362	9.19E-03
6	50	49.3	0.7	-0.130222	-0.1249	5.32E-03
7	60	59.2	0.8	-0.197792	-0.193	4.79E-03
8	70	68.4	1.6	-0.2496	-0.2423	7.30E-03
9	80	78	2	-0.288415	-0.2817	6.72E-03
10	90	87.5	2.5	-0.317138	-0.3108	6.34E-03
11	100	95.8	4.2	-0.3383	-0.33	8.30E-03
12	110	103.8	6.2	-0.353905	-0.3447	9.21E-03
13	120	114.3	5.7	-0.365462	-0.3593	6.16E-03
14	130	124	6	-0.374075	-0.3692	4.88E-03
15	140	130.5	9.5	-0.380545	-0.3744	6.14E-03
16	150	137.9	12.1	-0.385445	-0.3793	6.14E-03

Tabla 16 Resultados de las pruebas a la entrada del amplificador.

Número de Medición	VoutIdeal	Vout Real	Error Vout	Temp "Medida"	Ganancia Real	Error Ganancia
1	9.9268386	9.91	0.0168386	-1.3	25.760333	0.0096673
2	7.4127793	7.4	0.0127793	8.7	25.766017	0.0039833
3	4.4819748	4.484	0.0020252	19.1	25.770115	0.0001149
4	1.5906013	1.58	0.0106013	29.4	25.774878	0.0048777
5	-0.927243	-0.932	0.0047566	39.1	25.745856	0.0241436
6	-3.217392	-3.222	0.0046085	49.5	25.796637	0.0266373
7	-4.973554	-4.975	0.0014456	59.5	25.777202	0.0072021
8	-6.243141	-6.242	0.001141	68.9	25.761453	0.0085473
9	-7.255533	-7.26	0.0044667	78.9	25.772098	0.002098
10	-8.008191	-8.01	0.0018091	88.8	25.772201	0.0022008
11	-8.509058	-8.5	0.0090577	97.4	25.757576	0.0124242
12	-8.885314	-8.88	0.0053136	106.1	25.761532	0.0084682
13	-9.259106	-9.26	0.000894	117.8	25.772335	0.0023351
14	-9.51453	-9.52	0.0054701	129.2	25.785482	0.0154821
15	-9.64942	-9.65	0.0005799	136.5	25.774573	0.0045726
16	-9.775402	-9.77	0.0054016	145	25.757975	0.0120248

Tabla 17 Resultados de las pruebas a la salida del amplificador y ganancia calculada.

Una vez integrado el termistor en el circuito, se realizaron pruebas para comparar el comportamiento del circuito medidor de temperatura contra un termopar tipo K modelo KMQXL-020U-4 de la compañía OMEGA Engineering. Debido a la ausencia de una fuente de temperatura constante, cada una de las pruebas que se realizaron, solo ofrecen una comparativa en el periodo transitorio de los sensores.

Las pruebas fueron realizadas a través de la plataforma LabVIEW. Debido al tiempo de procesamiento, las pruebas se llevaron a cabo a través de 2 programas ejecutados simultáneamente. El programa ejecutado en el dispositivo myRio-1900 es el encargado de adquirir la señal a la salida del amplificador de instrumentación, realizar la conversión de los datos a través de la Ecuación 36, e introducirlos en variables globales. Para realizar dicha conversión, el programa ejecuta las ecuaciones mediante código textual utilizando un "Mathscript Node". (ver Figura 40 y Figura 41). El código de dicha conversión se muestra a continuación:

*vd=Vout(1); %señal resorte derecho
vi=Vout(2); %señal resorte izquierdo*

%Coeficientes de la ecuación Steinhart-Hart

A=0.003354016

B=0.0002565236

C=0.000002605970

D=0.0000000632926

Gain=25.77 % Ganancia

VR2=0.405; %Voltaje en R2 de circuito

R3=9730 %Voltaje en R3 del circuito

VT=1.011; %Voltaje de alimentación

%Termistor Izquierdo

DifAB=vi/Gain; %Voltaje en los puntos AB (R3 y Termistor)

Vter=DifAB+VR2; %Voltaje en el Termistor

*Rter=(Vter*R3)/(VT-Vter) %Resistencia del termistor*

*Tp=1/(A+(B*log(Rter/10000))+C*(log(Rter/10000))^2)+(D*(log(Rter/10000))^3))*

%Ec. Steinhart-Hart para obtener la temperatura

TMIzq=Tp-273.15; %Temperatura en el resorte derecho (°C)

%Termistor Derecho

DifAB=vd/Gain; % Voltaje en los puntos AB (R3 y Termistor)

Vter=DifAB+VR2; %Voltaje en el Termistor

*Rter=(Vter*R3)/(VT-Vter)) %Resistencia del termistor*

*Tp=1/(A+(B*log(Rter/10000))+C*(log(Rter/10000))^2)+(D*(log(Rter/10000))^3)) %Ec.*

Steinhart-Hart para obtener la temperatura

TMDer=Tp-273.15 ; %Temperatura en el resorte derecho (°C)

El programa ejecutado en el ordenador se encarga de recibir la señal del termopar, a través de la tarjeta DAQ NI 9211, recibir la señal del termistor a través de las variables globales, y una vez finalizado el programa, guardar cada uno de los datos en un archivo en formato .txt para su posterior análisis y creación de gráficas. Ver Figura 42 y Figura 43.

La primera prueba (A) consistió en calentar los sensores con las yemas de los dedos para generar una pequeña variación de temperatura. El resultado de estas pruebas se puede observar en la Figura 44.

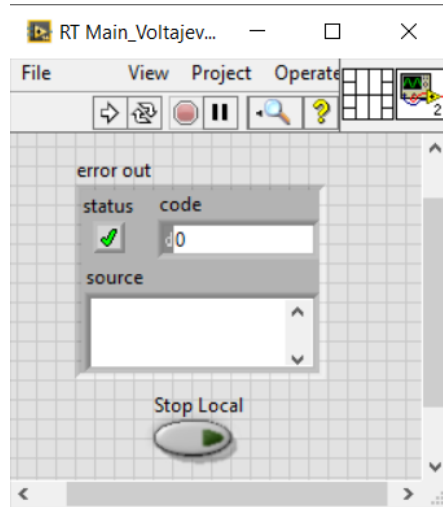


Figura 40 Panel Frontal del programa de pruebas ejecutado en el dispositivo myRio-1900.

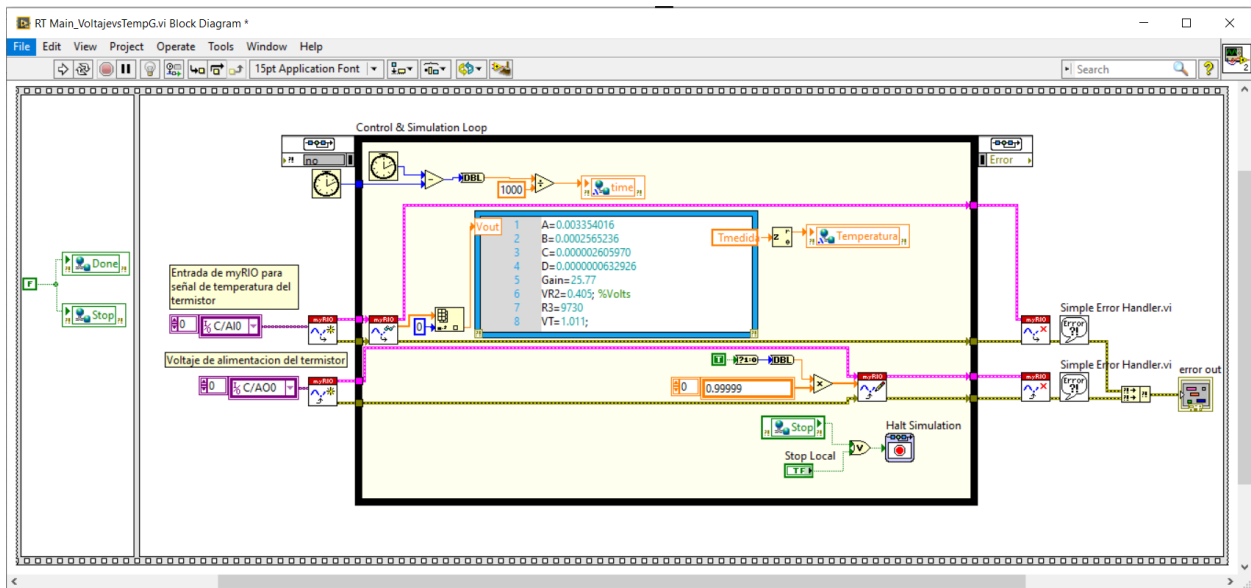


Figura 41 Diagrama de bloques del programa de pruebas ejecutado en el dispositivo myRio-1900.

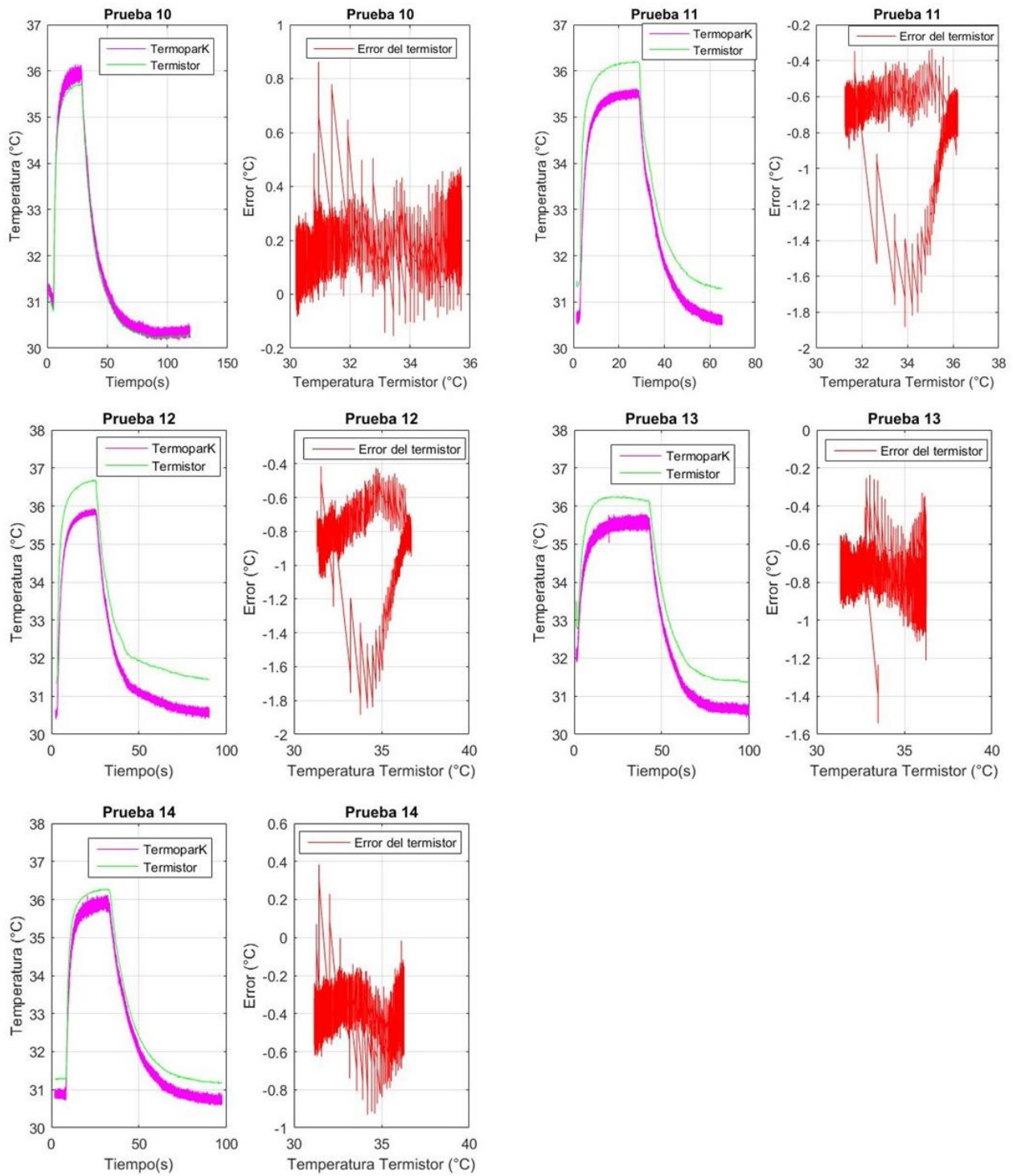


Figura 44 Gráficas resultantes de las pruebas 10 a la 14 cuando se ejerce temperatura con las yemas de los dedos.

En la segunda prueba (B) se sobrepusieron los dos sensores sobre una plancha de cabello para lograr observar el comportamiento de los sensores respecto a la temperatura durante el calentamiento y posterior enfriamiento de la plancha, ver Figura 45. Esta prueba consistió en correr el programa de adquisición de datos, energizar la plancha y permitir que esta alcanzara una temperatura determinada (T_{ref}) tomando como referencia los datos del termopar K, para después apagar manualmente la plancha en el momento en que T_{ref} sea superado y continuar con la captura datos durante el periodo de enfriamiento.

La primera serie de pruebas (B) utilizaron una temperatura T_{ref} aproximada de 110°C ; las gráficas de Temperatura y Error se pueden observar en la Figura 46 y Figura 47, mientras que la comparación Error-Temperatura de cada una de estas pruebas se muestran en la Figura 48 y Figura 49.

Se realizaron 2 pruebas adicionales, la primera con una T_{ref} igual 50°C y la segunda utilizando una temperatura de referencia de 40°C . Los resultados se pueden ver en la Figura 50 y Figura 51.

Como se puede observar en cada una las pruebas, conforme la temperatura incrementa, incrementa también el diferencial entre las mediciones de los sensores, siendo uno de los posibles factores para este comportamiento la disminución de la resolución conforme la temperatura aumenta y el diferencial del tiempo de respuesta de los sensores. La primera suposición se realiza tomando en consideración que la precisión absoluta de la entrada de $\pm 10\text{V}$ del dispositivo myRio-1900 es de $\pm 200\text{mV}$.

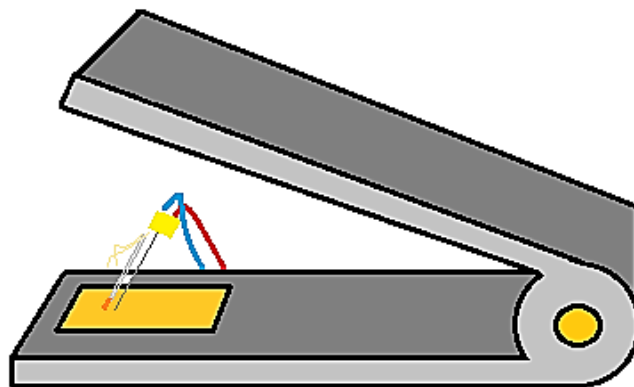


Figura 45 Diagrama representativo de la organización de la plancha y los sensores.

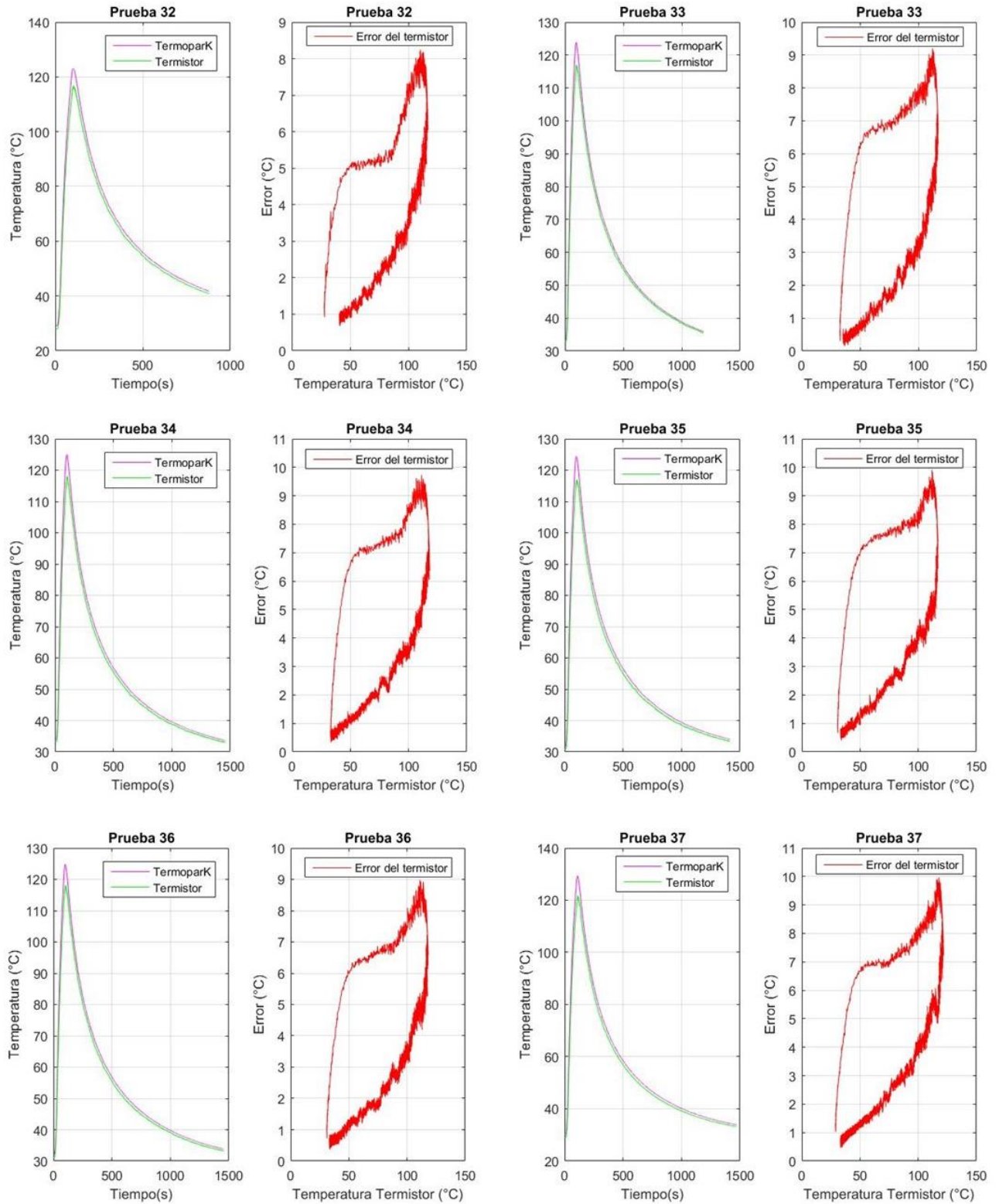


Figura 46 Gráficas resultantes de las pruebas 32 a 37 cuando $T_{ref}=110^{\circ}C$.

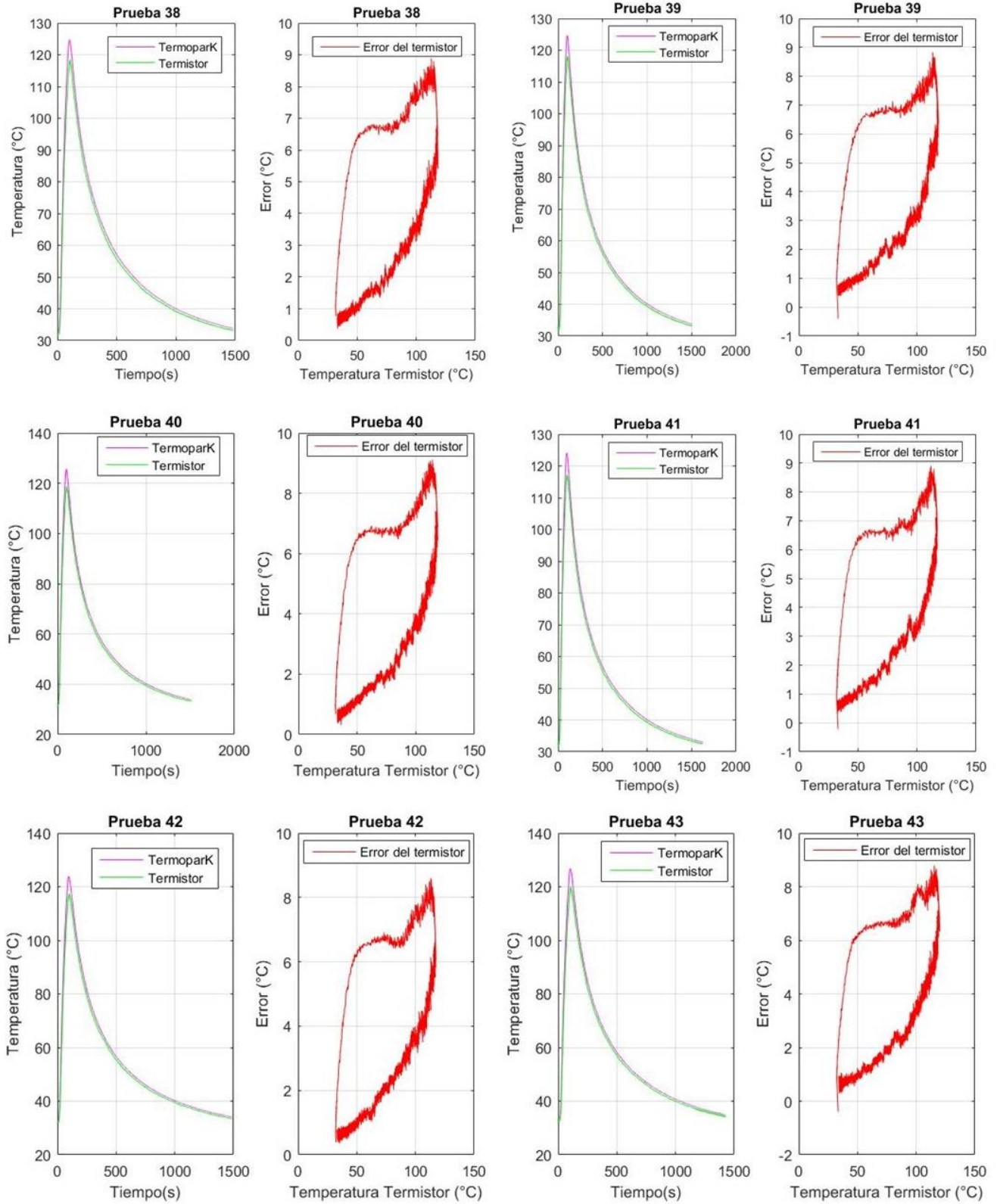


Figura 47 Gráficas resultantes de las pruebas 38 a 43 cuando $T_{ref}=110^{\circ}C$.

