

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA DEL PORTASUSTRATO DE UNA
CÁMARA DE ALTO VACÍO PARA ELABORAR PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS
DELGADAS**

Tesis para optar por el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Jesús Alan Calderón Chavarri

Asesor:

Dr. José Dávalos Pinto

Lima, Octubre del 2012

RESUMEN

Este trabajo de tesis muestra el diseño del control de temperatura del portasustrato de la cámara de alto vacío del Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección Física de la PUCP. Para estudiar las propiedades físicas, químicas y ópticas de las películas semiconductoras delgadas elaboradas dentro de la cámara, los investigadores retiran las películas a un horno externo fuera de la cámara; sometiéndolas a altas temperaturas. Por ello es un requerimiento realizar el control de temperatura del portasustrato, el cual sostiene al sustrato donde se depositan las películas semiconductoras, dentro de la cámara de alto vacío.

Por tal necesidad se diseñó el control de temperatura del portasustrato, para lo cual se realizaron pruebas en una placa térmica que transfiere calor al portasustrato de la cámara, debido al Efecto Joule, en una resistencia eléctrica de 50 Ohmios y capaz de proporcionar 1200W de potencia eléctrica; esta resistencia está en el interior de la placa térmica. Posicionando adecuadamente el sensor de temperatura (termocupla) y mediante el algoritmo de control diseñado (Proporcional e Integral) por el modelo de Ziegler and Nichols, se logró satisfactoriamente el control de temperatura del portasustrato de la cámara de alto vacío para el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la PUCP, con un error menor a 2°C.

Fue necesario conocer en qué rangos de temperatura el portasustrato tiene un comportamiento lineal entre la señal de entrada y la temperatura monitoreada, en un experimento realizado en lazo abierto para así conocer las funciones de transferencia que se puedan obtener y poder realizar el control de temperatura en el rango de trabajo del portasustrato.

Dios, gracias por guiarme y acompañarme en este atractivo viaje...

El poeta y dramaturgo Bertolt Brecht en su poema “Fragen eines lesenden Arbeiters”, permite reflexionar que todo fruto es consecuente de grandes personas que permitieron verlo nacer; ansiando que este sencillo trabajo sea un grano de arena más que fortalezca a la gran gama de investigadores futuros en nuestra sociedad, agradezco sinceramente a:

Mis padres y mi hermana, que día a día me enseñan el significado invaluable de una familia.

A mi asesor, el Dr. José Dávalos, que supervisó y asesoró analíticamente cada etapa de este trabajo.

A los profesores e investigadores de la Sección Electricidad y Electrónica de la PUCP; por brindar sus conocimientos y enseñanzas.

A los profesores e investigadores del Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección Física de la PUCP: Francisco de Zela, Roland Weingärtner, Andrés Guerra, y a los profesores Rafael Coello y Hugo Medina. Quienes con sus constantes investigaciones me motivan aún más en esta etapa.

A los profesores e investigadores del Laboratorio de Energía de la Sección Ingeniería Mecánica de la PUCP: Enrique Barrantes, Luis Chirinos, Allan Flores y Ronald Más, por haberme guiado en el análisis de transferencia de calor.

A los profesores e investigadores del Laboratorio de Sputtering, de la UNI, al profesor G. Bolaños de la Universidad del Cauca (Colombia), y al profesor J. Balderas de SIP IPN (México); por atender mis consultas en el control de temperatura del portasustrato de una cámara de alto vacío para elaborar películas delgadas semiconductoras.

INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú, se elaboran películas semiconductoras delgadas, especialmente de Nitruro de Aluminio y Carburo de Silicio, para su posterior estudio y caracterización; mediante la aplicación de la técnica Sputtering dentro de una cámara de alto vacío. Esta técnica, básicamente consiste en el desprendimiento de átomos de una placa a la cual se la denomina target (el target puede ser de Nitruro de Aluminio) estos átomos desprendidos se depositan en un sustrato, que está sujeto a una placa metálica denominada portasustrato; formándose de esta manera una película semiconductora delgada sobre un sustrato. Las películas semiconductoras se elaboran por dos técnicas: vaporización y pulverización catódica o Sputtering.

Los investigadores del Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección Física de la PUCP, para poder estudiar y variar las propiedades físicas, químicas y ópticas de las películas semiconductoras elaboradas, retiran las películas de la cámara de alto vacío y las depositan en un horno para someterlas a diversas temperaturas, siendo un máximo valor de referencia 500°C. Las películas semiconductoras delgadas son contaminadas por las condiciones ambientales, cuando son trasladadas desde la cámara de alto vacío hacia el horno; por ello es necesario tener un control de temperatura del portasustrato, dentro de la cámara de alto vacío.

El trabajo incluye el estudio del comportamiento dinámico de la placa térmica, quien transfiere calor al portasustrato; este estudio permite conocer los rangos de temperatura donde la placa térmica presenta linealidad para el control de temperatura del portasustrato. Se ha seleccionado el sensor y actuador adecuados para el control, y se utiliza LabVIEW como plataforma de programación.

El capítulo 1, trata de la problemática que hay en el control de temperatura del portasustrato para la elaboración de películas semiconductoras delgadas. El estado del arte, el análisis e identificación de la planta para el control de temperatura del portasustrato para elaboración de películas delgadas dentro de una cámara de alto vacío, es tratado en el capítulo 2. En el capítulo 3, se muestra el diseño del controlador de temperatura del portasustrato de la cámara de alto vacío. Los resultados de las pruebas realizadas, son mostrados en el capítulo 4.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | i |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | iii |
| 1. ELABORACIÓN DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DELGADAS, EN LA CÁMARA DE ALTO VACÍO. | |
| 1.1 Planteamiento..... | 1 |
| 1.2 Justificación..... | 1 |
| 1.3 Alcance y limitaciones..... | 2 |
| 1.4 Formulación del problema..... | 2 |
| 1.5 Objetivo..... | 3 |
| 2. CONTROL DE TEMPERATURA DEL PORTASUSTRATO DE UNA CÁMARA DE ALTO VACÍO PARA ELABORACIÓN DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DELGADAS. | |
| 2.1 El estado del arte | 4 |
| 3. DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA DEL PORTASUSTRATO DE LA CÁMARA DE ALTO VACÍO. | |
| 3.1 Reconocimiento de la planta..... | 15 |
| 3.2 Característica del actuador planta..... | 17 |
| 3.3 Adquisición de datos..... | 29 |
| 3.4 Diseño del control de temperatura | 29 |
| 4. RESULTADOS. | |
| 4.1 Simulaciones..... | 33 |
| 4.2 Pruebas..... | 38 |
| CONCLUSIONES | |
| RECOMENDACIONES | |
| BIBLIOGRAFÍA | |
| ANEXOS | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Representación del Proceso Sputtering..... | 4 |
| 2.2 Representación de la ionización del gas Argón..... | 5 |
| 2.3 Representación del Proceso Sputtering por Magnetrones..... | 5 |
| 2.4 Proceso de control de temperatura; investigador, J. Balderas..... | 7 |
| 2.5 Cámara de Vacío, UNI..... | 8 |
| 2.6 Controlador REX C 700, UNI..... | 8 |
| 2.7 Cámara de Vacío, PUCP..... | 8 |
| 2.8 Transferencia de calor en el portasustrato..... | 9 |
| 3.1 Sistema de Control de Temperatura..... | 13 |
| 3.2 Portasustrato, PUCP..... | 15 |
| 3.3 Placa térmica, vista frontal..... | 16 |
| 3.4 Placa térmica..... | 16 |
| 3.5 Placa térmica..... | 16 |
| 3.6 Placa térmica, a 540°C..... | 16 |
| 3.7 Componentes del sistema de control en bloques..... | 18 |
| 3.8 Vista del circuito de control..... | 18 |
| 3.9 Programa en LabVIEW para obtener la característica del actuador..... | 20 |
| 3.10 Respuesta del actuador-planta para 2%, 10%, 20%, 30%, 40% de PWM..... | 21 |
| 3.11 Respuesta del actuador-planta para 50%, 60%, 70%, y 80% de PWM..... | 22 |
| 3.12 Curva característica del actuador-planta..... | 23 |
| 3.13 Relaciones para obtener función de transferencia | 24 |
| 3.14 Programa en LabVIEW para verificar modelos en los rangos de operación..... | 24 |
| 3.15 Respuesta del sistema en el rango de 2 a 10% de PWM..... | 25 |
| 3.16 Curva de respuesta del sistema para el rango de 2 a 10% de PWM..... | 25 |
| 3.17 Respuesta del sistema en el rango de 10 a 40% de PWM..... | 26 |
| 3.18 Curva de respuesta del sistema para rango 10 a 40% de PWM..... | 26 |
| 3.19 Respuesta del sistema en el rango 40 a 60% de PW..... | 27 |
| 3.20 Curva de respuesta del sistema para rango 40 a 60% de PWM | 27 |
| 3.21 Respuesta del sistema en el rango 60 a 80% de PW..... | 28 |
| 3.22 Curva de respuesta del sistema para rango 60 a 80% de PWM | 28 |
| 4.1 Programa en LabVIEW para simular la respuesta del sistema..... | 33 |
| 4.2 Simulación del proceso a un Set Point de 125°C..... | 34 |
| 4.3 Simulación del proceso a un Set Point de 145°C. | 34 |