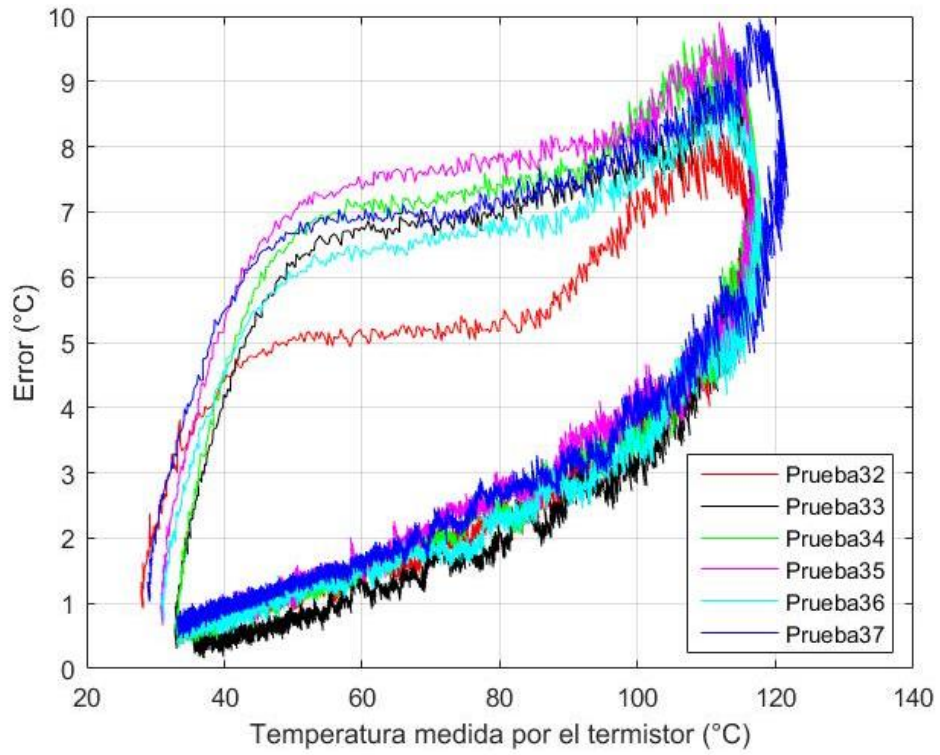


Figura 48 Gráfica comparativa Temperatura-Error de las pruebas 32 a la 37.

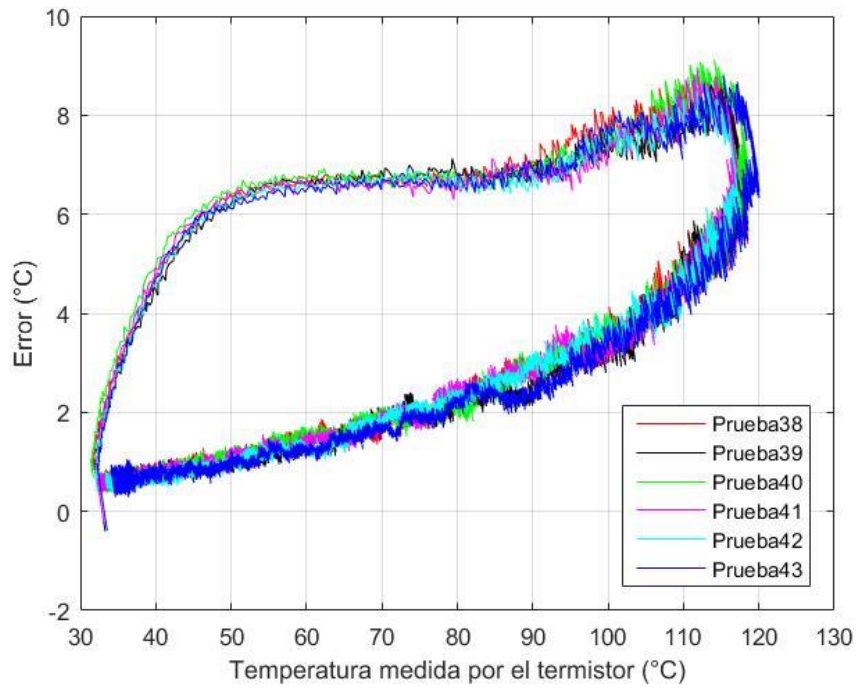


Figura 49 Gráfica comparativa Temperatura-Error de las pruebas 38 a la 43.

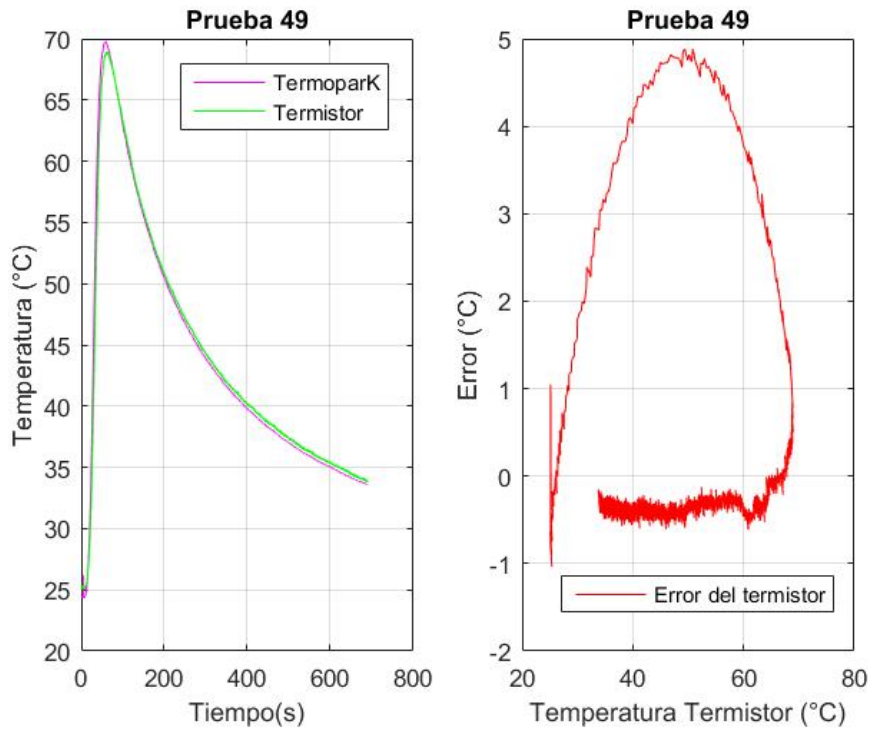


Figura 50 Gráficas resultantes de la prueba 49 cuando $T_{ref}=50^{\circ}\text{C}$.

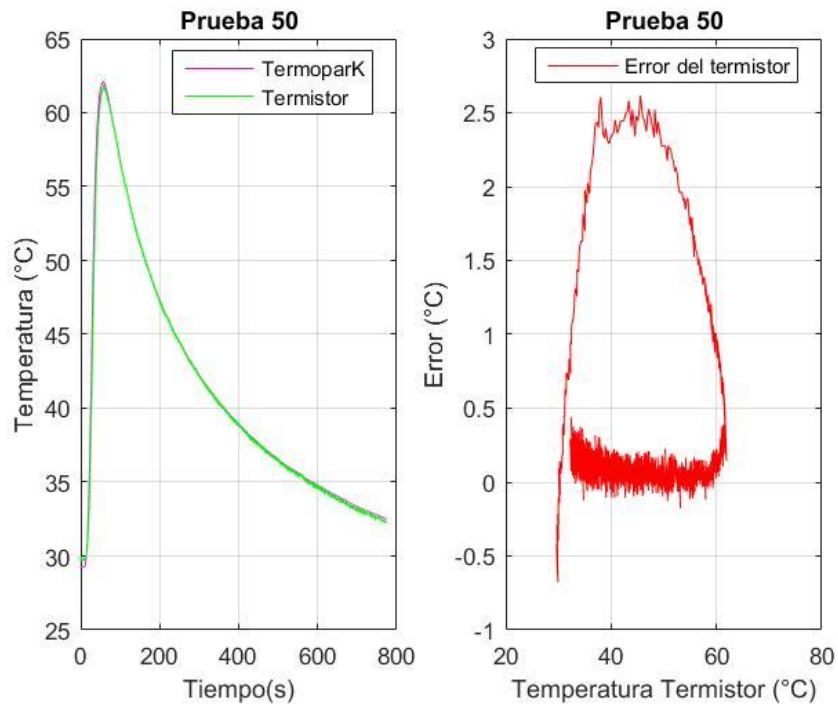


Figura 51 Gráficas resultantes de la prueba 50 cuando $T_{ref}=40^{\circ}\text{C}$.

4. Descripción de la planta y pruebas básicas de operación

4.1 Conexión de la planta

El sistema a controlar es un mecanismo de un grado de libertad en forma de T (ver Figura 52), que tiene posicionados en sus respectivos extremos un par de resortes de Nitinol para funcionar como actuadores, los cuales tienen un grosor de 0.45mm, una longitud de 25mm, un paso de 1mm y un diámetro interno de 6mm.

Las dimensiones del mecanismo pueden ser consultados en la Figura 53.

El sistema cuenta con dos variables de entrada para el programa de control: posición y temperatura. La primera es proporcionada por un sensor MPU-6050, el cual es colocado en la parte superior del mecanismo, ver Figura 52; y los datos de temperatura son tomados a partir del circuito medidor de temperatura. Como se observa en la Figura 54, cada sensor de temperatura está posicionado a la mitad del resorte, sujetado por medio de pequeños alambres en la superficie del material y cubiertos con pasta térmica para mejorar la transmisión de temperatura.

El sistema utiliza como variable de control un voltaje (U) a través de una etapa de potencia para después suministrar una diferencia de potencial en los extremos del resorte a controlar, provocando un subsecuente calentamiento gracias al flujo de corriente (Efecto Joule). Tomando en cuenta la ley de Ohm y la naturaleza de los resortes, el valor de la corriente ira en función tanto del voltaje a la salida de la etapa de potencia como de la temperatura del resorte, siendo el segundo, el factor que determina la resistencia del Nitinol.

La etapa de potencia es energizada mediante una fuente de voltaje constante de 12V con una corriente máxima de 10A y controlada mediante la salida PWM del myRio-1900. El valor de la variable de control (U) determina el voltaje a la salida del mecanismo, mediante el ciclo de trabajo del PWM, lo que permite controlar el flujo de corriente a través del elemento.

El valor del voltaje promedio que llegará a la salida del resorte se ve definido por la Ecuación 40, mientras que el voltaje rms se ve definido por la Ecuación 41.

$$V_{prom} = V_p * D \quad (40)$$

$$V_{rms} = V_p * \sqrt{D} \quad (41)$$

Las entradas de control están ubicadas en la zona izquierda de la placa, mientras que en la parte inferior se encuentran las salidas amplificadas. Para la realización de todas las pruebas posteriores, se utilizarán los puertos Vent2(+) y Vent3(+) como las entradas de la variable de control. Ver Figura 55. Es importante mencionar que, debido a las características del circuito de potencia, la señal de salida se ve invertida.

En la Figura 56, se puede observar el diagrama de conexión de cada uno de los elementos que componen el sistema, mientras que en la Figura 57 se muestran cada uno de los componentes ya instalados en la mesa de pruebas.

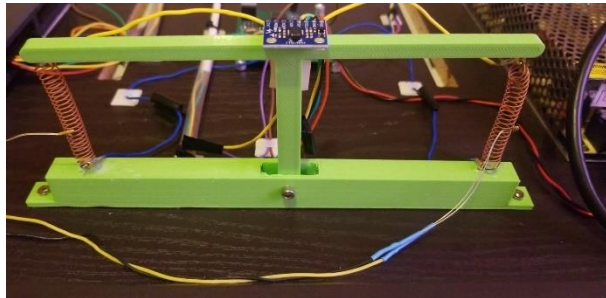


Figura 52 Mecanismo instalado en la mesa de pruebas.

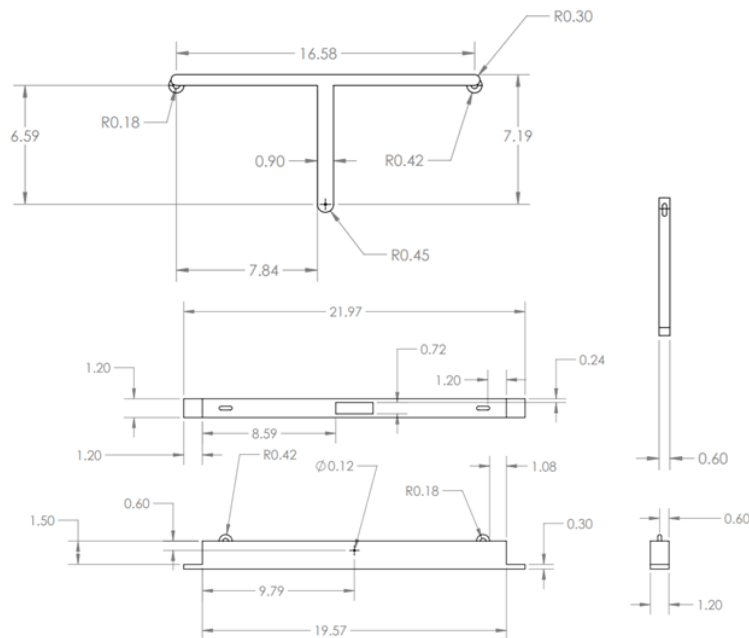


Figura 53 Dimensiones del mecanismo en centímetros.

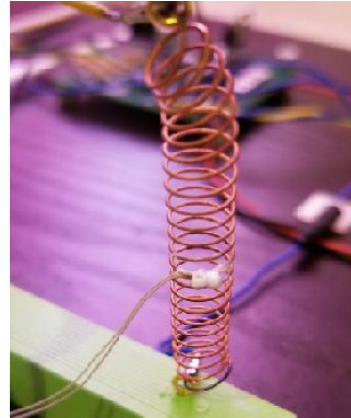
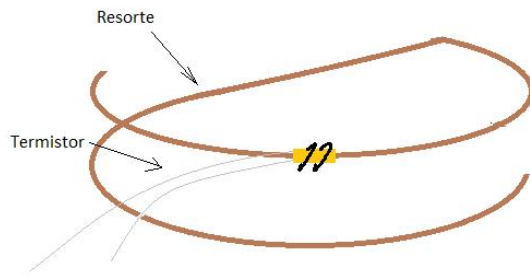


Figura 54 Diagrama e imagen del posicionamiento del termistor en el resorte.

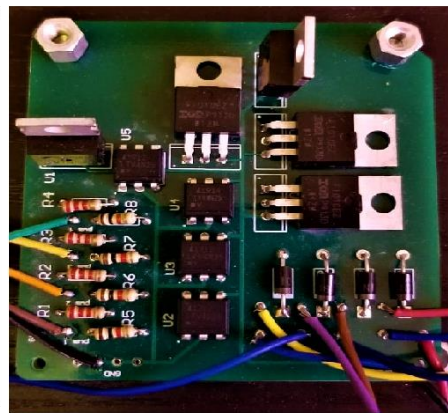
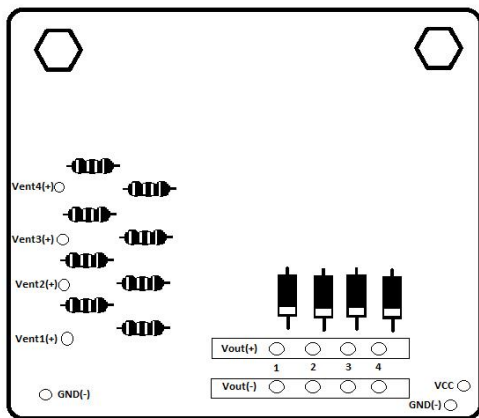


Figura 55 Diagrama e imagen de la etapa de potencia.

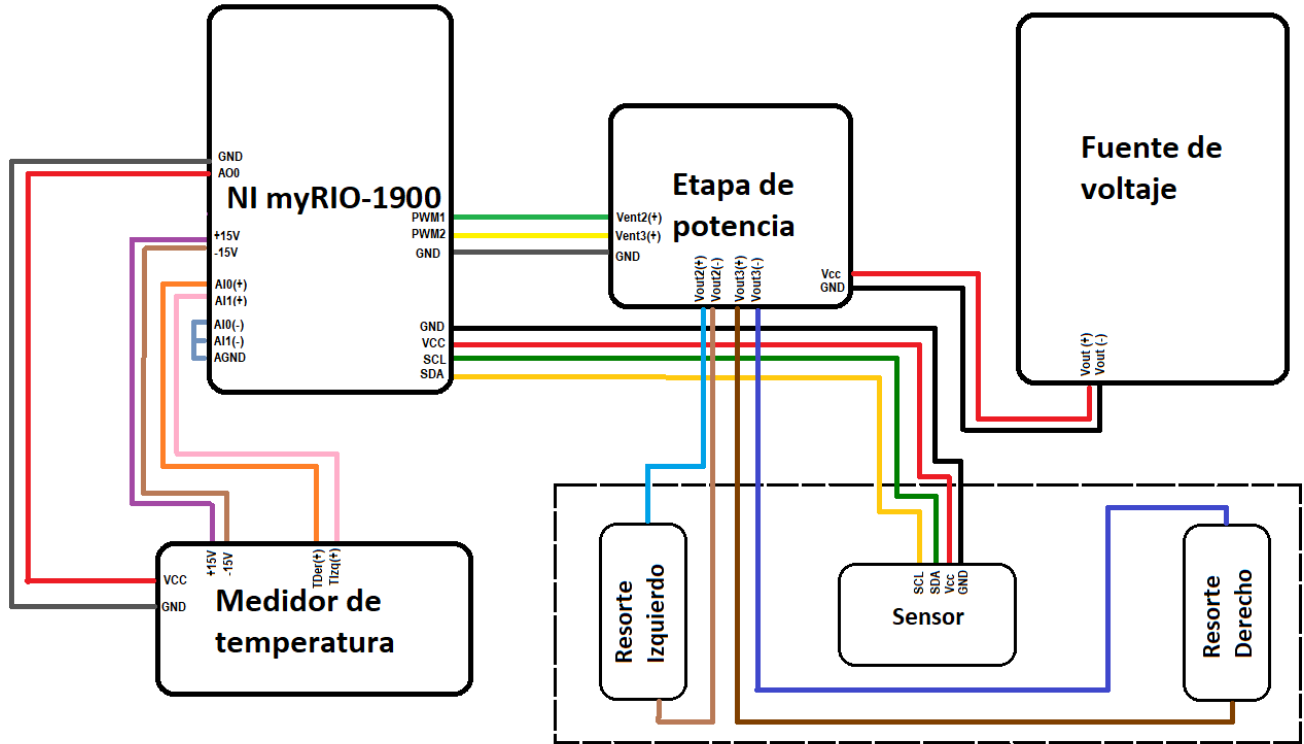


Figura 56 Diagrama de conexiones del sistema.

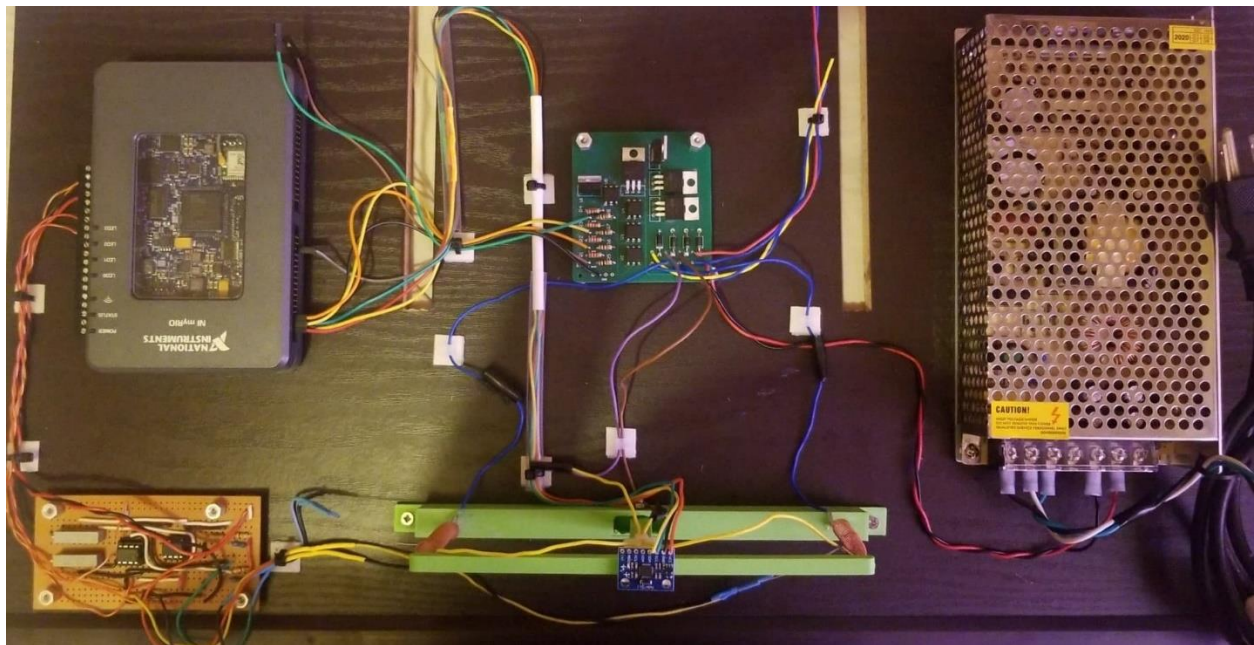


Figura 57 Prototipo de pruebas.

4.2 Programa básico de operación

El programa básico de operación está compuesto por dos VIs, los cuales se ejecutan dentro de la PC y del myRIO-1900 respectivamente.

El VI ejecutado dentro del dispositivo myRIO-1900 es el encargado de recibir la información proveniente de los sensores, así como de ejecutar acciones de control y procesamiento de datos, para después enviarlos a variables globales; mientras que la función principal del VI ejecutado en la PC es interactuar con el usuario, enviando datos a través de sus controles y mostrando los datos recibidos a través de las variables globales.

La interfaz de usuario, mostrada a través del panel frontal del VI ejecutado en el ordenador (Figura 58), cuenta con 4 gráficos, los cuales se encargan de mostrar los valores de 4 elementos: la temperatura en el resorte derecho e izquierdo, el valor del voltaje de control ' U ' a la salida de la etapa de potencia y la inclinación del mecanismo. Además, cuenta con un indicador que muestra el tiempo de ejecución actual del VI en el myRIO-1900, así como con un control denominado "Voltaje de operación", a través del cual se define el valor del voltaje de control ' U '. En la zona inferior izquierda de la interfaz de usuario se encuentra el control "Alimentación del driver" mediante el cual se define programáticamente el energizado o desenergizado de la etapa de potencia del sistema, es decir, si la entrada de control en la etapa de potencia puede o no ser diferente de cero. Adicionalmente, se incluyen dos botones de paro para concluir la ejecución de sus respectivos VIs.

Visto el programa desde el diagrama de bloques, ver Figura 59, antes de concluir el corrimiento del programa, se ejecuta un código en el cual se verifica, por seguridad, si el usuario a apagado la fuente de voltaje y si este desea guardar los datos en un archivo .txt.

La primera acción al ejecutar el programa de la myRIO-1900 es inicializar las variables, para después entrar a un lazo de simulación y control que llevará a cabo la captura y procesamiento de datos. Las tareas llevadas a cabo dentro de este lazo son 3: Medir la temperatura en cada resorte, leer los datos del sensor de posicionamiento y controlar el mecanismo.

Por motivos de comprensión, el código dentro del diagrama de bloques se encuentra dividido en 3 secciones; una por cada tarea. Ver Figura 60.

La primera sección se encarga de proveer al circuito medidor de temperatura de un voltaje constante de 0.9999V a través de la salida A00 del puerto C. Adicionalmente, recibe ambas señales de voltaje del medidor de temperatura para ser interpretadas, a través del subsistema “Termistores_sub” como señales de voltaje proporcionales a la temperatura de sus respectivos resortes.

Es importante señalar que para una salida voltaje de 0.9999V, el voltaje real medido con voltímetro a la salida A00 del puerto C es de 1.011V.

El subsistema “Termistores_sub” procesa los datos a través un “Mathscript Node” seguido de un filtro digital. Ver Figura 61.

Para información más detallada respecto al código dentro del subsistema “Termistores_Sub” ir al apartado “3. Diseño del circuito para el sensor de temperatura”.

En la sección #2 del diagrama de bloques, se da lectura a los datos recopilados por el MPU-6050 para ser interpretados como un ángulo de posición. En primera instancia, se inicializa el MPU-6050 para después proceder a dar lectura a los datos y procesarlos a través del subsistema “Giroscopio_Sub” (Figura 62). Para mayor información respecto a la inicialización del dispositivo y procesamiento de datos del MPU-6050 en el VI, ver el apartado “2.4 Programa para la lectura del sensor”.

La tercera sección es la encargada de controlar el voltaje a la salida de la etapa de potencia. Las líneas 29(PWM1) y 31(PWM2) del puerto A son configuradas al inicio del programa como salidas PWM, a una frecuencia de 500 Hz. El resorte ubicado al lado izquierdo del mecanismo se ve controlado por la línea 29, mientras que el resorte ubicado en el extremo derecho es controlado por la línea 31, como se puede observar en la Figura 60.

El subsistema “SalidasDeVoltaje_Sub” es el encargado de establecer el valor a la salida de voltaje de la etapa de potencia. Por motivos de seguridad, a través del diagrama de bloques se establece un código en el cual, si la temperatura de cualquier resorte

sobrepasa los 40°C o el usuario desactiva la etapa de potencia a través de la interfaz de usuario (cambiando el valor del control “Alimentación del driver”), el valor del voltaje a la salida será cero. Adicionalmente, cuenta con una función de saturación, en donde el valor máximo del ciclo de trabajo es de +/-2 (+/- 5.36V_{rms} o +/-2.4V_{prom}). Dentro de este subsistema se implementa programación textual, a través de la cual, dependiendo del signo de la señal de control se energiza uno u otro resorte. Ver Figura 63. Cuando el valor de U es positivo, el resorte izquierdo es energizado; caso contrario, se energiza el resorte ubicado al extremo derecho del mecanismo. Es importante mencionar que dentro de este código textual ya se tiene en consideración la inversión de señal por parte de la etapa de potencia.

Dentro del lazo de simulación y control se tiene un cuarto subsistema, el cual tiene la tarea de funcionar como un reloj en el sistema. En términos generales, el lazo de simulación y control se ejecuta cada 3 milisegundos utilizando una fuente de reloj de 1kHz.

Al concluir la ejecución del lazo de simulación y control, el programa mantiene una señal constante de 1 en ambos PWM para proteger al sistema en general de un sobrecalentamiento debido a la inversión de señal de la etapa de potencia.

Para verificar el funcionamiento general del programa, se realizaron 4 pruebas en las cuales se varió el valor del “voltaje de operación” a través de la interfaz de usuario. Los resultados de cada una de las pruebas se pueden observar en la Figura 64, Figura 65, Figura 66 y Figura 67.

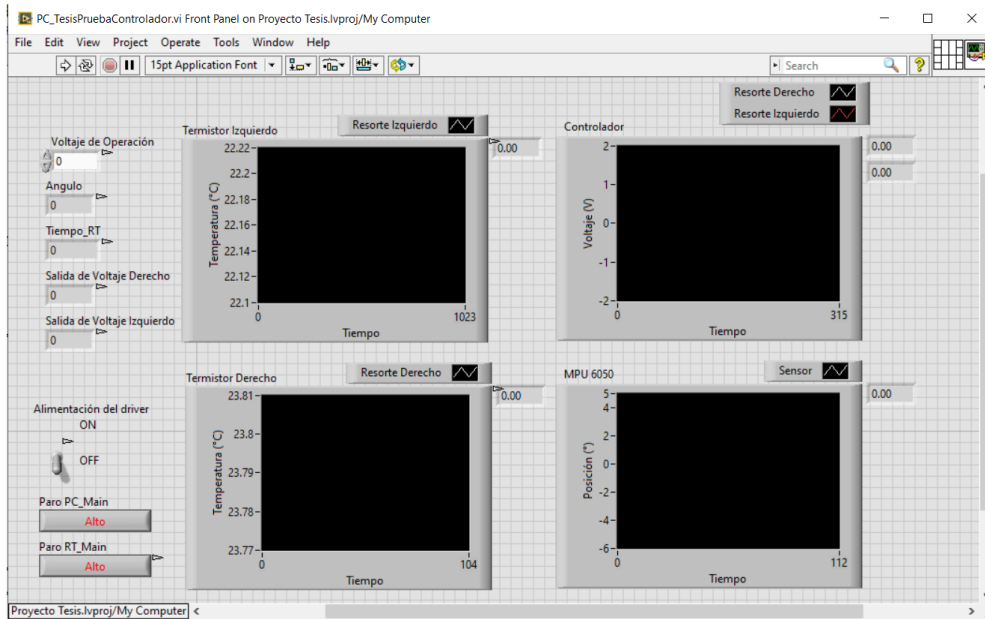


Figura 58 Panel frontal del programa ejecutado en el ordenador.

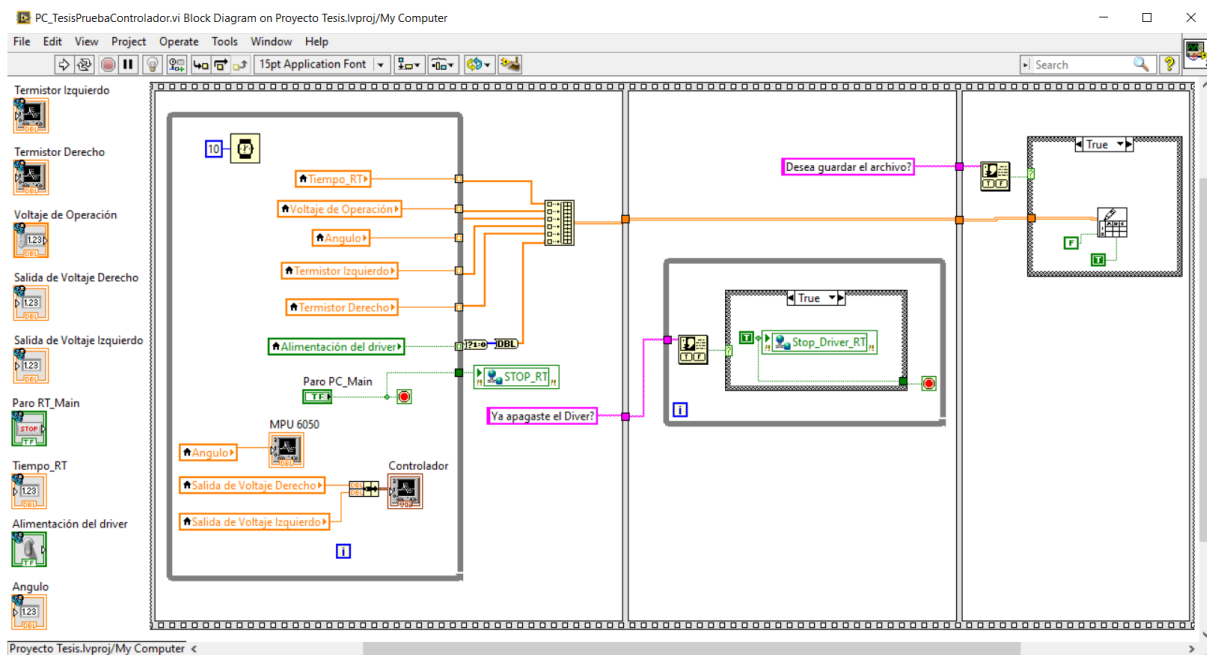


Figura 59 Diagrama de bloques del programa ejecutado en el ordenador.

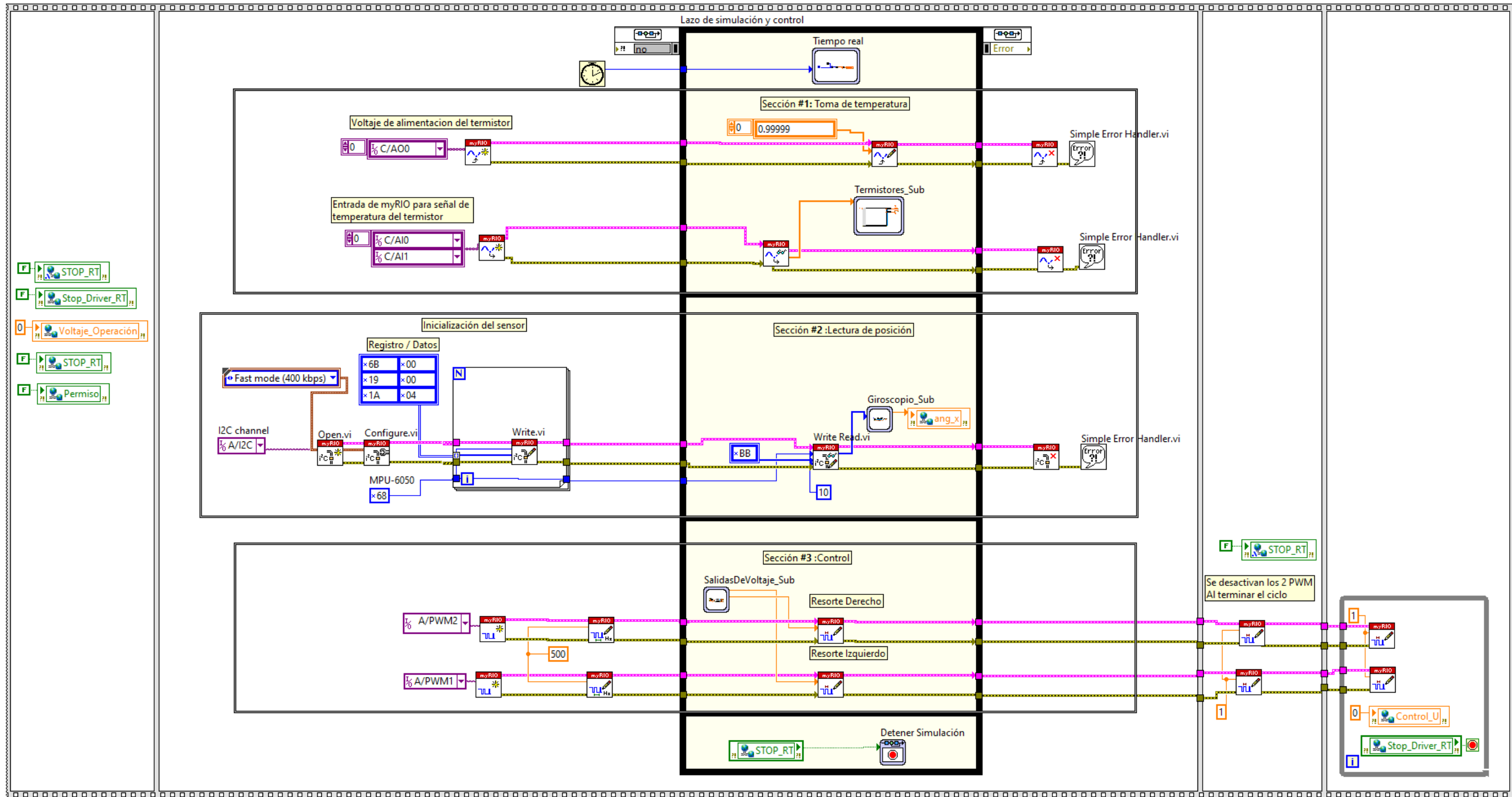


Figura 60 Diagrama de bloques del VI ejecutado en el dispositivo myRIO-1900 del programa básico.

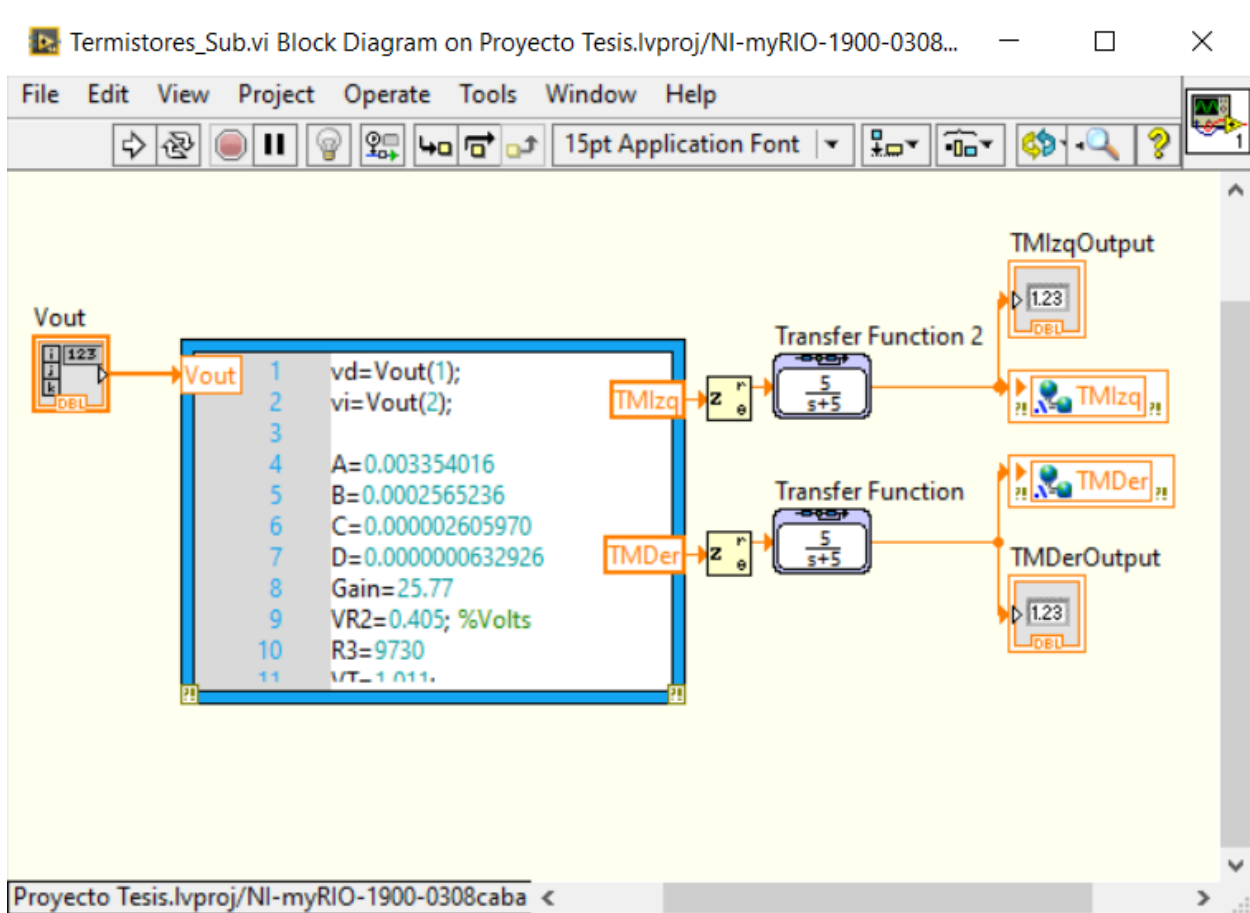


Figura 61 Diagrama de bloques del subsistema "Termistores_Sub".

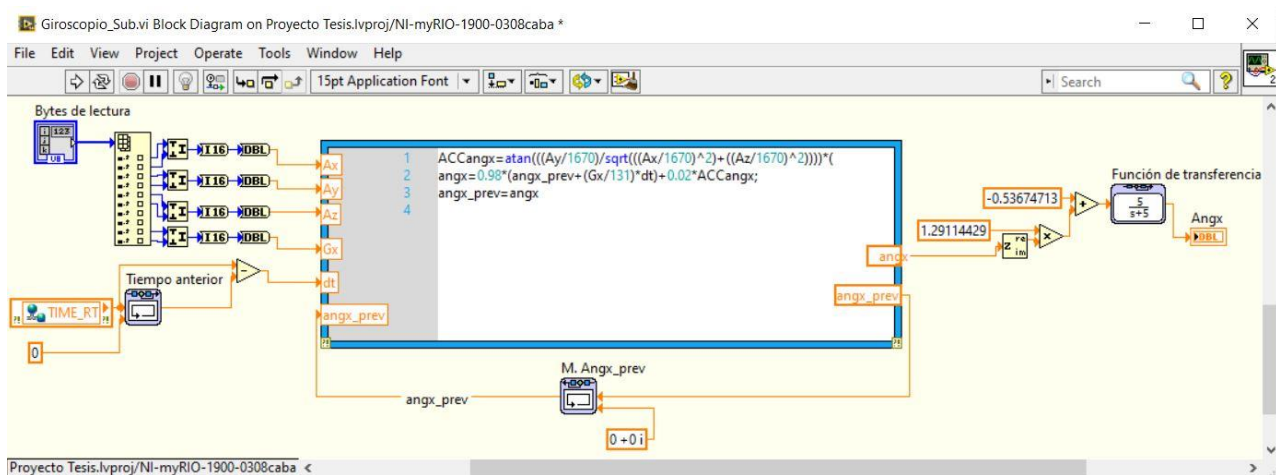


Figura 62 Diagrama de bloques del subsistema "Giroscopio_Sub".

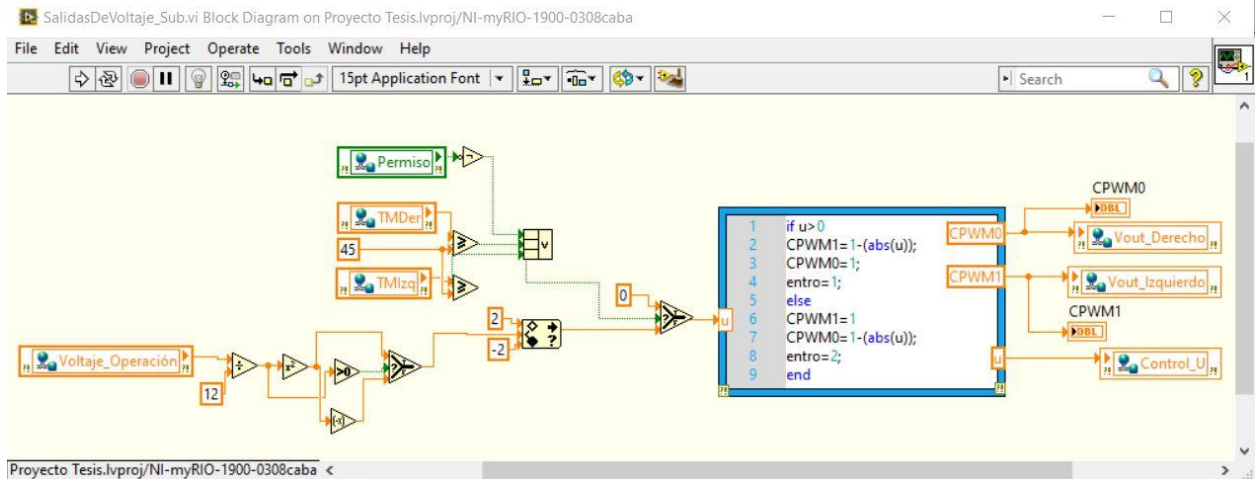


Figura 63 Diagrama de bloques del subsistema "SalidasDeVoltaje_Sub".