| | |
|----------------------------------------------------------|----|
| 4.4 Simulación del proceso a un Set Point de 305°C. | 35 |
| 4.5 Simulación del proceso a un Set Point de 365°C. | 35 |
| 4.6 Simulación del proceso a un Set Point de 425°C..... | 36 |
| 4.7 Simulación del proceso a un Set Point de 450°C..... | 36 |
| 4.8 Simulación del proceso a un Set Point de 540°C..... | 37 |
| 4.9 Simulación del proceso a un Set Point de 560°C..... | 37 |
| 4.10 Diagrama de flujo para las pruebas | 38 |
| 4.11 Programa en LabVIEW para las pruebas | 39 |
| 4.12 Interfaz de usuario del programa principal..... | 41 |
| 4.13 Prueba del controlador para 125°C de Set Point..... | 41 |
| 4.14 Prueba del controlador para 145°C de Set Point..... | 42 |
| 4.15 Prueba del controlador para 305°C de Set Point..... | 42 |
| 4.16 Prueba del controlador para 365°C de Set Point..... | 43 |
| 4.17 Prueba del controlador para 425°C de Set Point..... | 43 |
| 4.18 Prueba del controlador para 450°C de Set Point..... | 44 |
| 4.19 Prueba del controlador para 540°C de Set Point..... | 44 |
| 4.20 Prueba del controlador para 560°C de Set Point..... | 45 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Correspondencia entre PWM y temperatura..... | 23 |
| 3.2 Controlador 1, para rango de 2 a 10% de PWM..... | 30 |
| 3.3 Controlador 2, para rango de 10 a 40% de PWM..... | 30 |
| 3.4 Controlador 3, para rango de 40 a 60% de PWM..... | 30 |
| 3.5 Controlador 4, para rango de 60 a 80% de PWM..... | 31 |
| 4.1 Parámetros de controlador PI en cada rango de trabajo..... | 39 |
| 4.2 Numeración para selección de PWM..... | 40 |
| 4.3 Comparación de error estacionario..... | 45 |



CAPÍTULO 1

ELABORACIÓN DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DELGADAS EN LA CÁMARA DE ALTO VACÍO.

1.1 Planteamiento

En el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección Física, Pontificia Universidad Católica del Perú, se elaboran películas semiconductoras delgadas para “Caracterizarlas”; es decir para describir sus propiedades ópticas, espesor, y tratamiento térmico. Generalmente ello se realiza dentro de la cámara de alto vacío. Sin embargo, para el estudio del tratamiento térmico, es necesario trasladar las películas a un horno externo a la cámara donde son elaboradas. En el horno, las películas delgadas se someten a cambios de temperatura, lo cual sería óptimo realizarlo dentro de la cámara de alto vacío y evitar el problema de la contaminación de las películas al trasladarlas y contactarse con el medio ambiente.

Se necesita controlar la temperatura del portasustrato, el problema es medir adecuadamente su temperatura en pleno proceso de elaboración de las películas semiconductoras delgadas. Para ello debe ubicarse correctamente el sensor de temperatura para medir la temperatura del portasustrato. Entonces, por medio de una termocupla, se monitoreará la temperatura del portasustrato en proceso de elaboración de las películas semiconductoras delgadas.

Para el diseño del control de temperatura del portasustrato, Se diseñó una planta a controlar; es decir, es necesario conocer cómo reacciona la planta (placa térmica) a medida que varía la temperatura cuando se le proporciona calor. El cambio de temperatura del portasustrato a medida que se lo calienta, puede ser lineal o no; conocer ello, permitió calcular los parámetros del algoritmo diseñado, dentro de los rangos de temperatura donde la planta sea lineal y en el rango de trabajo en el cual hagan sus pruebas los investigadores del laboratorio.

1.2 Justificación

Es necesario realizar un diseño del sistema de control de temperatura del portasustrato, puesto que con ello los investigadores del Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la PUCP podrán tener valores experimentales de la temperatura del portasustrato; en pleno proceso de elaboración de las películas delgadas. Hasta el momento no se tiene ningún dispositivo que realice el control y monitoreo de la temperatura del portasustrato en la

cámara de alto vacío del Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección Física de la PUCP.

En el sistema diseñado, al realizar el control de la temperatura del portasustrato desde una computadora personal, se podrá cambiar las propiedades físicas, químicas y ópticas de las películas delgadas elaboradas [1], debido al cambio de temperatura producido en ellas.

1.3 Alcance y limitaciones

Mediante una potencia eléctrica de 1200W se proporciona calor y eleva la temperatura del portasustrato. Además, un actuador electrónico recibe las señales del algoritmo de control, e interactúa con la resistencia eléctrica que proporciona los 1200W de potencia; que por efecto Joule se transfiere calor a una placa cerámica que está en contacto con el portasustrato. Se debe tener en cuenta que el interés de los investigadores está en controlar la temperatura del portasustrato en pleno proceso de elaboración de las películas semiconductoras delgadas.

En el Laboratorio de Sputtering de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), también elaboran películas semiconductoras delgadas para estudiarlas [13] con un sistema similar al del Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la PUCP. Mediante la constante comunicación entre ambos laboratorios se aprendió la técnica del monitoreo de temperatura del portasustrato en la cámara de alto vacío del Laboratorio de Sputtering de la UNI para obtener los resultados experimentales en esta tesis.

Fue limitación para el diseño de la tesis no tener mediciones experimentales de la temperatura para el portasustrato de la cámara en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la PUCP, es la primera vez que se desarrollará esta aplicación de control.

1.4 Formulación del problema

Conociéndose las limitaciones para diseñar un adecuado sistema de control de temperatura en el estudio y caracterización de películas semiconductoras para el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección de Física de la PUCP; se formula el problema:

¿Cómo controlar la temperatura del portasustrato dentro de la cámara, para no contaminar las películas delgadas con agentes externos?

1.5 Objetivo

Objetivo general

Diseñar un sistema de control de temperatura del portasustrato de una cámara de alto vacío.

Objetivos específicos

- Seleccionar la instrumentación del sensor, actuador y controlador.
- Diseñar un controlador digital de temperatura para una cámara de alto vacío, con un error estacionario menor a 2°C.



CAPÍTULO 2

CONTROL DE TEMPERATURA DEL PORTASUSTRATO DE UNA CÁMARA DE ALTO VACÍO PARA ELABORACIÓN DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DELGADAS.

2.1 El estado del arte

En las últimas décadas, el estudio e investigación de películas delgadas ha permitido avances tecnológicos en la fabricación de circuitos integrados, en el recubrimiento de vidrios para obtener filtros, el recubrimiento de piezas metálicas para endurecerlas [1] pues son fabricados por medio de muy finas láminas semiconductoras. La elaboración de las películas se realiza por mecanismos como evaporación de átomos y también por la técnica Sputtering.