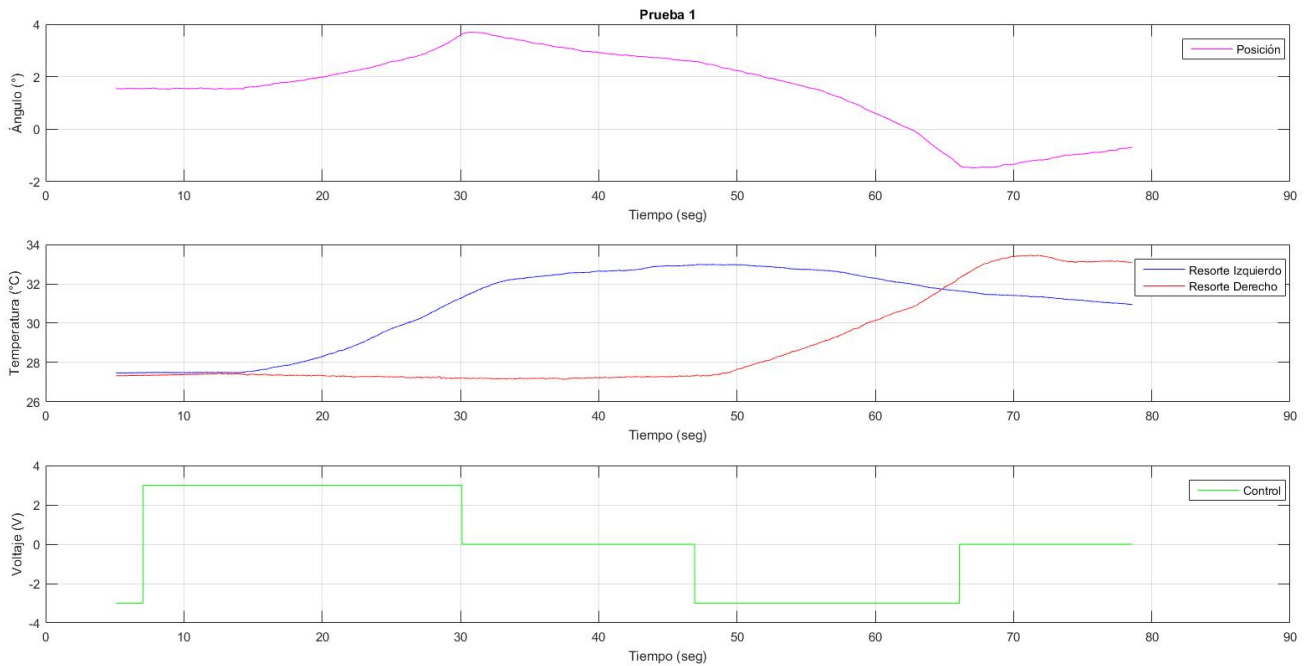


Figura 64 Gráfico resultante de la prueba 1, con una señal $U = +/- 3V$.

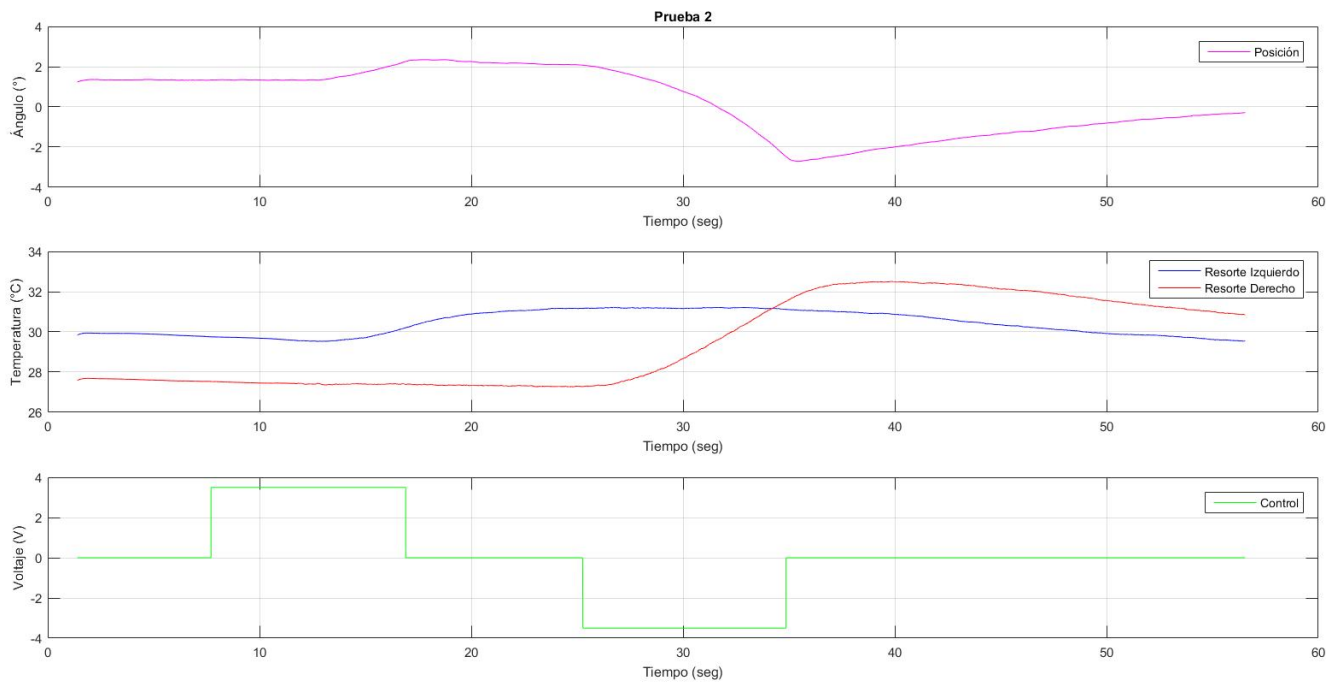


Figura 65 Gráfico resultante de la prueba 2, con una señal $U=+/-3.5V$.

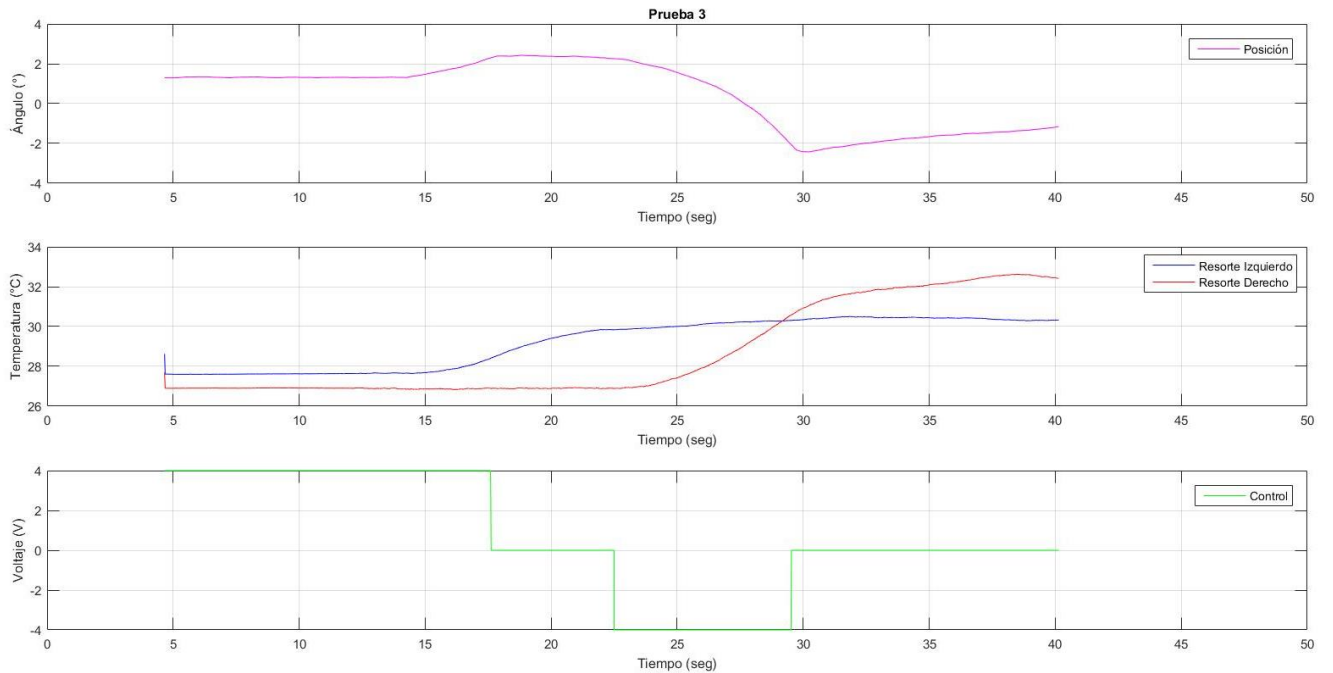


Figura 66 Gráfico resultante de la prueba 3, con una señal $U=+/-4V$.

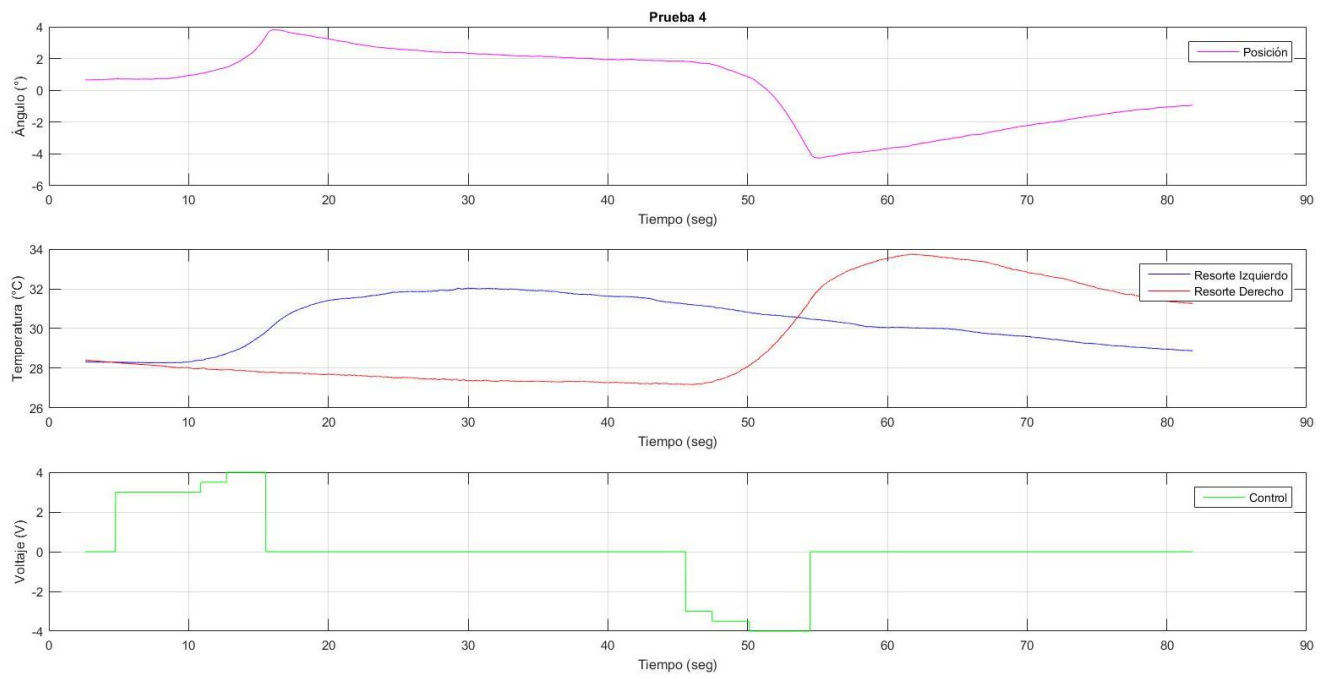


Figura 67 Gráfico resultante de la prueba 4, con una señal U de magnitud variable.

5. Diseño del algoritmo de control y pruebas de desempeño

5.1 Objetivo de control

El objetivo de este trabajo es tener un sistema de control de posicionamiento funcional, bajo condiciones específicas, para el mecanismo descrito al inicio de la sección “4. Descripción de la planta y pruebas básicas de operación”. El sistema deberá llegar a una posición determinada por el usuario dentro del rango de $\pm 4^\circ$ en el menor tiempo posible, tomando en consideración la temperatura de operación de cada uno de los resortes para extender la vida de los mismos. A partir de los datos del fabricante, conocemos que la temperatura A_f de los resortes de Nitinol es de 45°C , sin embargo, debido al diferencial entre la temperatura medida por los termistores colocados en los sensores y la temperatura real, la temperatura máxima de operación definida en el programa será de 40°C . Adicionalmente, se estableció un voltaje máximo de 6.5V definido programáticamente dentro de los VIs.

Debido a la naturaleza del Nitinol, la temperatura ambiente jugará un papel determinante en el comportamiento del mecanismo, por lo que, para efectos de este trabajo, la planta se encontrará bajo una temperatura ambiente de entre 15°C y 18°C con un flujo de aire constante.

5.2 Diseño y pruebas de desempeño del sistema incorporando un controlador PID

El programa básico de operación de la sección anterior es modificado con el fin de considerar las variables de temperatura y voltaje del objetivo de control. Para esto, se incorpora al programa básico el subsistema “Control_Estados_Sub”, con el objetivo de delimitar el programa en 4 estados: Inicio, Estado Izquierdo, Estado Derecho y Seguridad; así como un controlador PID bajo el subsistema “Control_PID_Sub”, para definir el voltaje que llegará a los resortes. Adicionalmente el subsistema “SalidaDeVoltaje_Sub” se ve ligeramente modificado, por lo que es renombrado como “Voltaje_Salida_Sub”. El panel frontal y los diagramas de bloques del programa de control se muestran en la Figura 68, Figura 69 y Figura 70.

El código dentro del subsistema “Control_Estados_Sub” utiliza una máquina de estados para definir la secuencia de ejecución de los 4 estados. Ver Figura 71. Para efectos prácticos, se denominará como controlador o etapa de control a la máquina de estados dentro del subsistema.

“Inicio” es el estado inicial de la etapa de control, en donde la salida de voltaje se encuentra desactivada ($PV_{Out} = 0$). Al tener un diferencial positivo entre la posición del mecanismo y la posición de referencia ($e > 0$) se entra al estado “Izquierdo”, en donde la salida de voltaje correspondiente al resorte izquierdo se activa y el del resorte derecho permanece en cero. En caso de que el diferencial de posición sea negativo ($e < 0$), el controlador entra al estado “Derecho” y activa la salida de voltaje correspondiente al resorte derecho, permaneciendo en cero el voltaje del resorte izquierdo. Es importante mencionar que existe una condicionante para entrar a estos dos últimos estados: la temperatura del resorte correspondiente al estado contrario (derecho o izquierdo) debe de ser menor a la temperatura límite definida por el usuario ($TD < T_{lim}$ o $TI < T_{lim}$). El controlador regresará a inicio solo en caso de que el diferencial de error sea menor al especificado ($\Delta e < e$). En caso de que la temperatura del resorte correspondiente al estado del controlador sea mayor a la temperatura máxima de seguridad especificada por el usuario ($TD > T_{max}$ o $TI > T_{max}$), el programa entrará al estado “seguridad” del cual no podrá salir hasta que se presione el botón de RESET dentro de la interfaz de usuario ($Reset = 1$). Ver Figura 73.

Para determinar el valor de la variable de control cuando la máquina de estados se encuentra en el estado “Derecho” o en el estado “Izquierdo” se utiliza el controlador PID dentro del subsistema “Control_PID_Sub” (Figura 72). Es importante mencionar que cuando existe un cambio de estado tanto el integrador como el derivador del controlador son reestablecidos.

Como se mencionó anteriormente el subsistema “SalidaDeVoltaje_Sub” fue sustituido por “Voltaje_Salida_Sub”, dentro del cual, la magnitud del voltaje que llegará a los resortes de Nitinol es determinado por la salida del PID. Adicionalmente, dentro de este subsistema, se dio al usuario la capacidad de modificar el valor del voltaje de saturación. Ver Figura 74.

Para encontrar el valor óptimo de las ganancias del controlador y voltaje de saturación se realizaron 2 tipos de pruebas: A y B.

La prueba “A” consiste en observar el comportamiento del mecanismo cuando se ve sometido a diferentes magnitudes de voltaje constante, utilizando como referencia de posición los valores de $\pm 4^\circ$, es decir, en el momento en que el mecanismo llegue a la posición de 4° , la referencia cambiará a -4° y viceversa. Ver Figura 75. A partir de los resultados obtenidos, se elegirá la prueba con mejor desempeño para ingresar sus variables (Voltaje límite y Temperatura límite) en la prueba “B”.

Para realizar la prueba “A”, la sección #3 del programa de control fue modificada. Con el objetivo de determinar el valor de la referencia, se añadieron al programa líneas de código a través de la función “Mathscript Node”, como se puede observar en la Figura 76; mientras que el valor del voltaje de operación es definido a través del panel frontal.

Debido a que se pretende manejar un voltaje de manera constante, el controlador PID no fue integrado en el programa de esta prueba.

El valor de las variables de cada una de las pruebas “A”, se puede consultar en la Tabla 18.

Las gráficas de resultados de cada una de las pruebas “A” se pueden consultar en el anexo A de este trabajo.

La duración promedio del periodo de cada una de las pruebas “A” a partir del segundo periodo se muestra en la Tabla 19. Dentro de la misma tabla se resalta la prueba “A” que obtuvo un mejor desempeño en términos de duración promedio del periodo.

Número de prueba	Temperatura límite (°C)	Voltaje constante (V)
1	25	3.75
2	30	3.75
3	35	3.75
4	25	4
5	30	4
6	35	4
7	25	4.25
8	30	4.25
9	35	4.25
10	25	4.5
11	30	4.5
12	35	4.5
13	25	4.75
14	30	4.75
15	35	4.75
16	25	5
17	30	5
18	35	5
19	25	5.25
20	30	5.25

Tabla 18 Variables de cada prueba "A".

	25	30	35
3.75	36.235	14.8782	16.456
4	22.4477	8.9623	7.4125
4.25	16.0039	8.3317	6.9968
4.5	11.8674	8.0292	7.2826
4.75	12.7511	8.9047	FALLO
5	11.4919	9.5597	FALLO
5.25	11.5941	FALLO	-

Tabla 19 Duración promedio del periodo de cada prueba "A".

La prueba "B" retoma los valores de las variables de la prueba "A" con mejor desempeño y las combina con diversas ganancias del PID para determinar la mejor combinación.

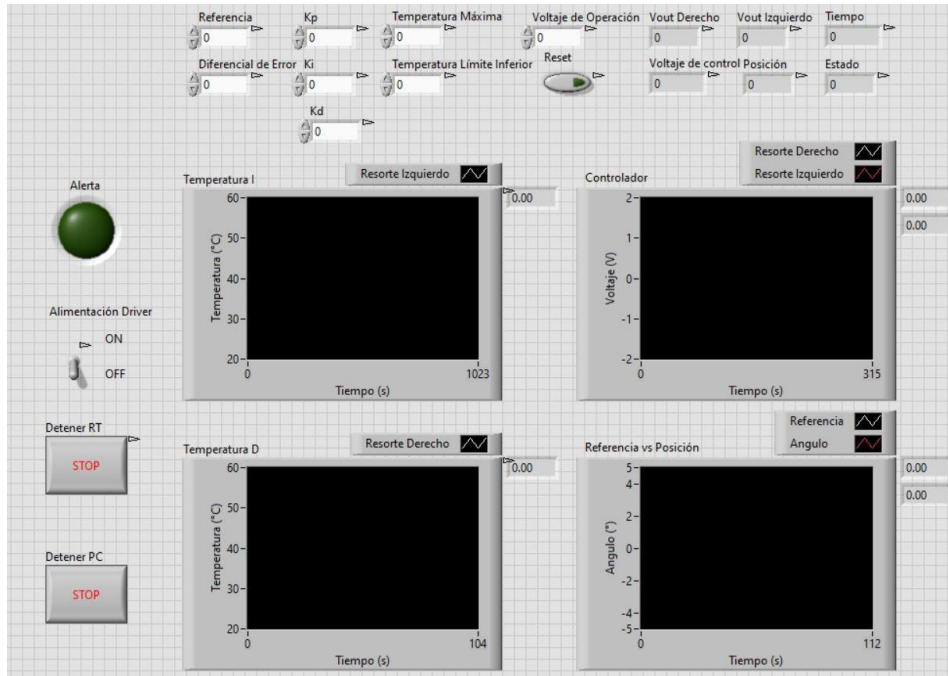


Figura 68 Interfaz de usuario del programa de control.

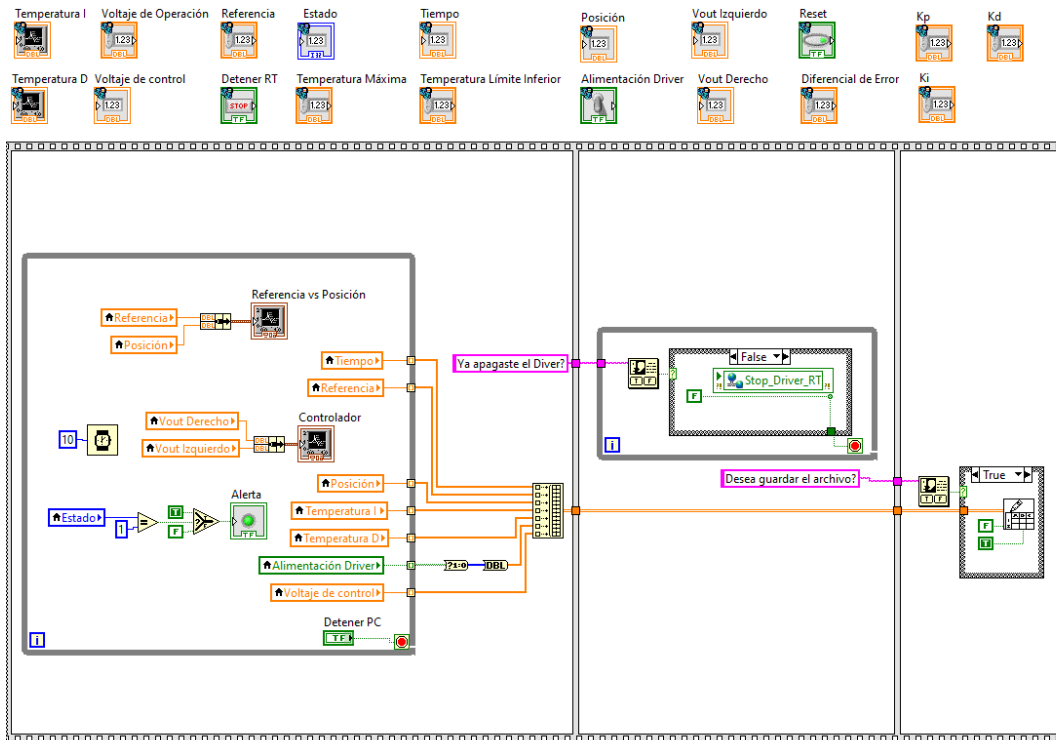


Figura 69 Diagrama de bloques del programa de control ejecutado en la PC.