El proceso Sputtering, básicamente consiste en depositar átomos de un material hacia un sustrato, los cuales son impulsados debido a la colisión de iones, como Argón por ejemplo, hacia una lámina metálica (denominada target). La aplicación de esta técnica es muy desarrollada estos días debido a la calidad en obtener nuevas películas semiconductoras además de permitir el estudio [2] de propiedades físicas de las películas, como el de sus propiedades ópticas. Esta técnica de depositar átomos en un sustrato y generar películas semiconductoras se puede realizar en alguna de sus formas, como lo es DC Sputtering, en donde el gas Argón es ionizado por la presencia de un campo eléctrico, provocando así que estos iones de Argón colisionen con la muestra a evaporar ya que se ubica en el cátodo (el Argón ionizado positivamente será atraído por el cátodo en la cámara de vacío), como se puede ver en la figura 2.1.

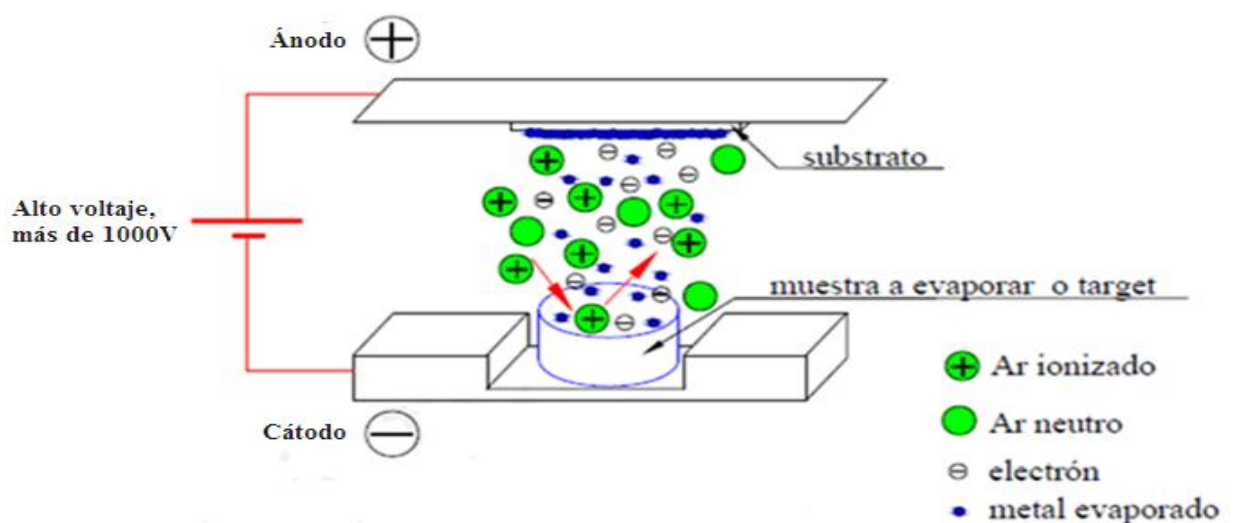


Figura 2.1: Representación del Proceso Sputtering [6].

Otra forma de ejecutar esta técnica es la denominada Sputtering por magnetrones, donde los magnetrones permitirán la presencia de un campo magnético dentro de la cámara de alto vacío, permitiendo así que los electrones ya no sigan una trayectoria recta hacia el portasustrato sino espiral; logrando una mejor ionización del gas Argón como se representa en la figura 2.2.

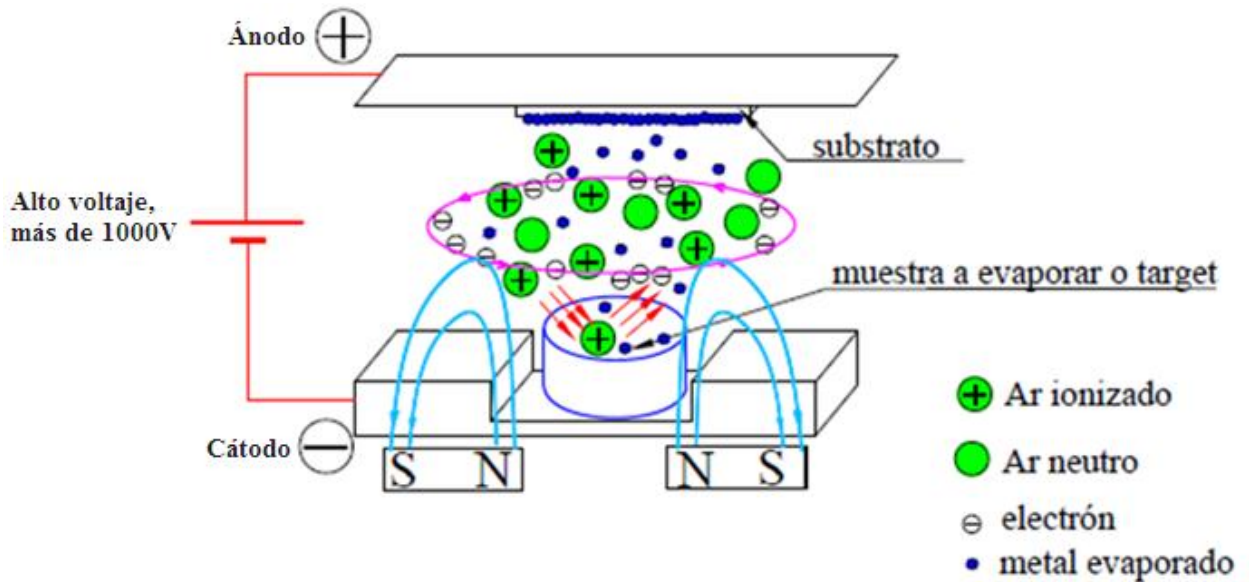


Figura 2.2: Representación de la ionización del gas Argón [6].

Para elaborar películas semiconductoras y aislantes, se sustituye el target metálico por uno aislante; y evitar descargar iones positivos en la superficie del aislante, la técnica Sputtering por magnetrones utiliza una señal en radiofrecuencia, que para la práctica es de 13.5MHz [6]; como se representa en la figura 2.3.

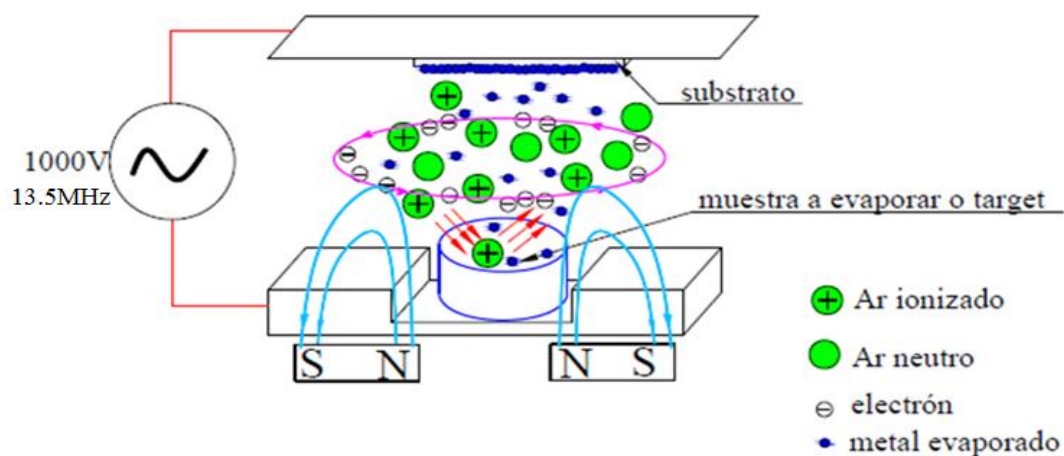


Figura 2.3: Representación del Proceso Sputtering por Magnetrones [6].

El desarrollo de este proceso, la técnica, se realiza dentro de una cámara de alto vacío; generalmente en el orden de 8×10^{-3} mbar [4] donde el monitoreo de cada uno de los parámetros físicos que intervienen en el proceso es obtenido por controladores [7]. Sin embargo, en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la sección Física, de la PUCP, no hay un dispositivo capaz de monitorear la temperatura del sustrato, ni del proceso, más sí de otros parámetros (como presión).

Si se altera la temperatura del sustrato en pleno proceso, entonces cambiarán sus propiedades químicas [1]. En el laboratorio de Ciencia de los Materiales, se logra elevar a altas temperaturas (cercas a los 500 grados Celsius) a las películas semiconductoras; para lo cual se las retira de la cámara hacia un horno eléctrico [3]; en este proceso las películas delgadas se contaminan con las condiciones del medio externo. Lo óptimo es calentar las películas dentro de la cámara para evitar que se impregnen impurezas del aire.

De acuerdo a la cita: *"The chemical composition of deposited films is governed by the substrate temperature and/or chemical vapor deposition"* [1], entonces, el control de la temperatura del sustrato permite tener un control de la composición química de las películas depositadas. Muchos laboratorios, tanto con fines de investigación e industriales, para la elaboración de las películas semiconductoras mediante el proceso Sputtering y dentro de una cámara de alto vacío, poseen sistemas de control de la temperatura del portasustrato [5], [7].

Generalmente estos sistemas cuentan con controladores PID, los cuales darán buena estabilidad al control de la temperatura; además manteniendo controlada la temperatura por medio de una reducción adecuada del error; es decir la diferencia entre la señal controlada con la señal referencia o Set Point debe ser lo más pequeña posible, se obtiene también estabilidad en el estudio de las propiedades de las películas semiconductoras en pleno proceso de producción [5], [7].

Las termocuplas o termopares son sensores muy utilizados para medir la temperatura, debido a su amplio rango de operación resulta ser un buen sensor para medir la temperatura del portasustrato en la cámara de alto vacío ya que puede llegarse a temperaturas mayores a 500°C en el interior de una cámara en un proceso Sputtering [1].

El investigador Balderas Zapata [16], presenta un modelo de control térmico para evaporación de películas delgadas; para el control realiza un algoritmo en lenguaje gráfico LabVIEW, utiliza un módulo de termopares, circuito de acondicionamientos de señales y

una tarjeta de adquisición de datos para interactuar entre el sistema a controlar con el computador personal que ejecutará la acción de control, como se muestra en la figura 2.4.

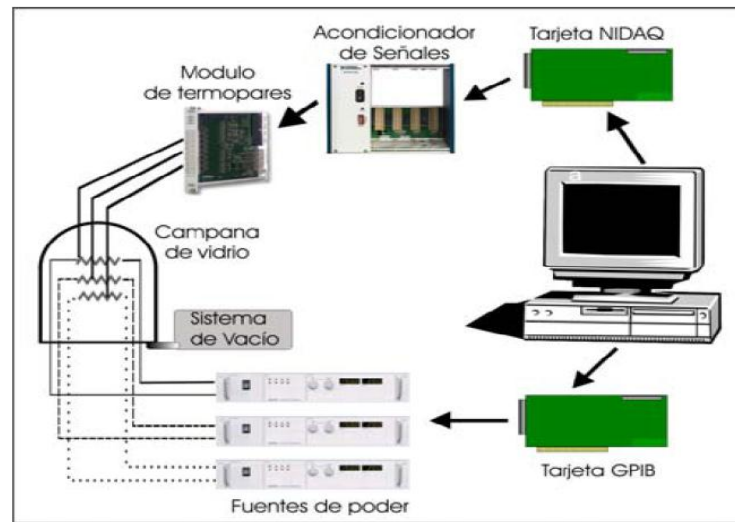


Figura 2.4: Proceso de control de temperatura del Investigador J. Balderas.

El Laboratorio de Sputtering de la UNI, cuenta con un controlador REX C700 [14] (El cual se muestra en la figura 2.6), para poder mantener controlada la temperatura adecuada a la cual necesiten elaborar películas semiconductoras. Los investigadores del Laboratorio de Sputtering de la UNI cuentan con una cámara de alto vacío para elaborar películas semiconductoras (La cual se muestra en la figura 2.5), pudiendo incrementar su temperatura en pleno proceso de elaboración. Dichas películas se obtienen en un sustrato que es colocado en un portasustrato metálico (tienen uno de cobre y otro de acero); el portasustrato es colocado en contacto con una resistencia eléctrica aislada térmicamente, la cual es sometida a una tensión de 48V, pudiendo soportar una potencia de 300W. Los investigadores del Laboratorio suelen trabajar 5.6 A en la resistencia.

Similar al modelo del investigador Balderas Zapata [16], los investigadores del Laboratorio de Sputtering de la UNI, introducen el Set Point deseado, a través del teclado del controlador REX C700, esperan un tiempo promedio de 25 minutos para que el portasustrato de la cámara de alto vacío que poseen, llegue a 400 grados Centígrados, con un error promedio de 1°C. Esta observación es visual, pues no poseen una forma de comunicación a una computadora personal.



Figura 2.5: Cámara de Vacío, UNI.



Figura 2.6: Controlador REX C700, UNI.

El Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección de Física de la PUCP, para calentar sus películas delgadas, trabaja con un horno externo a la cámara; para el control de la temperatura tienen un controlador TZN4H [9] Controlador de temperatura PID de Autonics Corporation. Los investigadores introducen el valor de Set Point deseado, en el teclado del controlador TZN4H, para el control de temperatura de las películas semiconductoras en el horno externo a la cámara; esperan un tiempo aproximado de 20 minutos para que el horno llegue a 500°C, y el error de medición mostrado en el visualizador del controlador es de 1.5°C. Esta observación es visual, pues el horno externo a la cámara de alto vacío, no tiene dispositivos de conexión a una computadora personal. La figura 2.7 muestra a la cámara de alto vacío de la Sección Física de la PUCP, la cual no posee aún un sistema de control de temperatura del portasustrato.

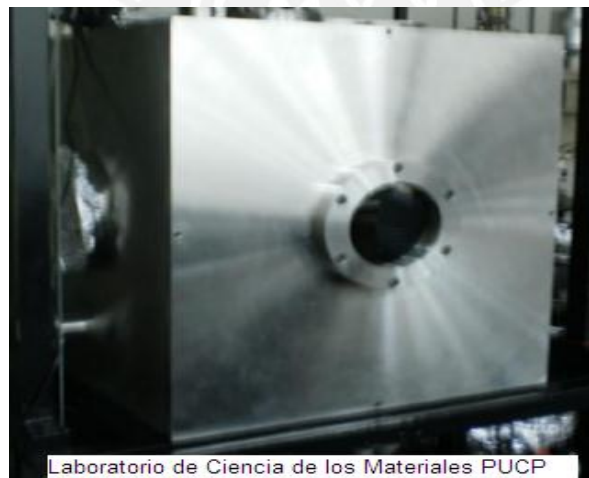


Figura 2.7: Cámara de alto vacío, PUCP

Las condiciones físicas dentro de la cámara de alto vacío fueron estudiadas, debido a que la transferencia de calor desde la resistencia eléctrica hacia el portasustrato mantiene condiciones las cuales garantizan que los parámetros de control obtenidos en el diseño del sistema de control, trabajarán adecuadamente también cuando se implemente este diseño en la cámara de alto vacío real.

La potencia eléctrica generada en la resistencia eléctrica es de 1200W RMS, parte de la cual se transfiere a la placa térmica y hacia el portasustrato; como se muestra en la figura 2.8, la resistencia eléctrica se encuentra en el interior de la placa térmica de cerámico que sostiene al portasustrato de acero.

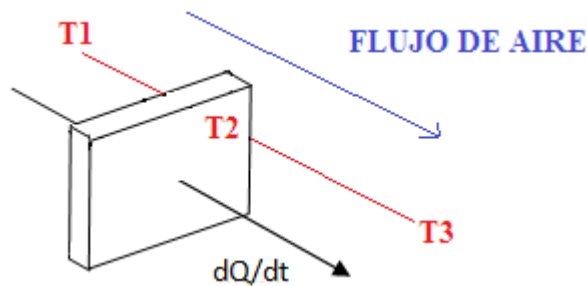


Figura 2.8: Transferencia de calor en el portasustrato.