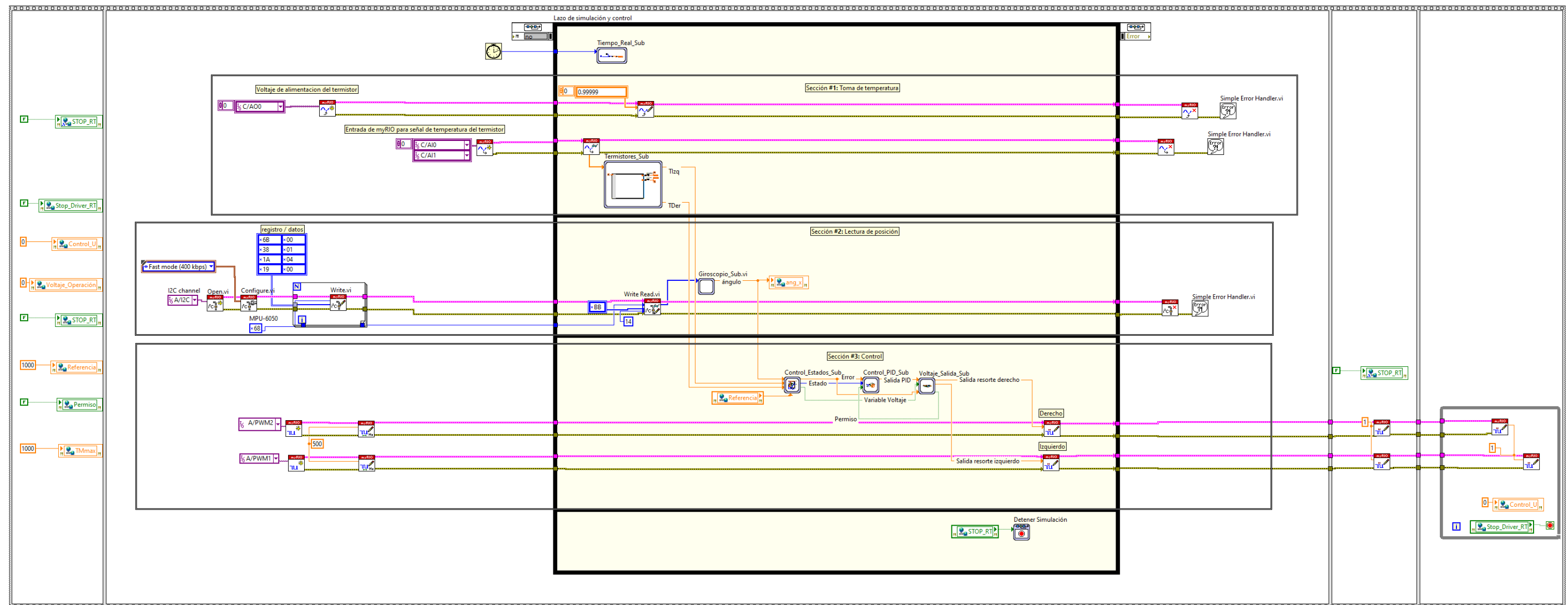


Figura 70 Diagrama de bloques del programa de control ejecutado en el dispositivo myRio1900.

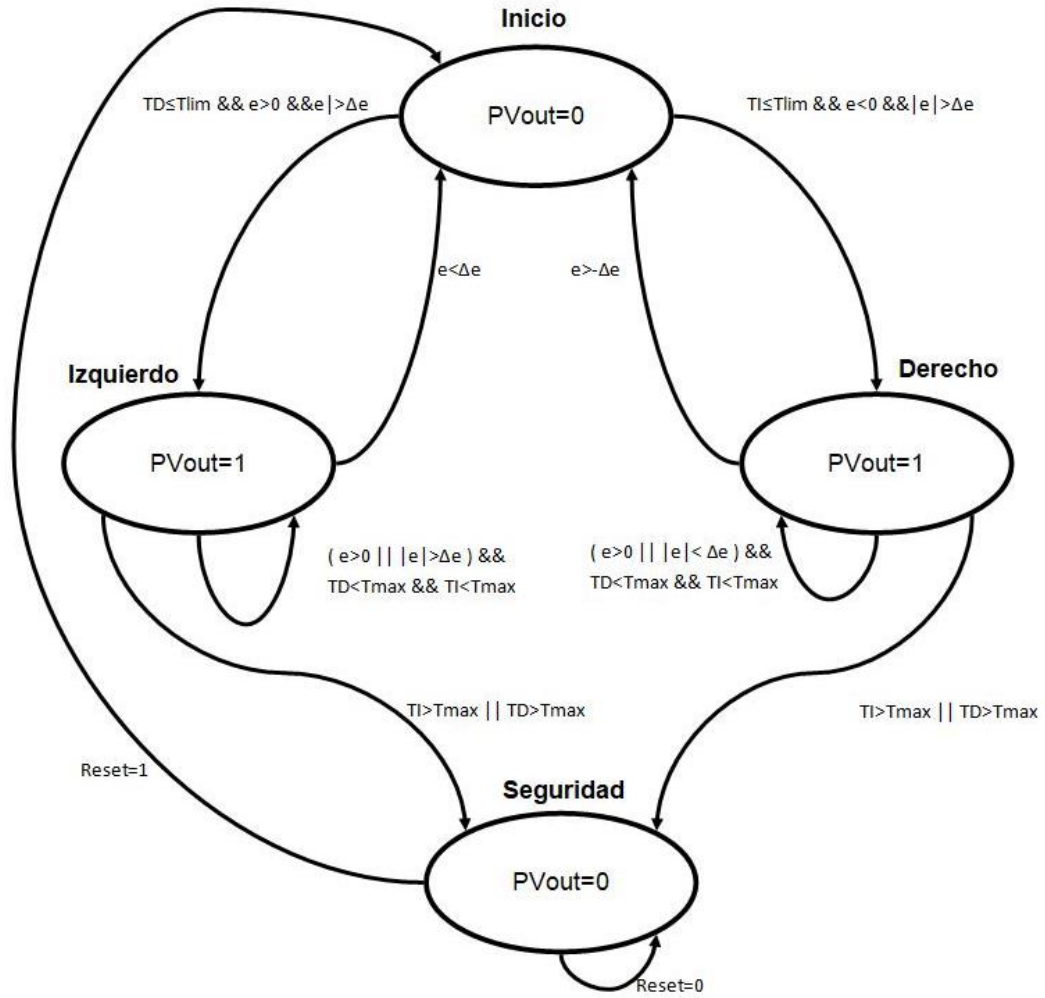


Figura 71 Diagrama de estados del controlador de la variable U.

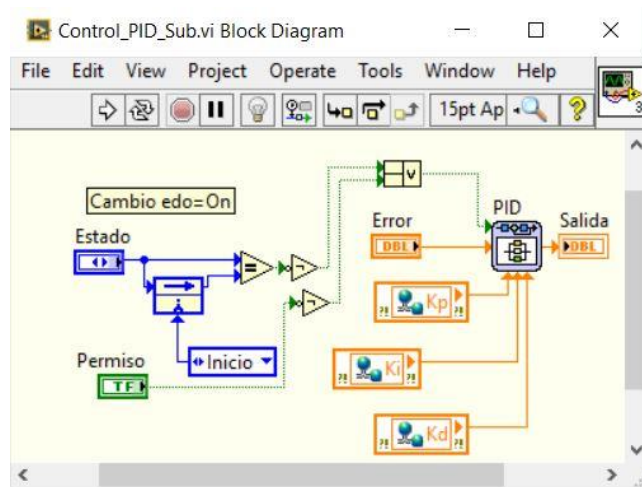


Figura 72 Subsistema "Control_PID_Sub".

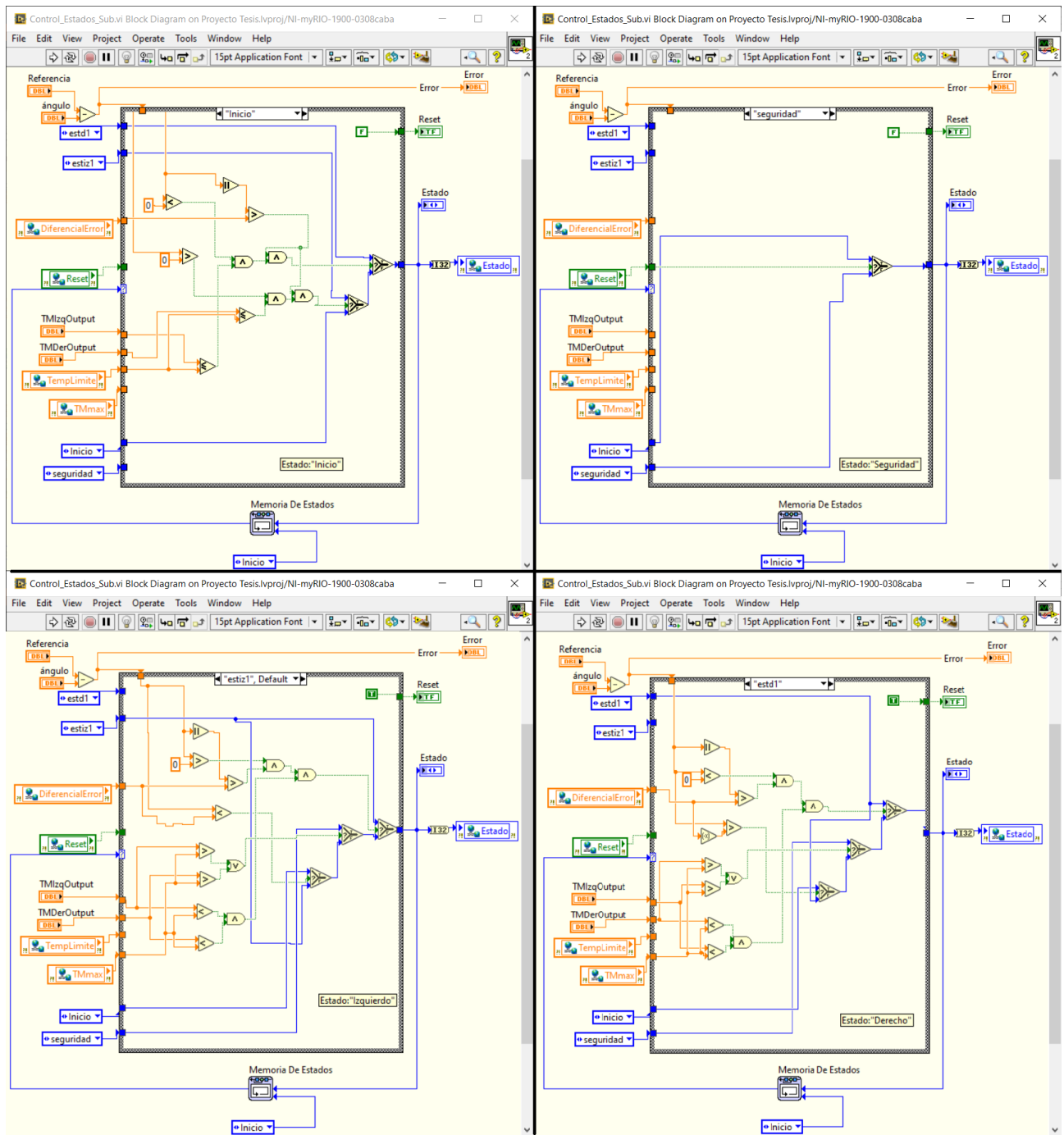


Figura 73 Subsistema "Control_Estados_Sub".

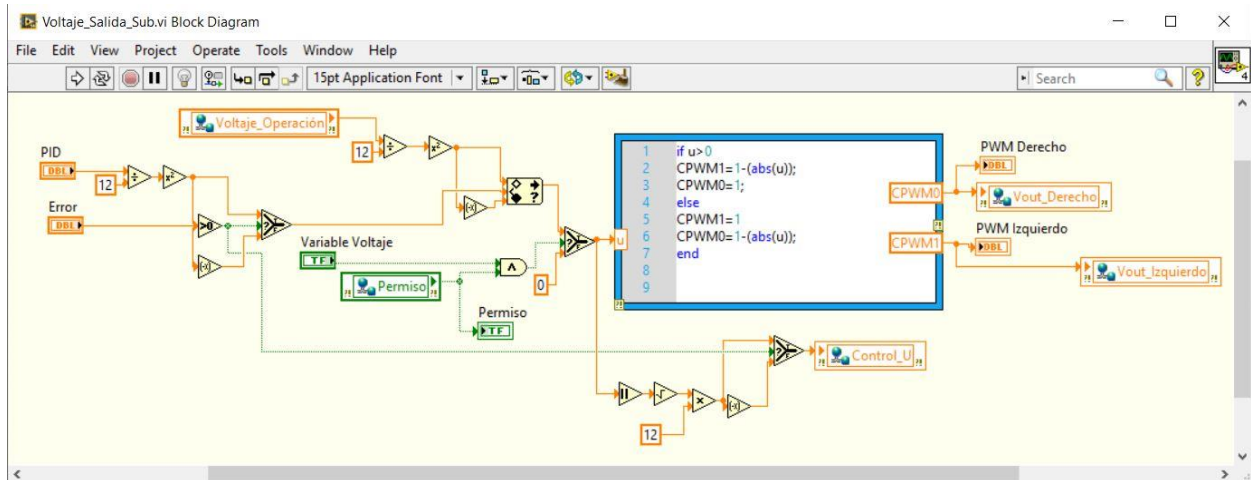


Figura 74 Subsistema "Voltaje_Salida_Sub".

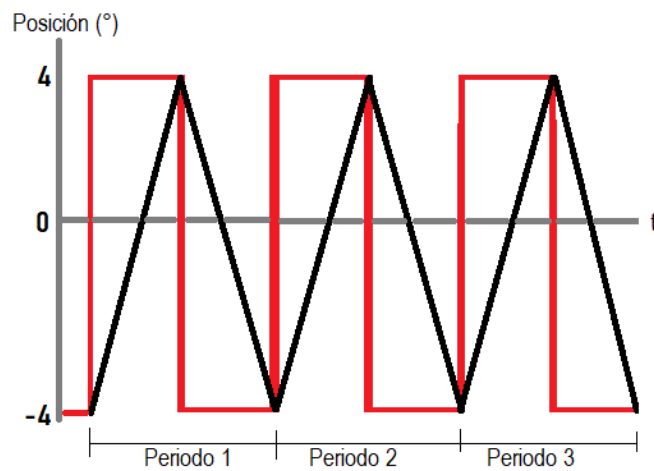


Figura 75 Ejemplo ilustrativo de la trayectoria esperada del sistema en la prueba A, mostrándose en el gráfico la referencia (rojo) y la posición angular del mecanismo (negro).

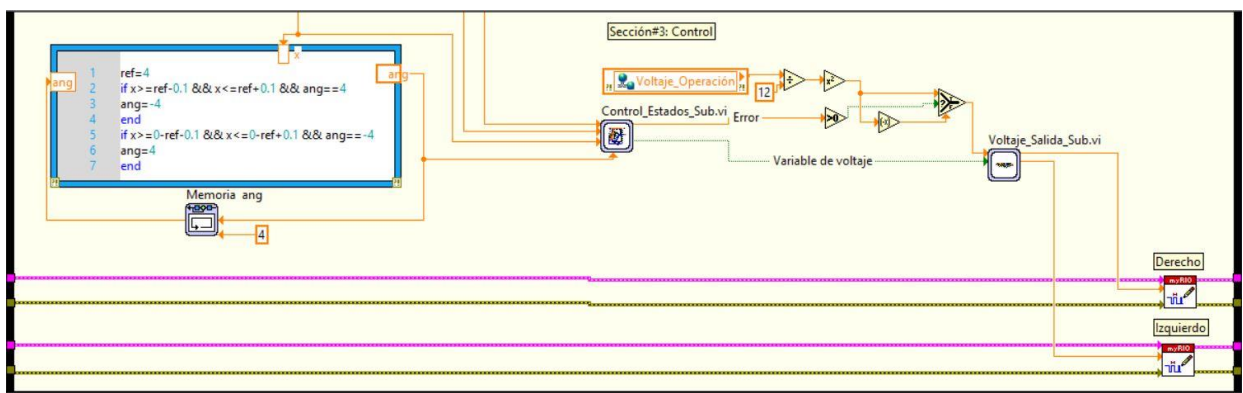


Figura 76 Sección #3 del diagrama de bloques de la prueba "A".

Para la ejecución de esta prueba se establece un periodo de 100 segundos en donde, a la mitad e inicio de cada periodo, existe un cambio en la referencia de $+4^\circ$ a -4° y viceversa. Ver Figura 77.

Se retoma el programa de control descrito al inicio de esta sección y se incorpora el subsistema “Referencia_Sub” en la sección #3 para determinar el cambio de referencia cada medio periodo. En la Figura 78 se muestra la tercera sección del diagrama de bloques de esta prueba y en la Figura 79 una imagen del subsistema “Referencia_Sub”. Una descripción del código dentro del subsistema se muestra a continuación:

```
if P==false %El programa iniciará solo cuando el usuario active el interruptor “Alimentación Driver”
t1=0
t2=0
ang=0
c=0
else
if b==0
T=t
b=1
end
t1=(T+(s*c)) %Representa el tiempo en el que inicia el medio periodo
t2=(T+(s*(c+1))) %Representa el tiempo en el que finaliza el medio periodo
ang=0 %Se inicializa la variable de referencia del ángulo en cero
if t>=t1&& t<t2 %Si el “tiempo actual” se encuentra fuera del rango t1 y t2 existirá un cambio en la referencia.
if rem(c,2)==0
ang=4
else
ang=-4
end
else
c=c+1
end
end
```

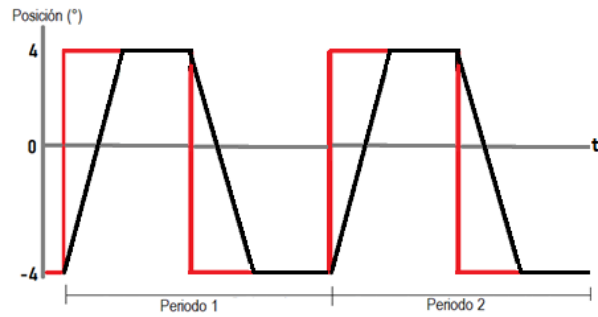


Figura 77 Ejemplo ilustrativo de la trayectoria esperada del sistema en la prueba B, mostrándose en el gráfico la referencia (rojo) y la posición angular del mecanismo (negro).

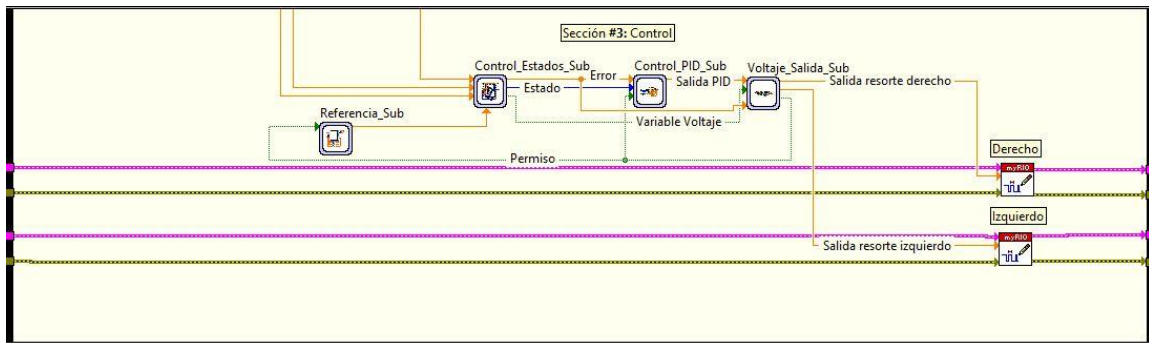


Figura 78 Sección #3 del diagrama de bloques de la prueba "B".

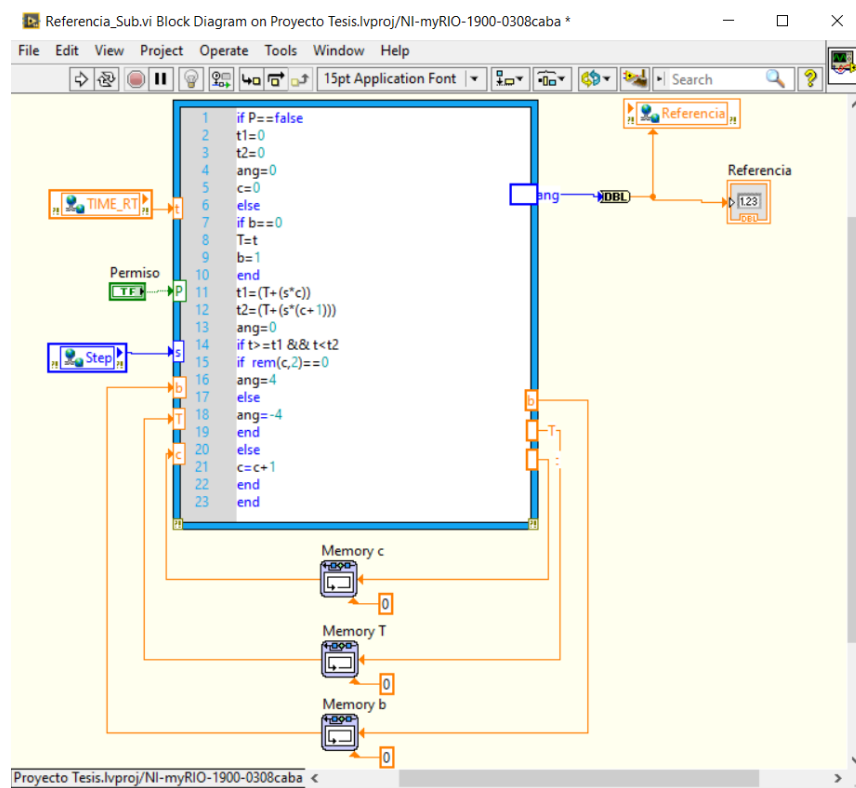


Figura 79 Subsistema "Referencia_Sub".

Para la elección de las ganancias óptimas se tomó como criterio la magnitud del error y la duración del mismo. A través de un software de análisis de datos se calculó el área bajo la curva de la posición del mecanismo durante 2 periodos a partir del segundo 50 de ejecución y se restó el resultado al área bajo la curva de la referencia. En esta ocasión la ventana de error fue variable, tomando los valores de $\pm 0^\circ$ para la mitad de las pruebas y $\pm 0.1^\circ$ para el resto. Los resultados de cada una de las pruebas se pueden observar en la Tabla 20.

Las gráficas de cada una de las pruebas "B" se pueden consultar en el anexo B de este trabajo.

Prueba	KP	KI	KD	Ventana de error	Temperatura inicial (°C)	Tmax izquierdo	Tmax Derecho	Angulo de inicio	Diferencial del área bajo la curva (Ref-Ang)
1	15	10	4	0	16.3	31.93	29.236	-0.299	188.0342
2				0.1	15.285	29.869	29.478	-0.304	202.1104
3	20	8	5	0	15.09	31.061	28.948	-0.269	193.5986
4				0.1	15.176	30.99	20.19	-0.089	207.8931
5	20	6	3	0	15.485	31.863	29.425	-0.368	190.5304
6				0.1	15.775	31.544	29.366	-0.278	198.4709
7	14	5	2	0	16.21	31.872	29.591	-0.427	180.6192
8				0.1	16.69	31.203	29.693	0.336	195.3224
9	15	8	5	0	16.282	32.341	29.621	-0.294	190.5301
10				0.1	16.723	32.58	29.27	-0.285	209.7566

Tabla 20 Variables y resultados de las pruebas "B".

6. Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo de tesis se implementó un sistema de control basado en un PID para determinar la posición angular de un mecanismo de un grado de libertad, cuyo sistema de actuación se basa en un par de resortes de Nitinol posicionados en ambos extremos del mecanismo, tomando en consideración límites de temperatura y voltaje.

A través de las pruebas realizadas en la sección 5.2 se pueden inferir dos cosas. La primera es que, debido a la lenta respuesta del sistema, no utilizar una ventana de error ($DE=0$) mejora la respuesta general de este, independientemente de la temperatura ambiente, ganancias del controlador o posición angular inicial. La segunda conclusión es, que la temperatura ambiente juega un papel crítico para la determinación de las ganancias del controlador, como se puede observar en el gráfico de la Figura 80, en donde a mayor temperatura, menor es la acumulación de error. Sin embargo, para esta última inferencia, es necesario realizar pruebas adicionales, debido a que, de 10 pruebas, 3 (prueba 7, prueba 9 y prueba 10) no siguieron este comportamiento, por lo que trabajo futuro adicional se debe realizar para confirmar este comportamiento.

En el área de adquisición y procesamiento de señales, así como en la tarea de control, el dispositivo myRio realizó un buen trabajo gracias a la utilización del módulo Real-Time de Labview. En lo que respecta al sensor de posición angular MPU-6050 lo ideal sería sustituirlo por un dispositivo que ya tenga integrado algoritmos de procesamiento de señales más avanzados de manera embebida, como el filtro Kahlman, para la obtención de señales más limpias y precisas, así como ahorrar tiempo de procesamiento en caso de que se deseen procesar más módulos. Adicionalmente, debido a la sensibilidad del sistema, sustituir el método de comunicación por uno inalámbrico sería lo indicado para evitar añadir perturbaciones mecánicas al sistema.

La medición de temperatura se realizó a través de un par de termistores NTCLE317E4103SBA cuyo pequeño tamaño los hacen útiles debido a la reducida superficie de los elementos de actuación; sin embargo, sensores con mejor precisión y exactitud, de tamaño reducido, así como una menor constante de tiempo, sería preferible.

En términos generales, la implementación de un controlador PID que tome en cuenta límites de voltaje para la preservación de los actuadores de Nitinol a la vez que se toma en consideración la temperatura como factor de respuesta, presenta una alternativa factible para el control de mecanismos basados en estos materiales.

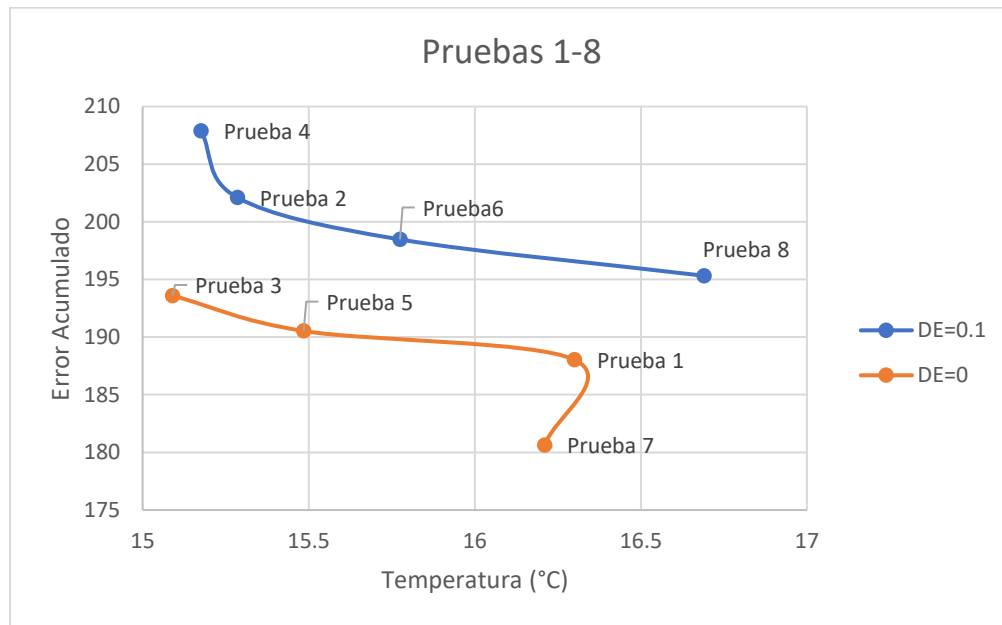


Figura 80 Gráfico de las pruebas 1 a la 8 en donde se relaciona la temperatura inicial del sensor con el error acumulado.

Referencias

- 1 R. Featherstone & Y. H. Teh (2006). Improving the Speed of Shape Memory Alloy Actuators by Faster Electrical Heating. Springer Berlin Heidelberg 21(1), 67–76. https://doi.org/10.1007/11552246_7
- 2 Kuribayashi, K. (1991). Improvement of the Response of an SMA Actuator Using a Temperature Sensor. The International Journal of Robotics Research, 10(1), 13–20. <https://doi.org/10.1177/027836499101000102>
- 3 Kumar, P. (2008). Introduction to Shape Memory Alloys. En Lagoudas D. (Ed.) *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8_1.
- 4 Wayman, C. y Duering, T. (1990). An Introduction to Martensite and Shape Memory. En T. Duering, K. Melton, D. Stöckel y C. Wayman (Eds.), *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1009-4.50005-6>
- 5 Kellogg, J. (2020). *Nitinol in plain language*. Kellogg's Research Labs. <https://www.kelloggsresearchlabs.com/>
- 6 De la Flor, S. (2005). *Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma*. [Memoria de tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya] Repositorio cooperativo – TDX
- 7 Callister, W. y Rethwisch, D. (2018). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverte
- 8 Vesga et.al (2007). Estudio experimental del efecto termomecánico de las transformaciones de fase en las aleaciones Ni-Ti “nitinol”. *Scientia et Technica*, 1(36), 631-636. <https://doi.org/10.22517/23447214.5131>
- 9 National Instruments Corp. (2016). *User guide and specifications NI myRIO-1900*. Recuperado el 24 de febrero de 2021, de <https://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf>
- 10 National Instruments Corp. (2012). Curso *LabVIEW Real-Time 1* [MOOC] <https://www.ni.com/es-mx/shop/services/products/labview-real-time-1-course.html>
- 11 Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.

- 12 Bolton, W. (2006). *Ingeniería de control*. Alfaomega Grupo Editor.
- 13 Spong et al. (2006). *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons.
- 14 Kitagawa, M. & Windsor, B. (2006). *MoCap for Artists: Workflow and Techniques for Motion Capture*. Elsevier.
- 15 InvenSense Inc. (2013). MPU-6000 and MPU-5050 Product Specification Revision 3.4. Recuperado el 9 de marzo de 2021, de <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- 16 InvenSense Inc. (2013). MPU-6000 and MPU-5050 Register Map and Descriptions Revision 4.2. Recuperado el 9 de marzo de 2021, de <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>
- 17 Pedley, M. (2013). Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. Recuperado de <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3461.pdf>
- 18 Somma, J. (2018). *Cuaterniones y ángulos de Euler para describir rotaciones en R^3* . [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Abierta Interamericana
- 19 Sanghyuk, P. & How, J. (2004, noviembre). Lecture #15. MIT OpenCourseWare. https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/lecture-notes/lecture_15.pdf
- 20 Islam et.al (2017). Comparison of Complementary and Kalman Filter Based Data Fusion for Attitude Heading Reference System. *AIP Conference Proceedings*, 1919(1), 020002. <https://doi.org/10.1063/1.5018520>
- 21 Vishay Intertechnology, Inc. (2021). NTCLE317E4103SBA Datasheet. Recuperado el 15 de mayo de 2021. Recuperado de <https://www.vishay.com/docs/29216/ntcle317e4103sba.pdf>
- 22 Analog Devices, Inc. (2011). Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier AD620. Recuperado el 24 de febrero de 2021, de <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>

Anexo A

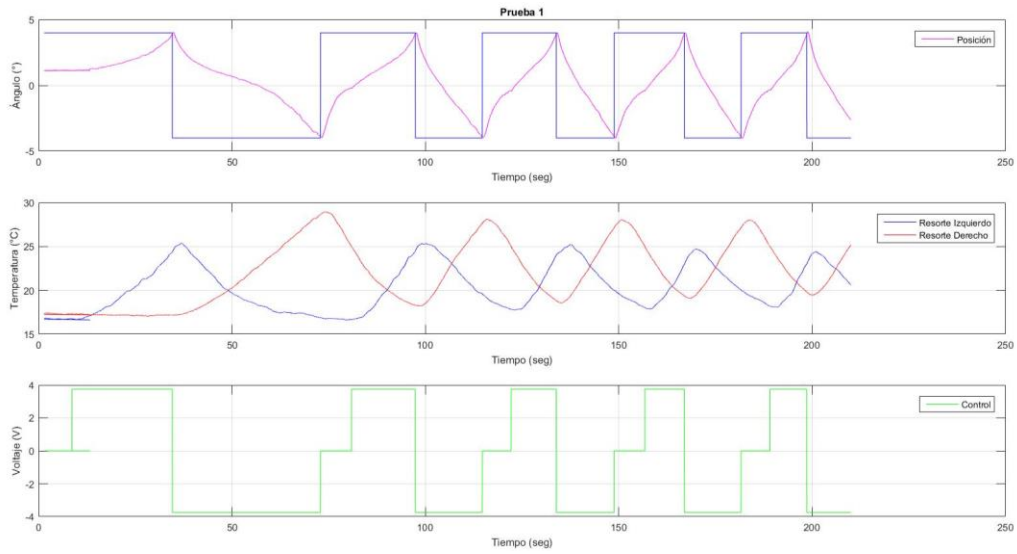


Figura 81 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 1 - A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 25°C y un voltaje de saturación de 3.75V..

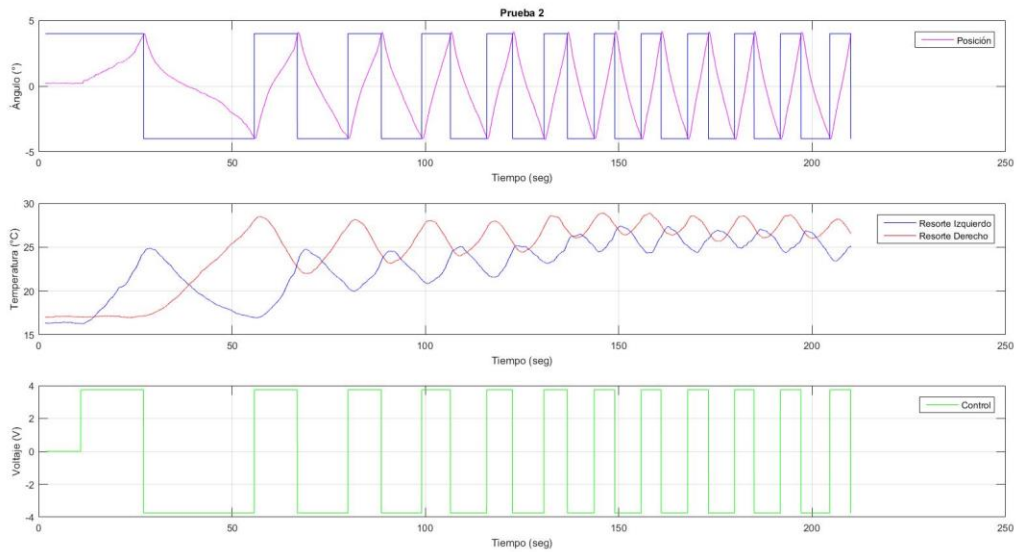


Figura 82 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 2 - A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 30°C y un voltaje de saturación de 3.75V..

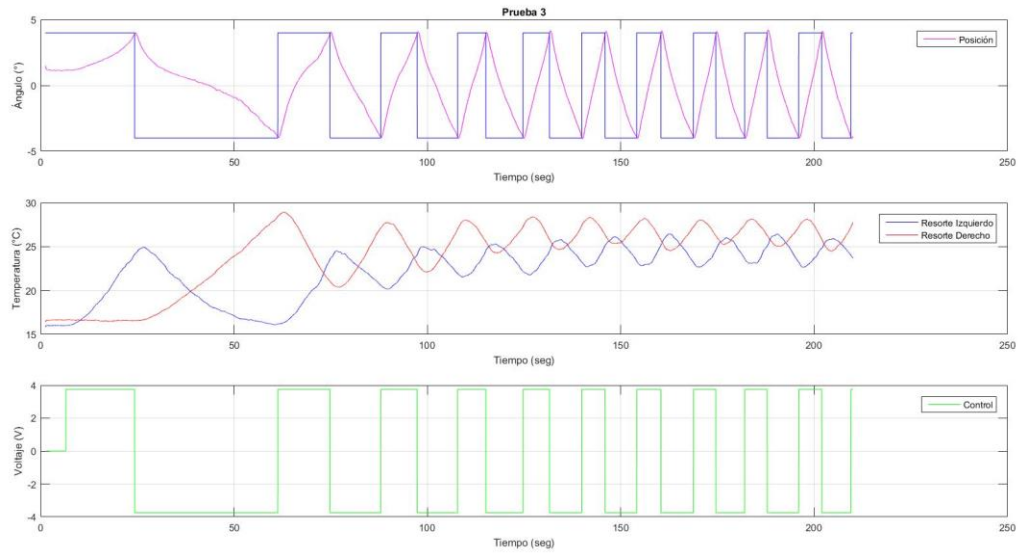


Figura 83 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 3 - A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 35°C y un voltaje de saturación de 3.75V.

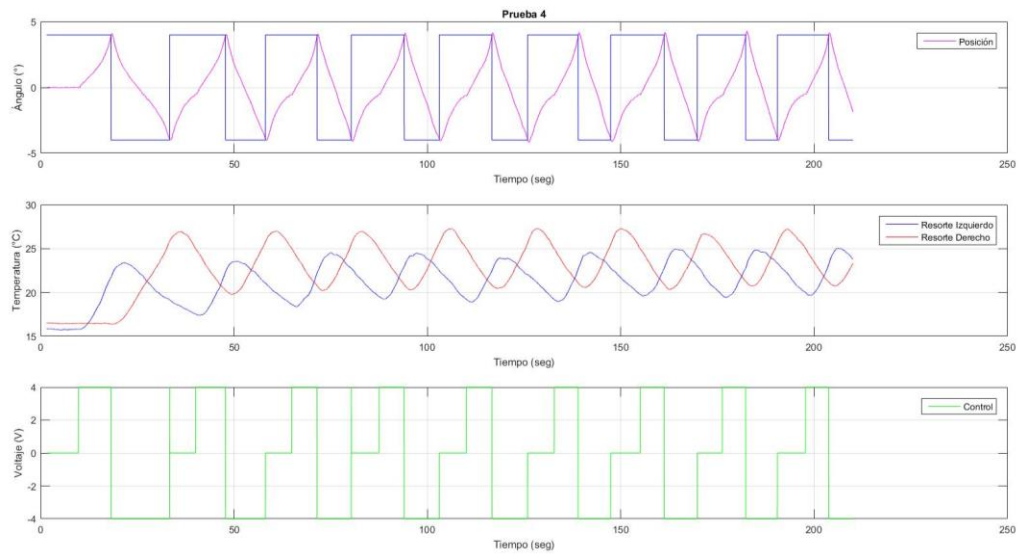


Figura 84 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 4-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 25°C y un voltaje de saturación de 4V.

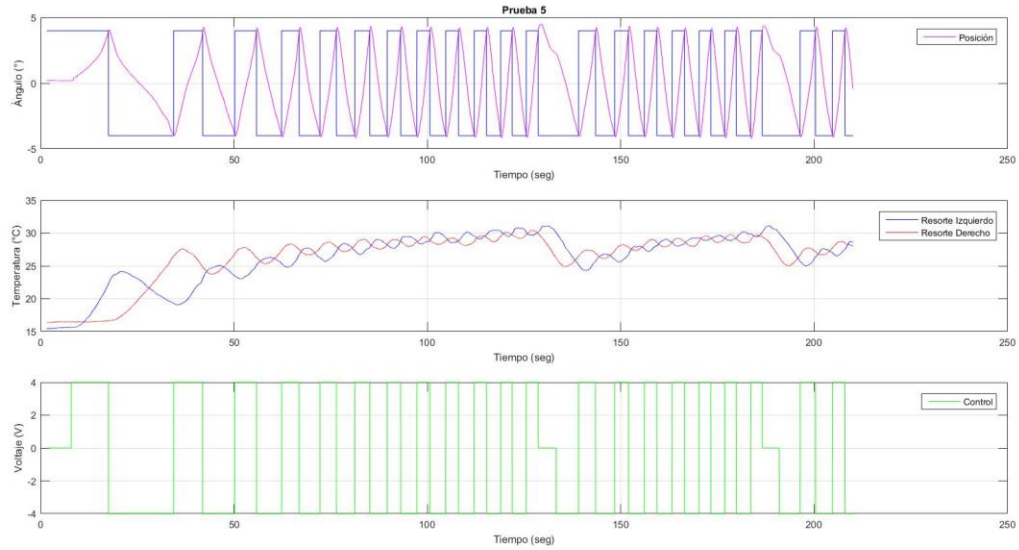


Figura 85 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 5-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 30°C y un voltaje de saturación de 4V.

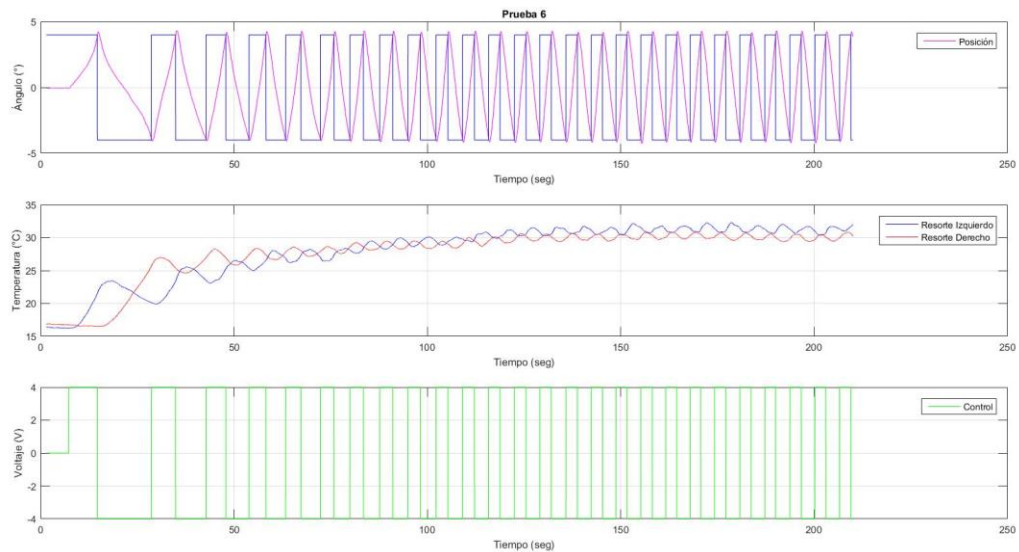


Figura 86 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 6-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 35°C y un voltaje de saturación de 4V.