Se plantea la Ecuación 2.1 [24] debido a que la resistencia eléctrica transfiere calor por conducción hacia la placa térmica, esta energía se transferirá hacia el portasustrato prevaleciendo pérdida de esta energía (en forma de calor) por conducción por ser mayor a otras formas de transferencia (convección y radiación):

$$dQ/dt = m \times C_p \times dT/dt = dQ \text{ (cond)}/dt = dQ \text{ (rad)}/dt + dQ \text{ (conv)}/dt \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.1}$$

Donde

m: masa del portasustrato en Kg

Cp: Capacidad calorífica del portasustrato en (J÷ (Kg×°C))

T: temperatura en K

dQ (cond)/dt: Flujo de calor por conducción en W

dQ (rad)/dt: Flujo de calor por radiación en W

dQ (conv)/dt: Flujo de calor por convección en W

Como se conoce dQ/dt

Lo cual se analizará en los siguientes casos:

*Caso1: Si existe una corriente de aire donde el flujo de aire sea diferente de cero, como se representa en la figura 2.8.

Para $T_1 = 200^\circ\text{C}$, $T_2 = 198^\circ\text{C}$ y $T_3 = 32^\circ\text{C}$, y de la ecuación 2.1:

$$dQ/dt = (K \times A \div L) \div (T_1 - T_2) = h \times A_x (T_2 - T_3) + \varepsilon \times \delta \times A_x (T_2^4 - T_3^4)$$

Donde

K: conductividad térmica en $(W \div (m \times K))$

A: área de la superficie del portasustrato en m^2

L: espesor del portasustrato en m

h: Coeficiente de convección en $(W \div (m^2 \times K))$

ε : Emisividad del material

δ : Coeficiente de Stefan Boltzman en $(W \div (m^2 \times K^4))$

Reemplazando valores (y operando en unidades internacionales):

$$(K \times A \div L) \div (T_1 - T_2) = (15 \times 0.15 \times 0.115 \div (10^{-3})) \times ((200 + 273) - (198 + 273)) = 517.5W$$

$$h \times A_x (T_2 - T_3) = 25 \times 0.15 \times 0.115 \times (198 - 32) = 71.59W$$

$$\varepsilon \times \delta \times A_x (T_2^4 - T_3^4) = 0.5 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.15 \times 0.115 \times ((198 + 273)^4 - (32 + 273)^4) = 19.84W$$

Reemplazando en Ecuación 2.1, se observa la desigualdad:

$$517.5W \neq 71.59W + 19.84W$$

$$517.5W \neq 91.43W$$

Lo cual implica que la cantidad de calor evacuado desde la resistencia eléctrica hacia la placa térmica y hacia alrededores será preponderantemente transferido por conducción.

*Caso 2: Si el flujo de alguna corriente de aire es muy pequeño o casi despreciable (convección natural), como se representa en la figura 2.8.

Para $T_1 = 200^\circ\text{C}$, $T_2 = 198^\circ\text{C}$ y $T_3 = 32^\circ\text{C}$, y de la Ecuación 2.1:

$$dQ/dt = (K \times A \div L) \div (T_1 - T_2) = h \times A \times (T_2 - T_3) + \epsilon \times \delta \times A \times (T_2^4 - T_3^4)$$

reemplazando valores, empero $h = 5$, puesto que es condición de convección natural.

Se obtiene:

$$517.5\text{W} \neq 14.32\text{W} + 19.84\text{W}$$

$$517.5\text{W} \neq 34.16\text{W}$$

Se observa que prevalece la transferencia de calor por conducción que por convección y radiación.

*Caso 3: Si se trabajase completamente en el vacío, como se representa en la figura 2.8:

Para $T_1 = 200^\circ\text{C}$, $T_2 = 198^\circ\text{C}$ y $T_3 = 32^\circ\text{C}$, y de la ecuación 1:

$$dQ/dt = (K \times A \div L) \div (T_1 - T_2) = h \times A \times (T_2 - T_3) + \epsilon \times \delta \times A \times (T_2^4 - T_3^4)$$

Reemplazando valores, empero $h \times A \times (T_2 - T_3) = 0$, puesto que se considera vacío de aire; es decir, la masa de aire es igual a cero.

Se obtiene:

$$517.5\text{W} \neq 0 + 19.84\text{W}$$

$$517.5\text{W} \neq 19.84\text{W}$$

Se observa que prevalece la transferencia de calor por conducción que por convección y radiación, mucho más en los casos 2 y 3 con respecto al caso 1.

Con dichos resultados se puede justificar que la cámara de alto vacío es similar al caso 3, mientras que el diseño elaborado en esta tesis corresponde al caso 2, con lo cual mientras la potencia eléctrica sea mayor que 517W (equivalente en unidades a la cantidad de calor que se convierte) trabajar en condición de convección natural será similar a trabajar en condición de vacío. Por ello el control de temperatura realizado para convección natural no tendrá diferencias al control que se realice en vacío. Es decir, los parámetros del controlador obtenidos en condición de caso 2 (convección natural) podrán satisfacer también el control de temperatura del portasustrato en vacío.

Cabe resaltar que también puede notarse que la relación $k \div L > h$;

Puesto que $15000(W \div (K \times m^2)) > 25(W \div (K \times m^2))$,

Si aun así no sea tan próxima la convección natural, la transferencia de calor prevalece por conducción. En las demostraciones no se han tomado en cuenta efecto de cambio de la capacidad de calorífica para el rango de trabajo en el control de temperatura del portasustrato, empero este cambio es muy pequeño, que no diferenciará mucho de los resultados obtenidos [23].



CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA DEL PORTASUSTRATO DE LA CÁMARA DE ALTO VACÍO.

El control de temperatura del portasustrato para la cámara de alto vacío de la Sección Física de la PUCP; se logró mediante el diseño de un algoritmo de control, en el software LabVIEW [15] (Versión LabVIEW 2010). Las pruebas experimentales se realizaron en una caja metálica que aproximan las condiciones físicas a la cámara de alto vacío (Anexo D).

Para el diseño del algoritmo de control se siguió la siguiente metodología:

- Analizar el comportamiento de la planta, temperatura ($^{\circ}\text{C}$) versus tiempo (s), en el rango de temperatura que trabajarán los investigadores de laboratorio [$48\text{-}560^{\circ}\text{C}$]; Es decir, conocer la respuesta del actuador-planta frente a los cambios de la señal de entrada y calcular una función de transferencia donde se aproximen curvas lineales.
- Calcular los parámetros de controlador.
- Diseñar el algoritmo de control.
- Realizar simulaciones y pruebas del diseño.

Con la metodología planteada se justifica poder controlar la temperatura del portasustrato.

En la figura 3.1 se muestra en diagrama de bloques, el sistema de control de temperatura diseñado. (Las fotografías de los componentes del diseño se muestran en el anexo D).

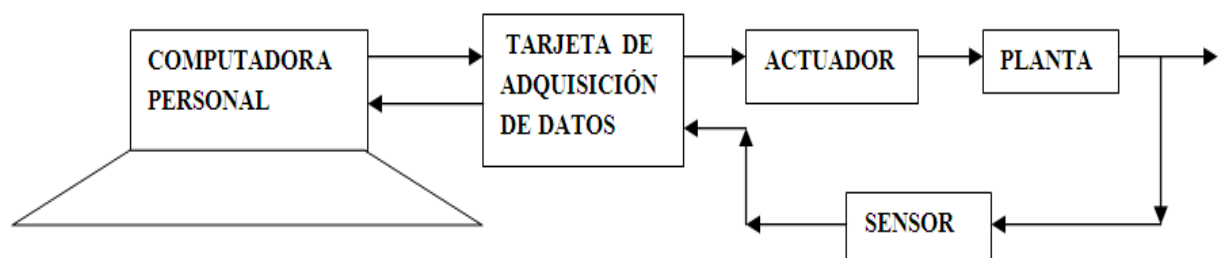


Figura 3.1: Sistema de Control de Temperatura.

El algoritmo de control diseñado es ejecutado por un computador personal; y una tarjeta de adquisición de datos es requerida para interactuar y tomar acción de control en la planta diseñada. Se utilizó la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments DAQ NI USB

6008 [11], de la cual se usa una entrada analógica para el sensor, y dos salidas analógicas, para la acción de control. Es requerimiento de los investigadores del Laboratorio de Ciencia de los Materiales trabajar con esta tarjeta, pues permitirá mayor versatilidad para la adquisición de más variables (para futuras aplicaciones en el laboratorio) como por ejemplo una buena resolución de 12 bits para la conversión análogo-digital de la señal medida [11].

El actuador que toma acción de control en la planta es un relé de estado sólido SSR 25 de Amperios, entrada en corriente continua (3 a 32 VDC) y salida en voltaje alterno (24 a 380 VAC), fabricado por FOTOTEK US [15]; Se ha escogido el relé de estado sólido debido a que estos relés en comparación a relés electromecánicos, poseen una alta velocidad de conmutación (buena reacción a la acción de control) y no poseen contactos mecánicos que puedan desgastarse con el paso de la corriente eléctrica hacia la placa térmica. Inicialmente se trabajó con un relé de contacto. Sin embargo, este relé de contacto no soportaba cambios bruscos de 5.6 A de corriente eléctrica, realizado en pruebas de control (cuando la placa trabaja a su máxima potencia) y se deterioró rápidamente. Puede reemplazarse por otros dispositivos electrónicos, empero el relé de estado sólido tiene integrado la circuitería adicional que se necesitaría en una etapa de diseño electrónico mediante TRIACS.

La acción de control permite la transferencia de corriente eléctrica en la resistencia eléctrica interna a la placa térmica que al incrementar su temperatura transferirá calor al portasustrato o cuando se corta la transferencia de corriente eléctrica en la resistencia, disminuye la transferencia de calor al portasustrato debido a la disminución de temperatura.

El sensor es una termocupla tipo K, de rango de -180°C a 1350°C [12], [21] que posicionada en contacto adecuadamente al portasustrato monitorea la temperatura de éste. Se decidió trabajar con la termocupla tipo K debido a que su amplio rango de trabajo permite a los investigadores utilizar el diseño realizado en aplicaciones cercanas a los 1000°C . Se puede utilizar también una termocupla tipo J, puesto que su rango de medición -180°C a 750°C [12], [21] incluye al rango de trabajo del control de temperatura del portasustrato; Sin embargo, las pruebas fueron realizadas en condiciones físicas fuera de la cámara, y a temperaturas cercanas a los 560°C , una termocupla tipo J no presenta buena respuesta por condiciones de oxidación [12], [21].

El sensor es acondicionado por el circuito integrado AD595 [18] que permite un buen acondicionamiento de la señal de temperatura mediante una etapa de compensación y amplificación. El acondicionamiento de la señal de temperatura puede realizarse mediante otros diseños; Sin embargo, el integrado AD595 ofrece ventajas como atenuaciones de ruido, y estabilidad en la adaptación de señal [18].

3.1 Reconocimiento de la planta

La planta es el espacio físico donde se realizará el control de temperatura, el portasustrato dentro de la cámara de alto vacío. Sin embargo, el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección Física de la PUCP no posee un sistema adecuado para calentar el portasustrato en el rango de temperatura requerido por los investigadores que está entre 48 a 560°C. El portasustrato donde elaboran las películas semiconductoras, sin control de temperatura dentro de la cámara de alto vacío, es mostrado en la figura 3.2 sobre el cual se encuentran muestras a pulverizar y el sustrato.

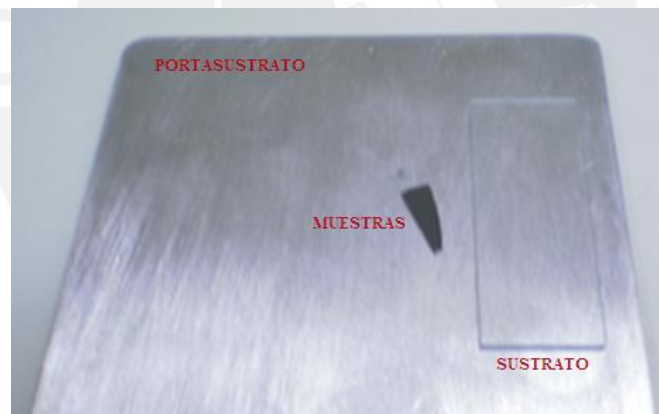


Figura 3.2: Portasustrato, PUCP.

Se ha diseñado un sistema para realizar el control de temperatura del portasustrato, el cual está formado por una placa térmica de cerámico (Figura 3.3 y 3.4), en su interior se encuentra una resistencia eléctrica de 50 Ohmios aproximadamente, capaz de proporcionar alrededor de 1200W de potencia eléctrica, que por efecto Joule permitirá transferencia de calor al portasustrato que se coloque sobre la placa térmica. Se utilizó un fusible de 6A 220V AC, para protección contra cortocircuito y sobrecarga.



Figura 3.3: Placa térmica, vista frontal.

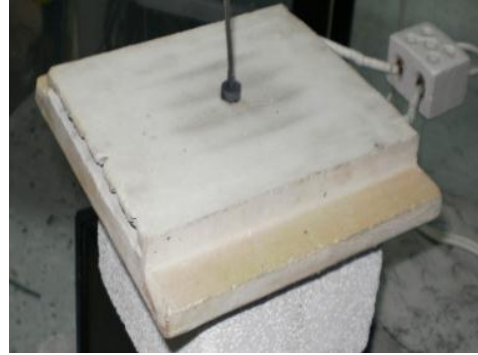


Figura 3.4: Placa térmica.

La figura 3.5 muestra a la placa térmica (diseño final), forrada completamente con acero y en su superficie superior se muestra al portasustrato. Para el diseño elaborado, se trabajó con un portasustrato de acero; puesto que en el rango de trabajo de 48 a 560°C de las pruebas experimentales, este material ofrece mejores resultados comparado a otros materiales como el aluminio.

En una experiencia, el aluminio empezó a deformarse y variar sus propiedades químicas a una temperatura cercana a los 450°C, mientras que ello no ocurrió con el acero (Anexo D). La figura 3.6 muestra la placa térmica y al portasustrato calentado a una temperatura cercana a los 540°C.

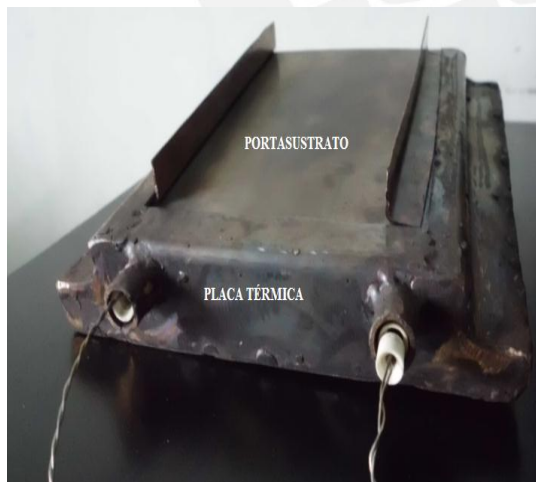


Figura 3.5: Placa térmica.