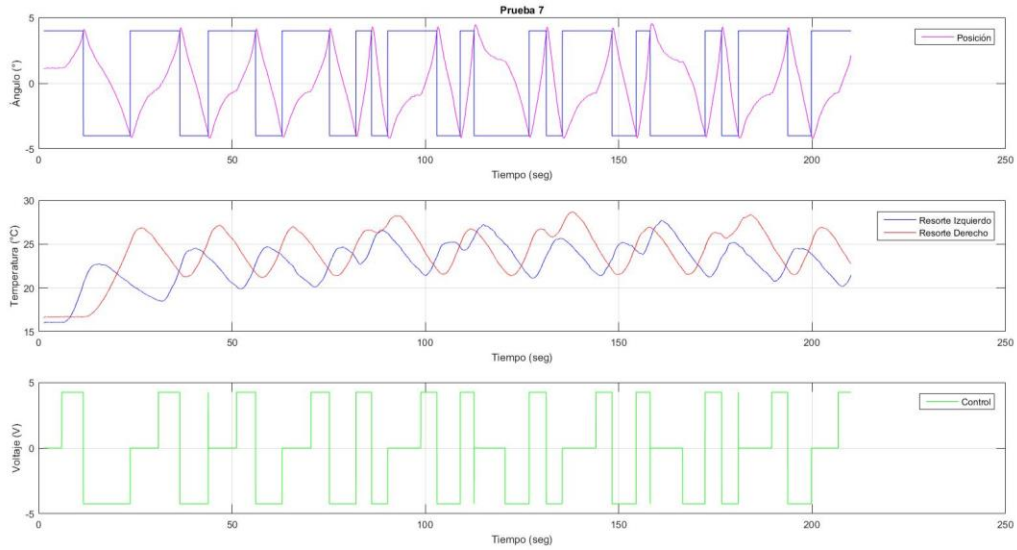


Figura 87 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 7-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 25°C y un voltaje de saturación de 4.25V.

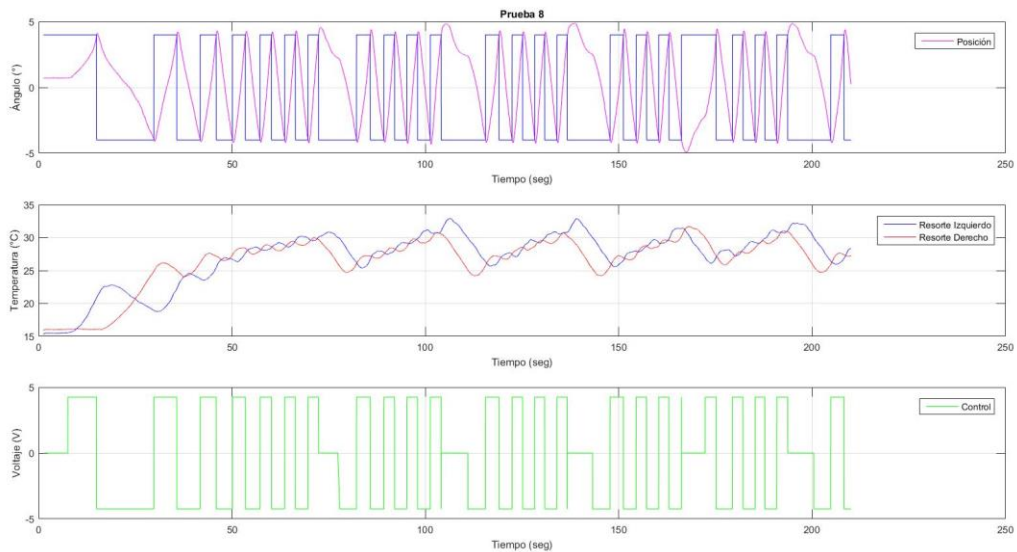


Figura 88 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 8-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 30°C y un voltaje de saturación de 4.25V.

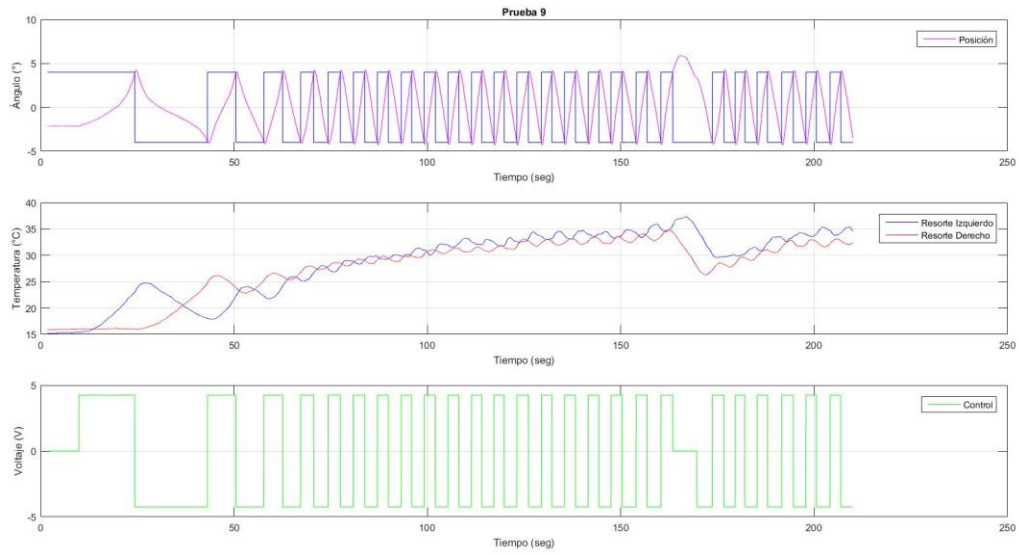


Figura 89 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 9-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 35°C y un voltaje de saturación de 4.25V.

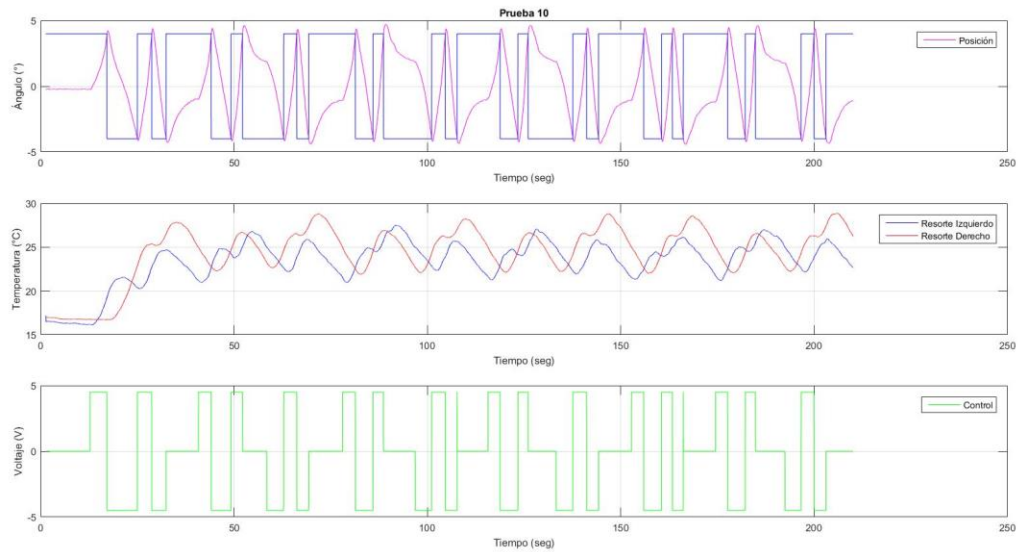


Figura 90 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 10-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 25°C y un voltaje de saturación de 4.5V.

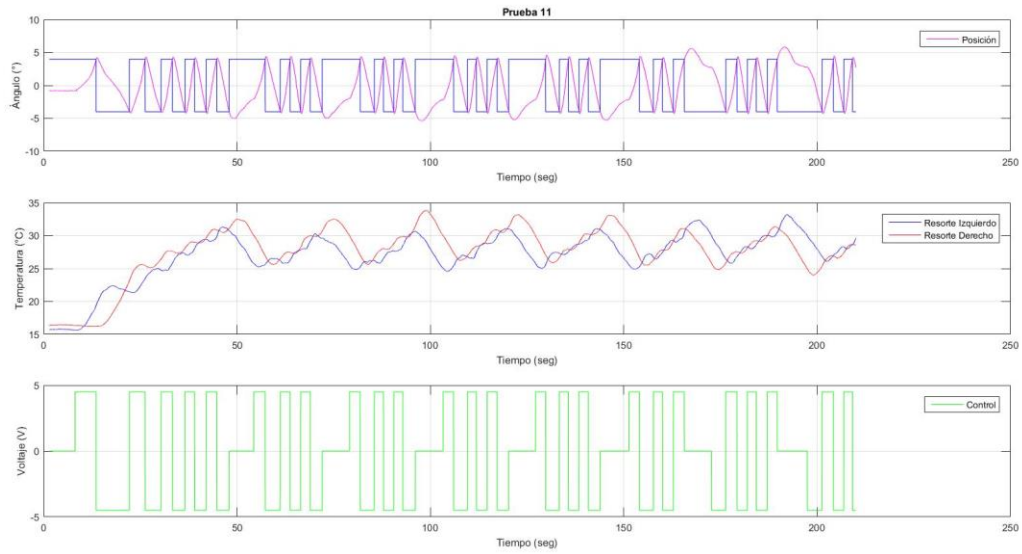


Figura 91 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 11-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 30°C y un voltaje de saturación de 4.5V.

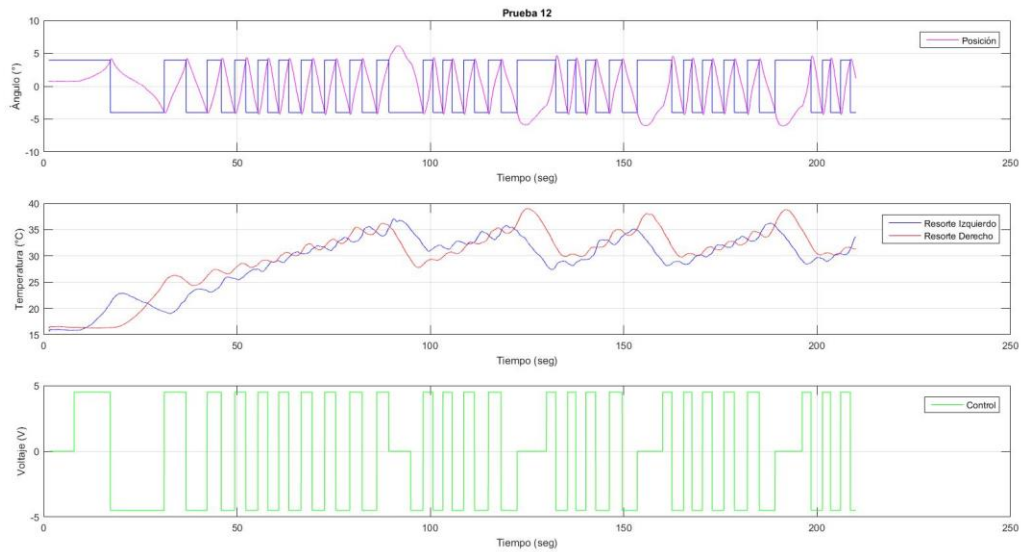


Figura 92 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 12-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 35°C y un voltaje de saturación de 4.5V.

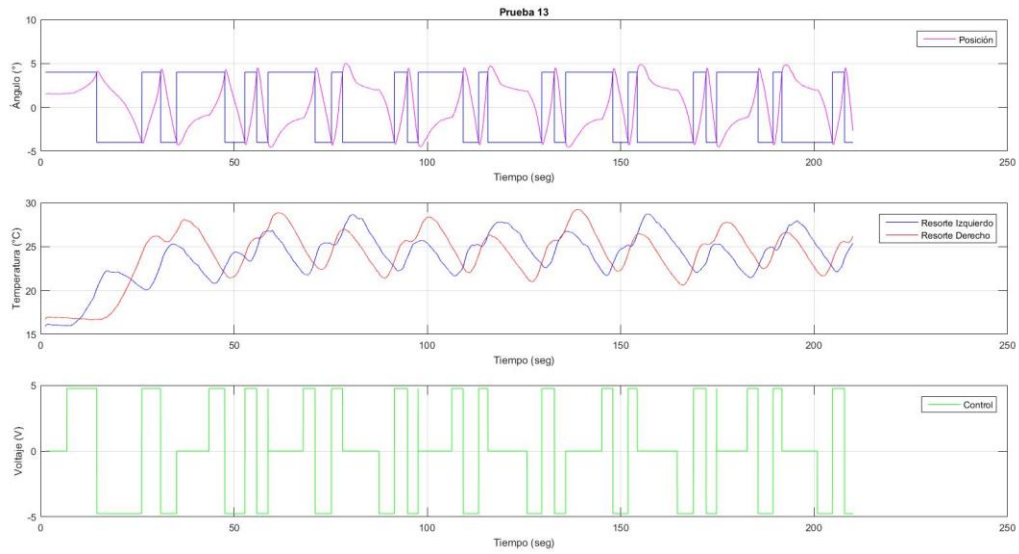


Figura 93 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 13-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 25°C y un voltaje de saturación de 4.75V.

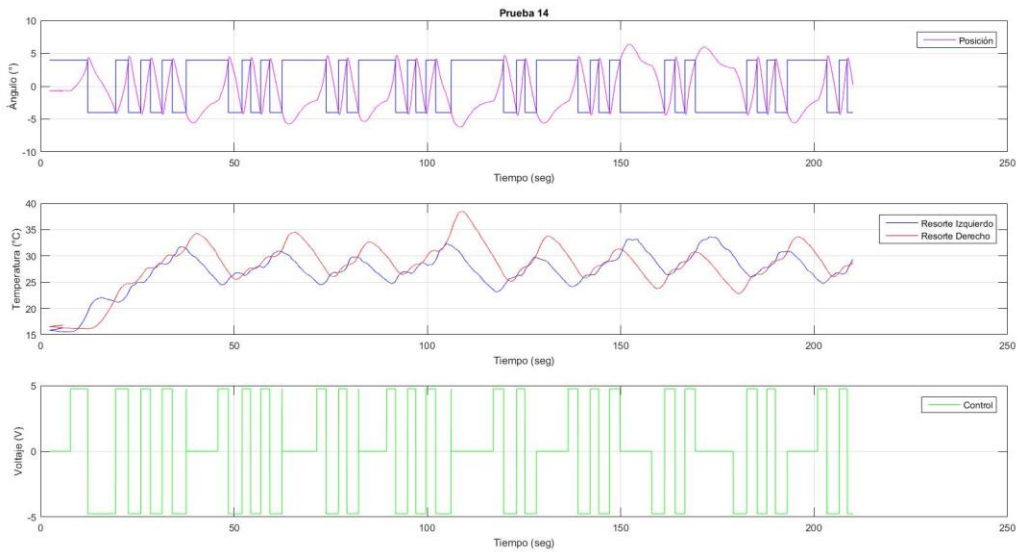


Figura 94 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 14-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 30°C y un voltaje de saturación de 4.75V.

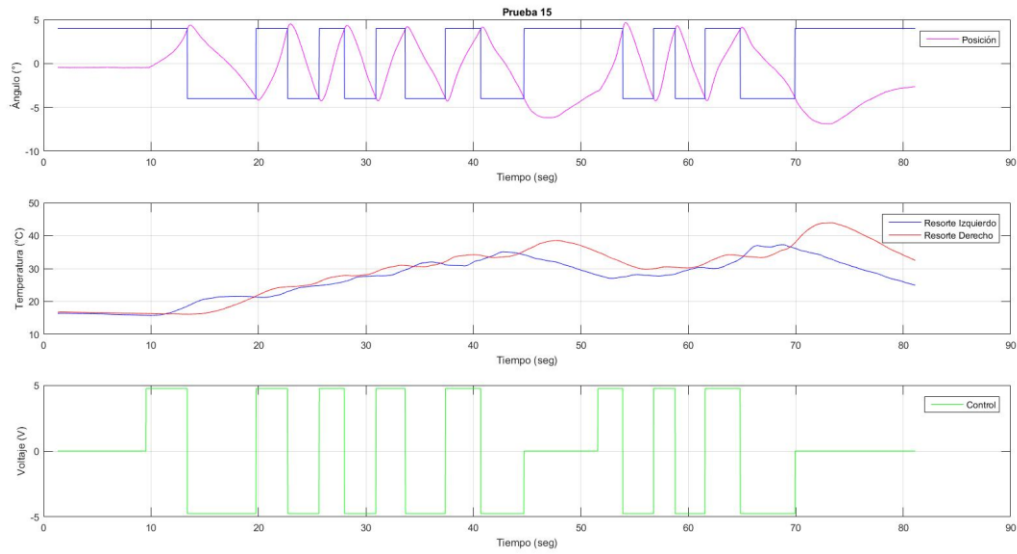


Figura 95 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 15-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 35°C y un voltaje de saturación de 4.75V.

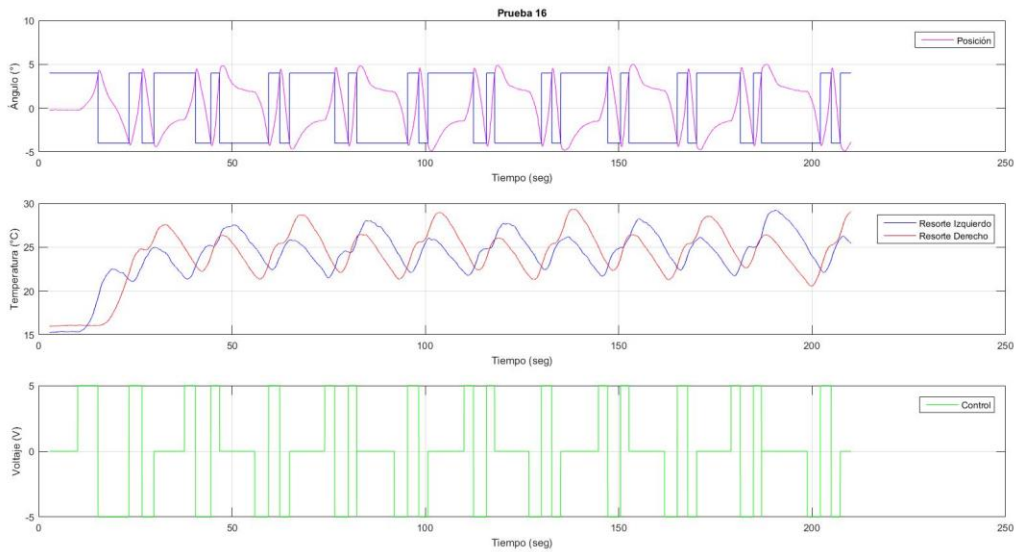


Figura 96 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 16-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 25°C y un voltaje de saturación de 5V.

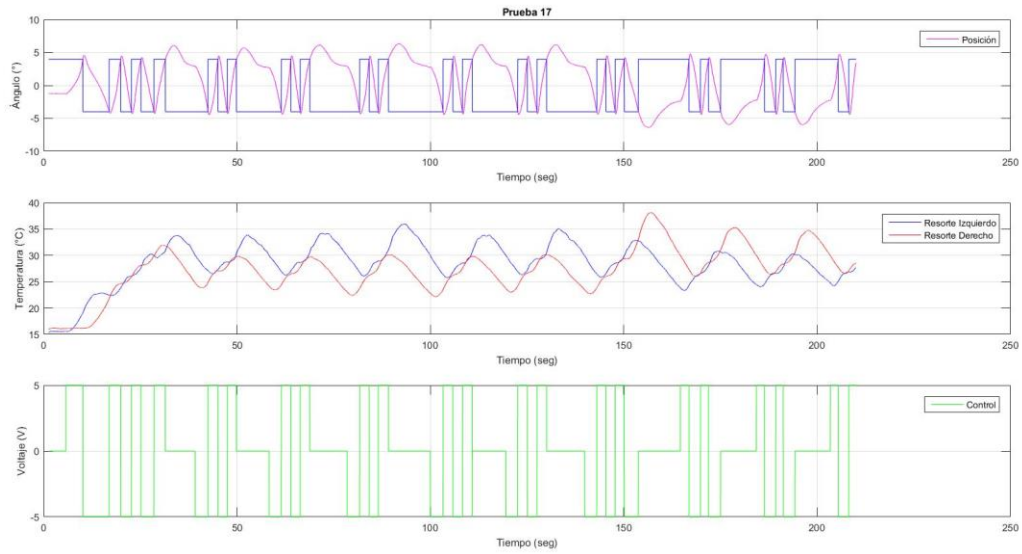


Figura 97 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 17-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 30°C y un voltaje de saturación de 5V.

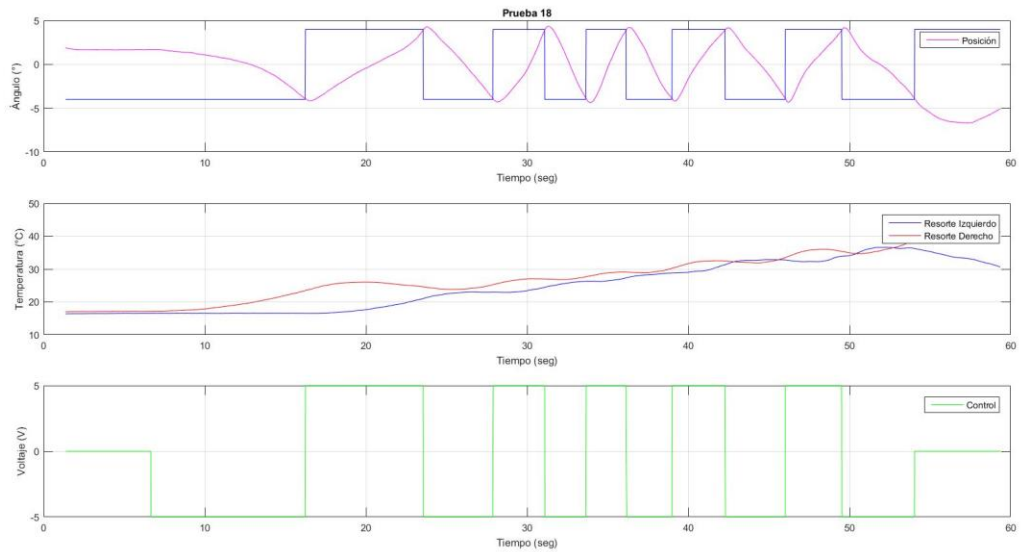


Figura 98 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 18-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 35°C y un voltaje de saturación de 5V.