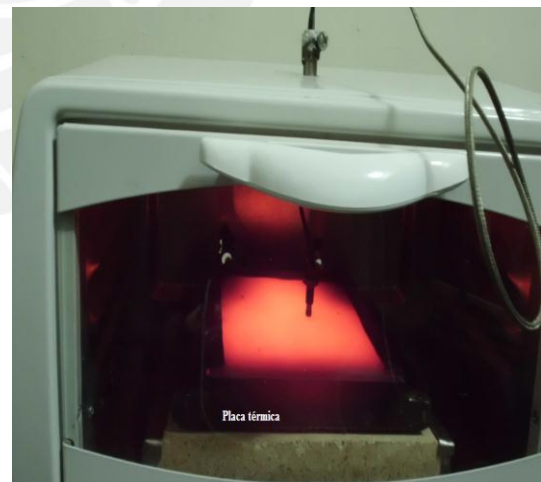


Figura 3.6: Placa térmica a 540°C

3.2 Característica del actuador y planta

Para tomar acción sobre la placa térmica y el portasustrato (planta) se realizó un circuito impreso donde se encuentra el circuito integrado AD595 [18], el cual recibe la señal de temperatura desde la termocupla y permite la adaptación de temperatura a un equivalente en $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, esta señal es transmitida hacia la tarjeta de adquisición de datos, para lo cual pasó por un seguidor de voltaje elaborado por un amplificador operacional TL081 [26], para la adaptación de la señal, una alta impedancia de entrada, permite un buen acoplamiento de impedancias para transmisión de la señal.

Fue necesario trabajar con un seguidor de voltaje debido a que experimentalmente se notó que la señal de temperatura antes de ingresar a la tarjeta de adquisición de datos, se atenuaba, por ello la necesidad de adaptar un seguidor de voltaje elaborado con amplificadores operacionales, que a su vez ofrecen alta impedancia de entrada permitiendo extraer poca corriente del circuito AD595, el cual adapta la señal de la termocupla a un equivalente de voltaje. Además, el seguidor de voltaje ofrece protección a la tarjeta de adquisición de datos y al circuito integrado AD595 [27].

En el circuito impreso diseñado, también se encuentra un microcontrolador ATMEGA8 [25], se decidió trabajar con este microcontrolador debido a que posee varios registros además de un cristal oscilador propio de 8MHz, y sus instrucciones de programación fueron estudiadas en pre grado en la Sección de Ingeniería Electrónica, de la PUCP.

Por ello este microcontrolador permite proporcionar señales de PWM (variación de ancho de pulso) que brinda equivalentes de señal escalón hacia el portasustrato. Fue necesario generar señales PWM debido a que la señal del controlador (como resultado de la ejecución del algoritmo de control) es 0 ó 5V, no pudiéndose con estos 2 valores tener más escalones de voltaje para tomar acción en la planta. Se trabajó con una frecuencia de 3.8Hz para la señal PWM, generada desde el microcontrolador, puesto que experimentalmente se notó que a esta frecuencia de trabajo y para los porcentajes de 2 a 80% como ciclos de trabajo, se llegaba a calentar el portasustrato dentro del rango requerido por los investigadores.

La elección del valor de porcentaje de PWM (%PWM) es transmitida desde el computador personal hacia la tarjeta de adquisición de datos, atraviesa un seguidor de voltaje (manteniendo estable la señal de voltaje) hacia el microcontrolador. La figura 3.7 muestra a todos los componentes del diseño (Anexo D).

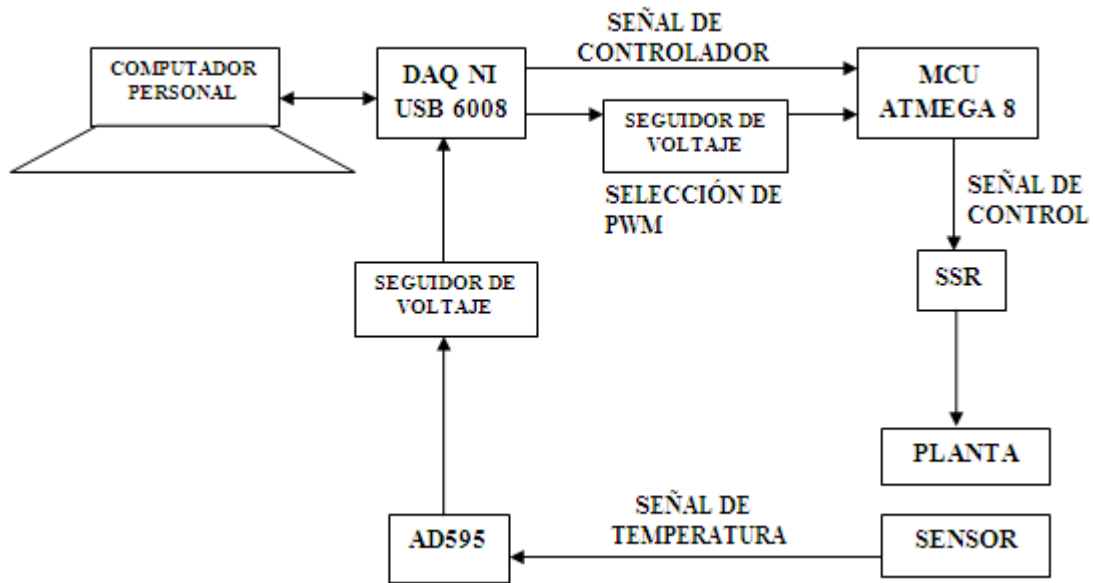


Figura 3.7: Componentes del sistema de control en bloques.

La figura 3.8 muestra al circuito de control, se observa el relé de estado sólido, la tarjeta de adquisición de datos, y circuito impreso para adaptación de señal (Anexo B).

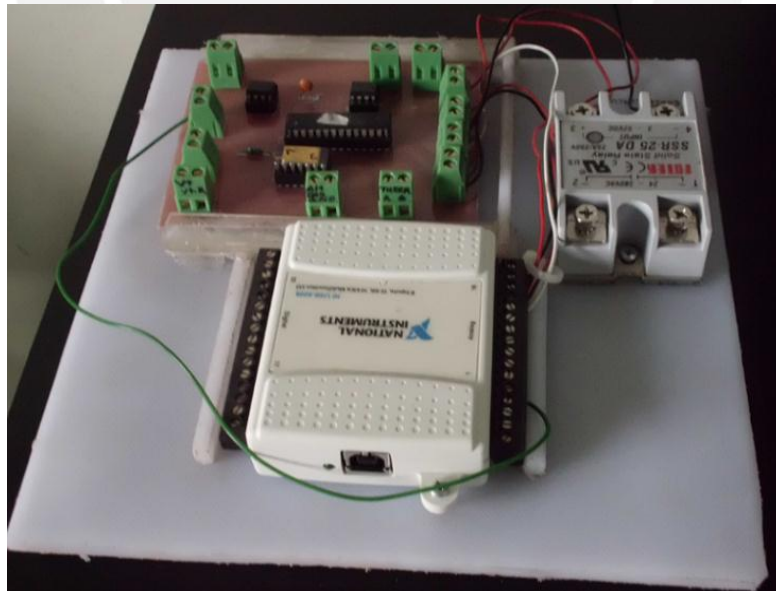


Figura 3.8: Vista del circuito de control.

Para controlar la temperatura del portasustrato fue necesario conocer en qué rangos de temperatura, el portasustrato tiene una relación lineal (o aproximada) entre la temperatura medida como respuesta al escalón que se le asigne. Para lograr ello se diseñó un algoritmo que en lazo abierto monitoreó la temperatura del portasustrato en función a la señal PWM (generada por el microcontrolador ATMEGA 8) que se aplicaba al actuador.

Puede utilizarse otro dispositivo para generar señales PWM, pero se optó por el microcontrolador por su capacidad de generar más operaciones que faciliten el diseño total. No se trabajó con la tarjeta de adquisición de datos para generar señal PWM, puesto que no tiene suficientes contadores para poder trabajar señales independientes de PWM en secuencia con el algoritmo de control, pues se genera retardos el tiempo de la ejecución del programa principal.

La figura 3.9 muestra al algoritmo diseñado en lazo abierto en LabVIEW, se observa un filtro pasa bajos para filtrar la señal de ruido de red eléctrica; debido a varias pruebas experimentales se conoció que las características del filtro son tener una frecuencia de corte ligeramente mayor a la frecuencia con la cual cambia la señal de temperatura y como se trabajó con la plataforma de LabVIEW se implementó el filtro de frecuencia de corte 0.125Hz, que es mayor a la frecuencia de cambio de la señal de temperatura: aproximadamente 0.1Hz en proceso de calentamiento y menor a 0.1Hz en estado estacionario (Ver anexo F).