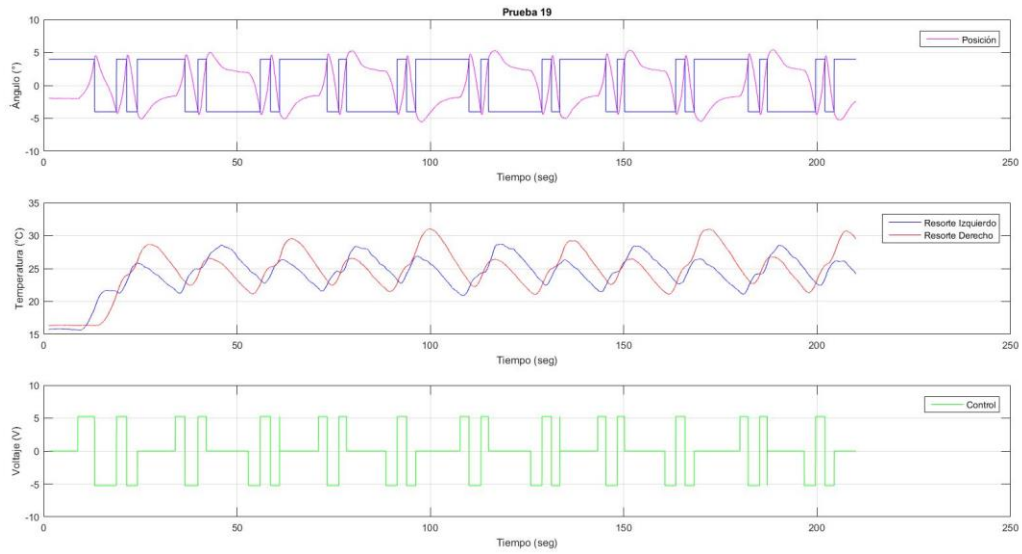


Figura 99 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 19-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 25°C y un voltaje de saturación de 5.25V

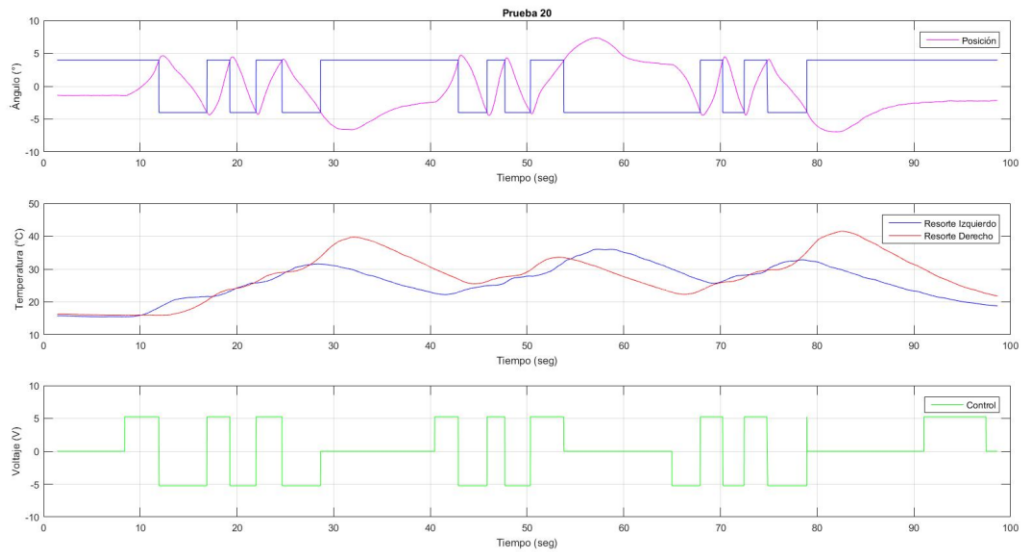


Figura 100 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 20-A en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una temperatura límite de 30°C y un voltaje de saturación de 5.25V.

Anexo B

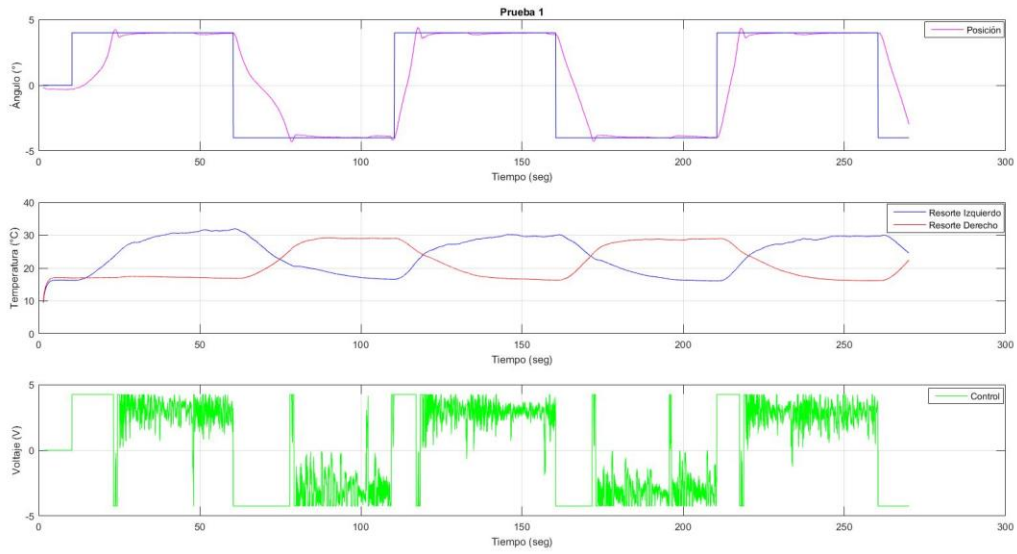


Figura 101 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 1-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=15$, $K_I=10$, $K_D=4$ y una ventana de error de 0° .

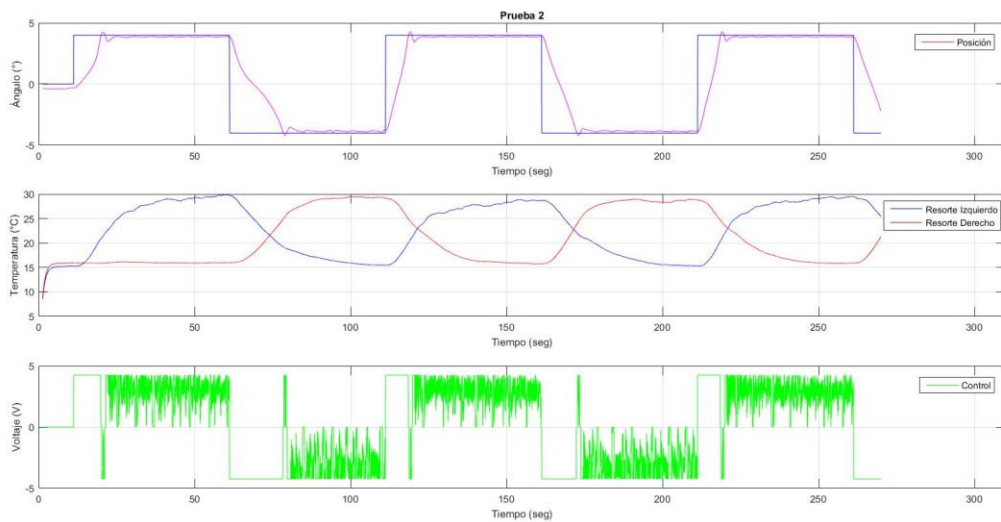


Figura 102 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 2-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=15$, $K_I=10$, $K_D=4$ y una ventana de error de 0.1° .

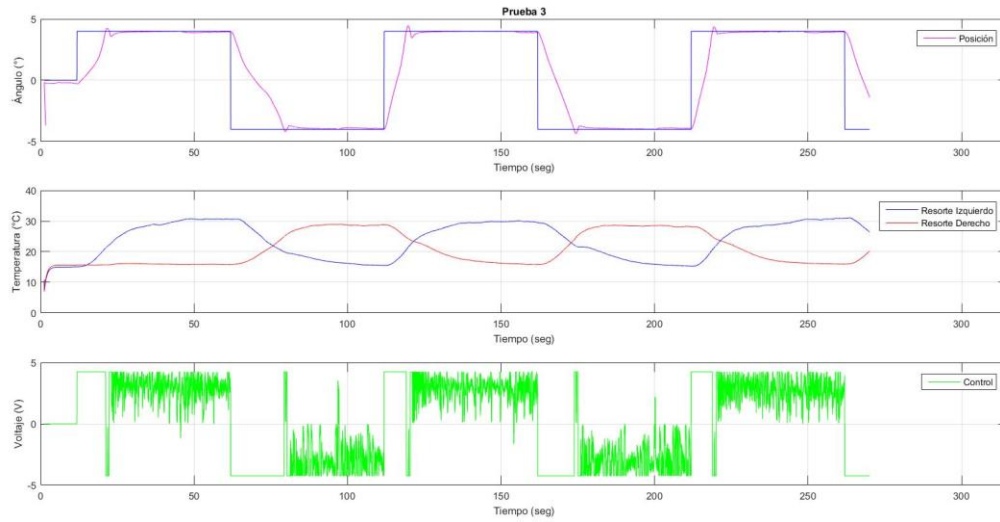


Figura 103 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 3-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=20$, $K_I=8$, $K_D=5$ y una ventana de error de 0° .

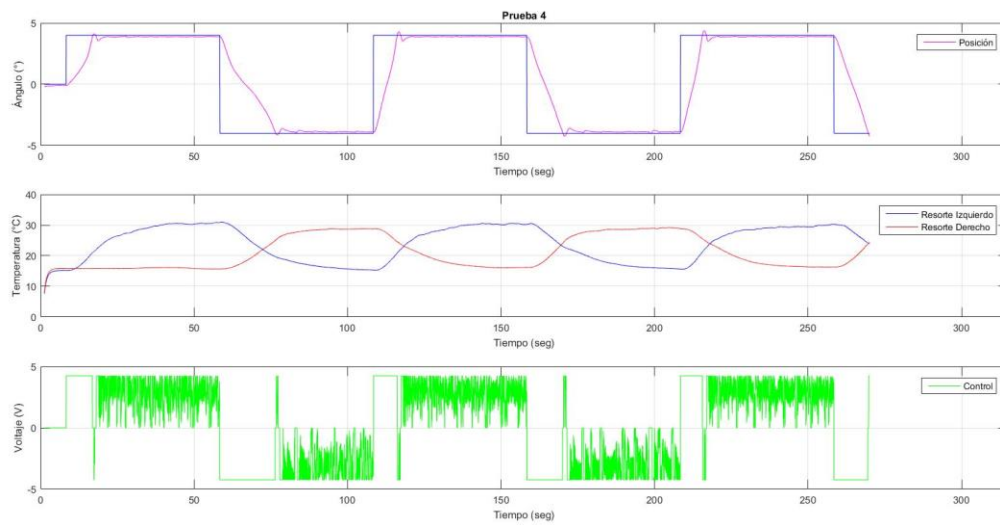


Figura 104 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 4-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=20$, $K_I=8$, $K_D=5$ y una ventana de error de 0.1° .

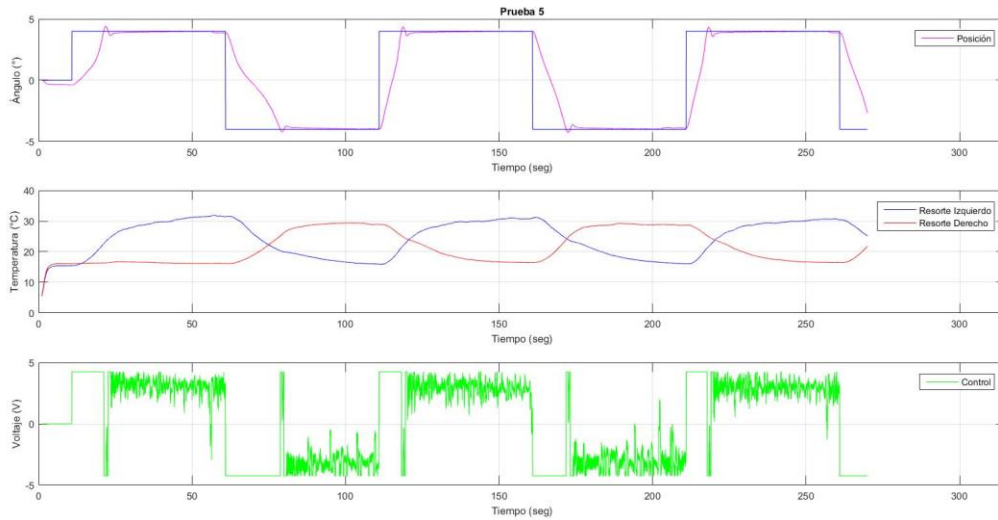


Figura 105 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 5-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=20$, $K_I=6$, $K_D=3$ y una ventana de error de 0° .

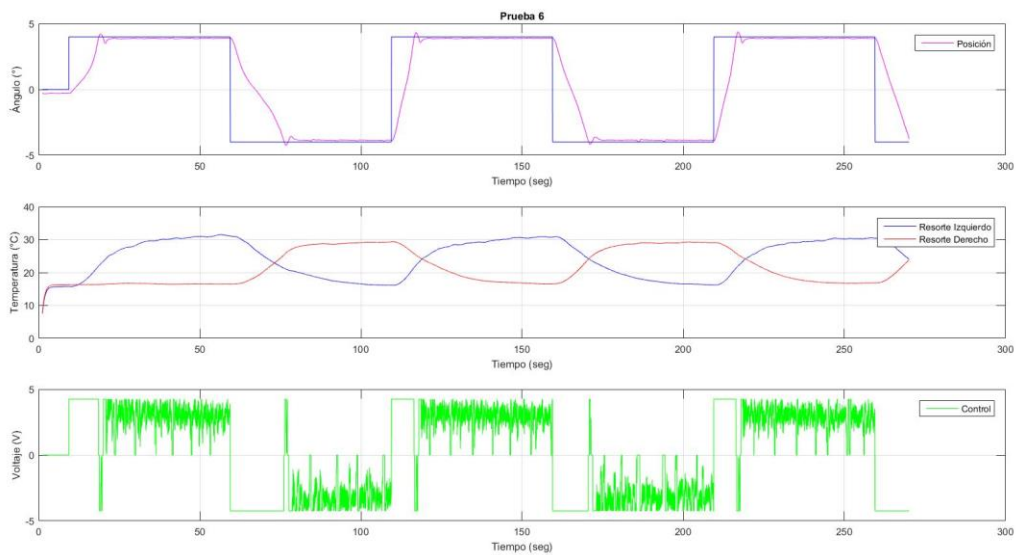


Figura 106 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 6-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=20$, $K_I=6$, $K_D=3$ y una ventana de error de 0.1° .

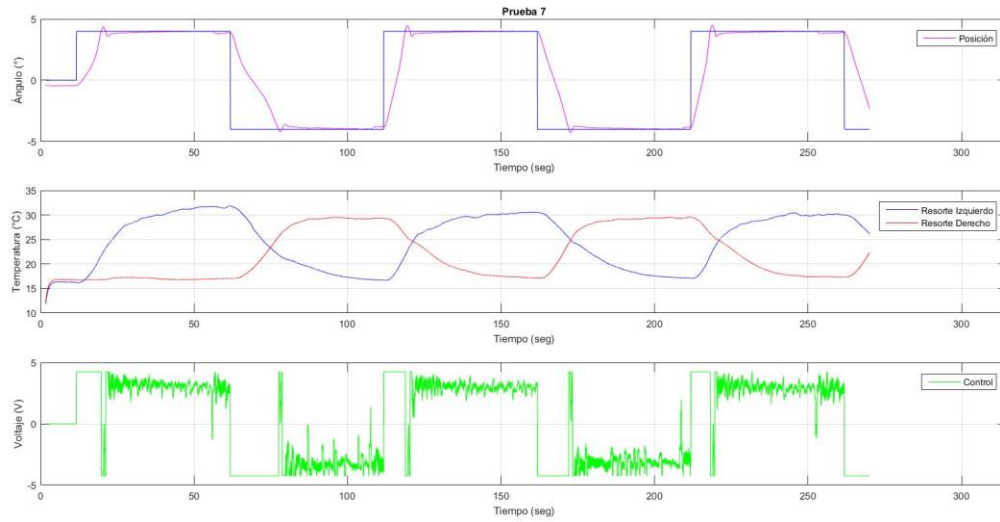


Figura 107 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 7-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=14$, $K_I=5$, $K_D=2$ y una ventana de error de 0° .

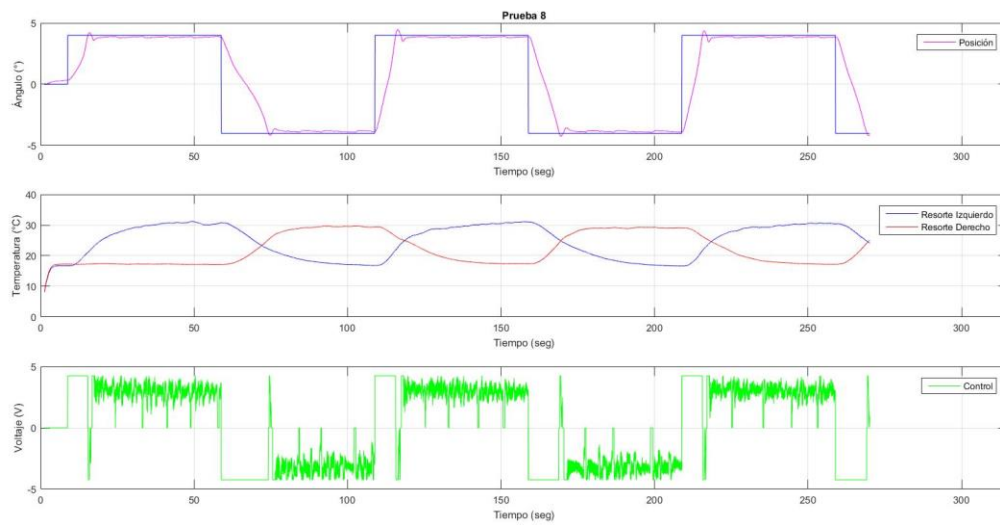


Figura 108 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 8-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=14$, $K_I=5$, $K_D=2$ y una ventana de error de 0.1° .

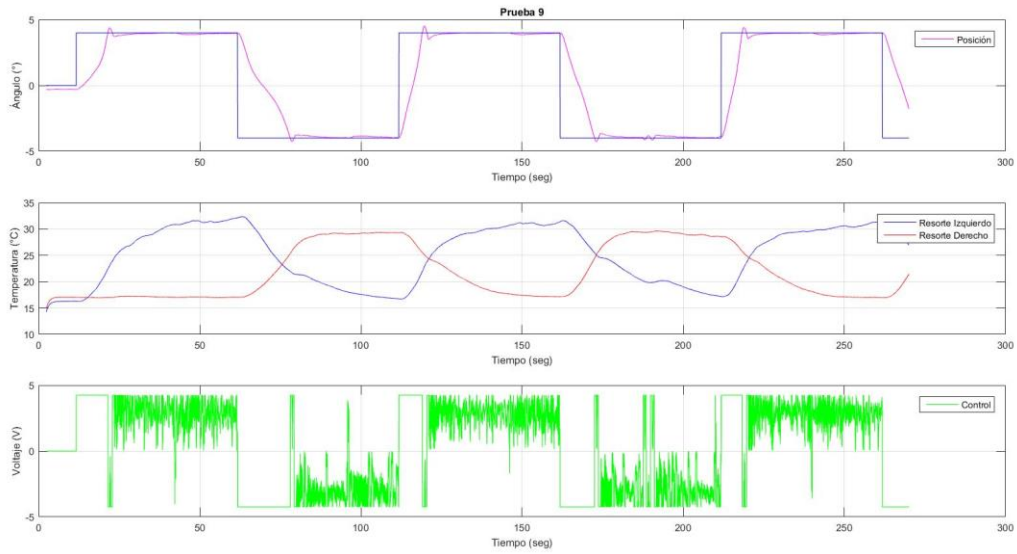


Figura 109 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 9-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=15$, $K_I=8$, $K_D=5$ y una ventana de error de 0° .

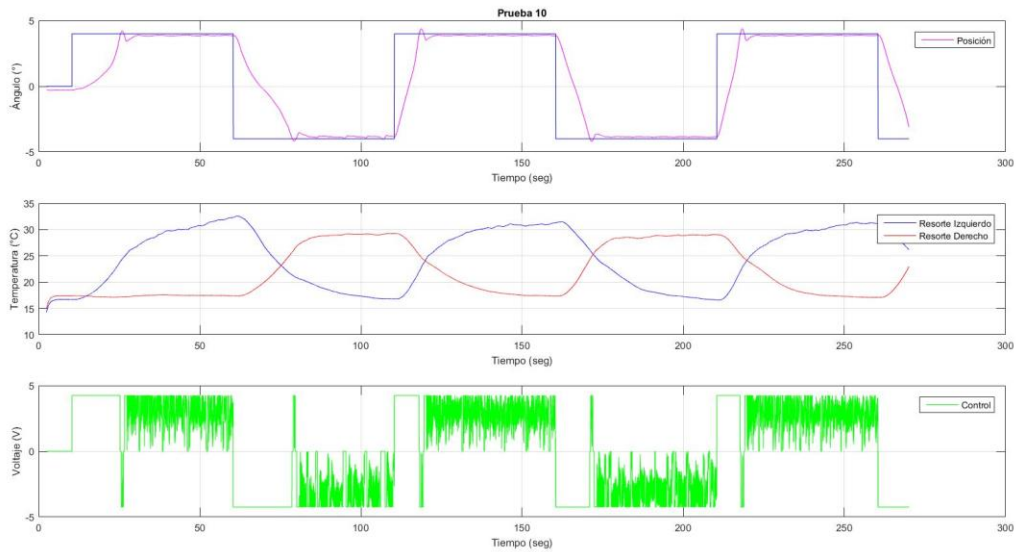


Figura 110 Gráfico del comportamiento del sistema durante la prueba 10-B en términos de posición (gráfico superior), temperatura (gráfico intermedio) y voltaje de control (gráfico inferior), manejando una ganancia $K_P=15$, $K_I=8$, $K_D=5$ y una ventana de error de 0.1° .