Además, se observa también en la figura 3.9, la opción para escoger un adecuado valor de PWM (modulación de ancho de pulso), que representa el valor del escalón de voltaje que permitirá obtener diferentes respuestas a la planta. También se observa que mediante "Write to measurement file" se guarda la información medida, en un archivo del computador personal, creado por el usuario.

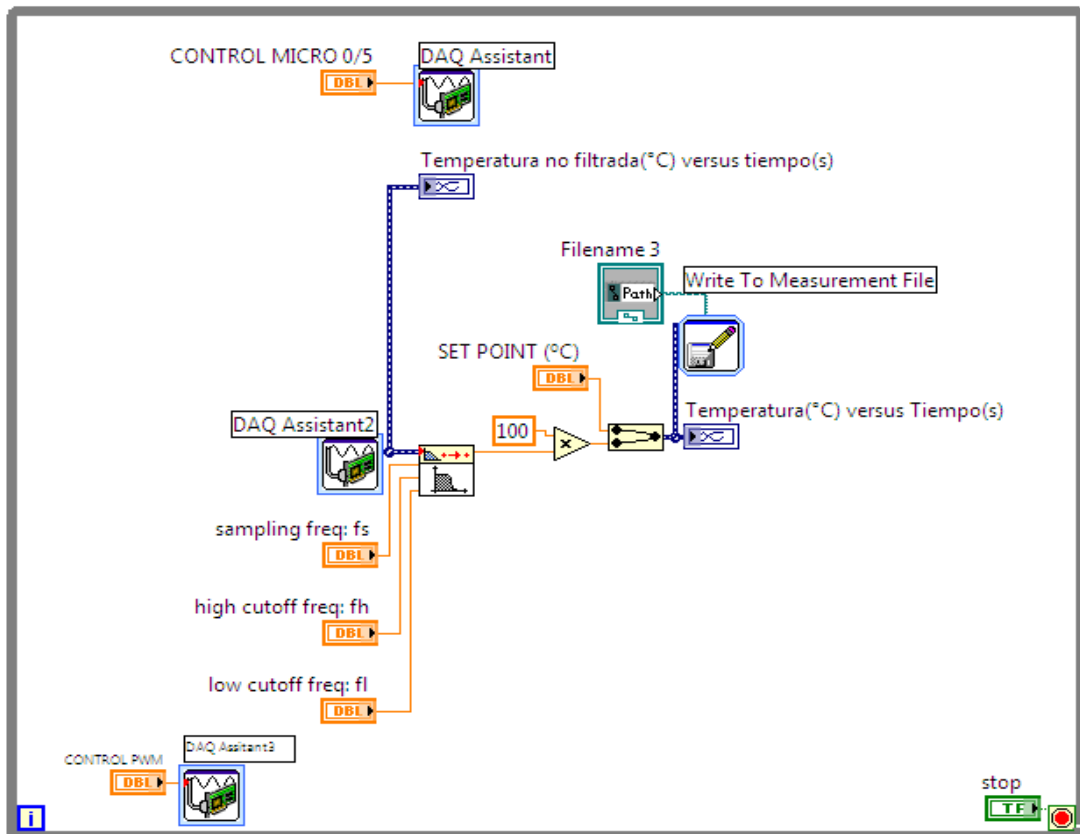


Figura 3.9: Programa en LabVIEW para obtener la característica del actuador.

Con el algoritmo en lazo abierto, mostrado en la figura 3.9; se puede conocer la respuesta de la planta frente a los cambios de voltaje como señal de entrada a la planta. Estos cambios en la señal de entrada se lograron variando el ancho de pulso (porcentaje) de señal PWM a una frecuencia de 3.8Hz (Se obtuvo, que a esta frecuencia se permite generar señales para un adecuado calentamiento del portasustrato), en el relé de estado sólido el cual activa o desactiva el flujo de corriente eléctrica en la resistencia eléctrica interna a la placa térmica.

Las figura 3.10 y 3.11 muestran las respuestas del actuador-planta en lazo abierto. Se aplicó señales de PWM de 2%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% y 80% de variación de su ancho de pulso a una frecuencia de 3.8Hz.

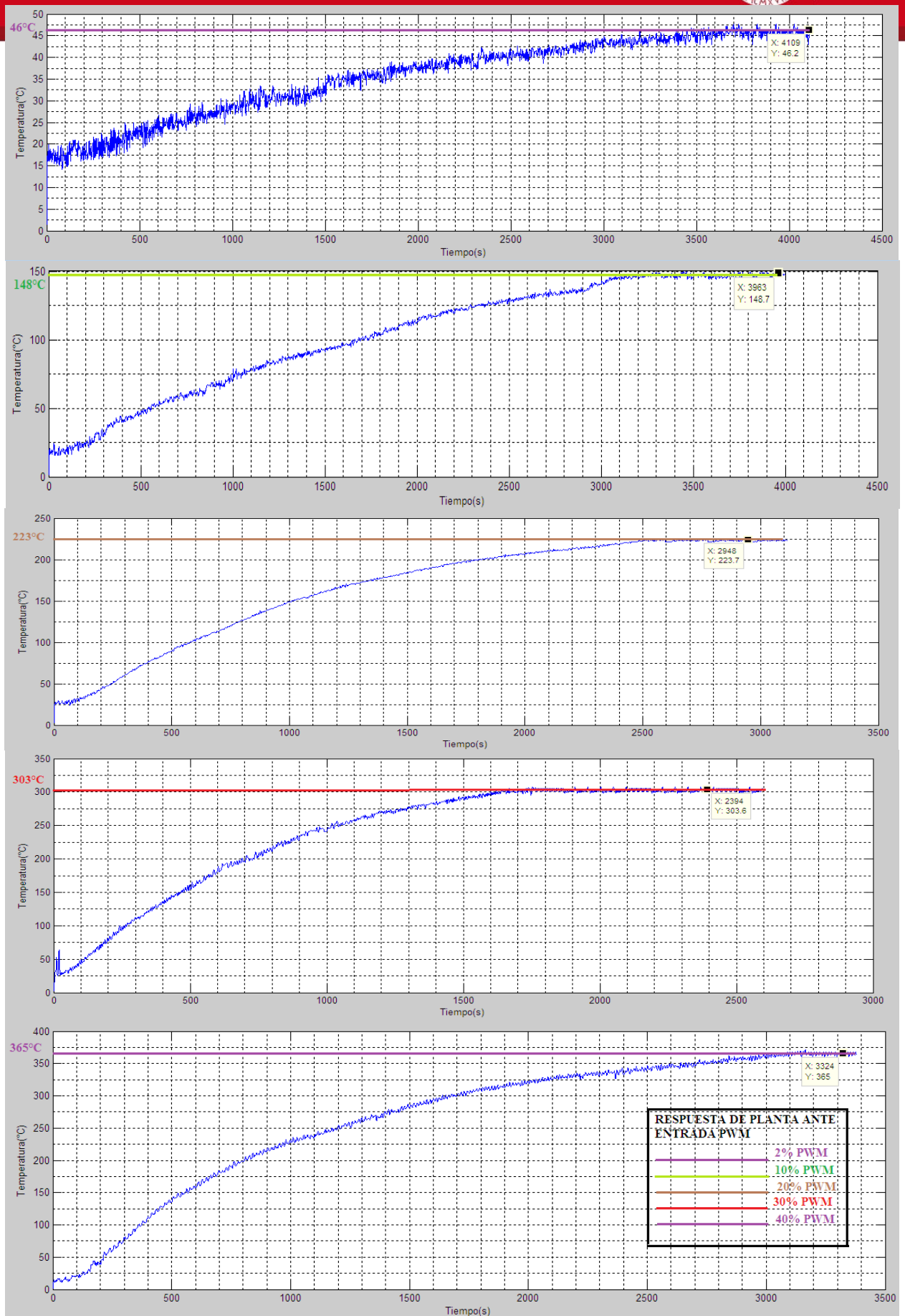


Figura 3.10: Respuesta del actuador-planta para 2%, 10%, 20%, 30%, y 40% de PWM.

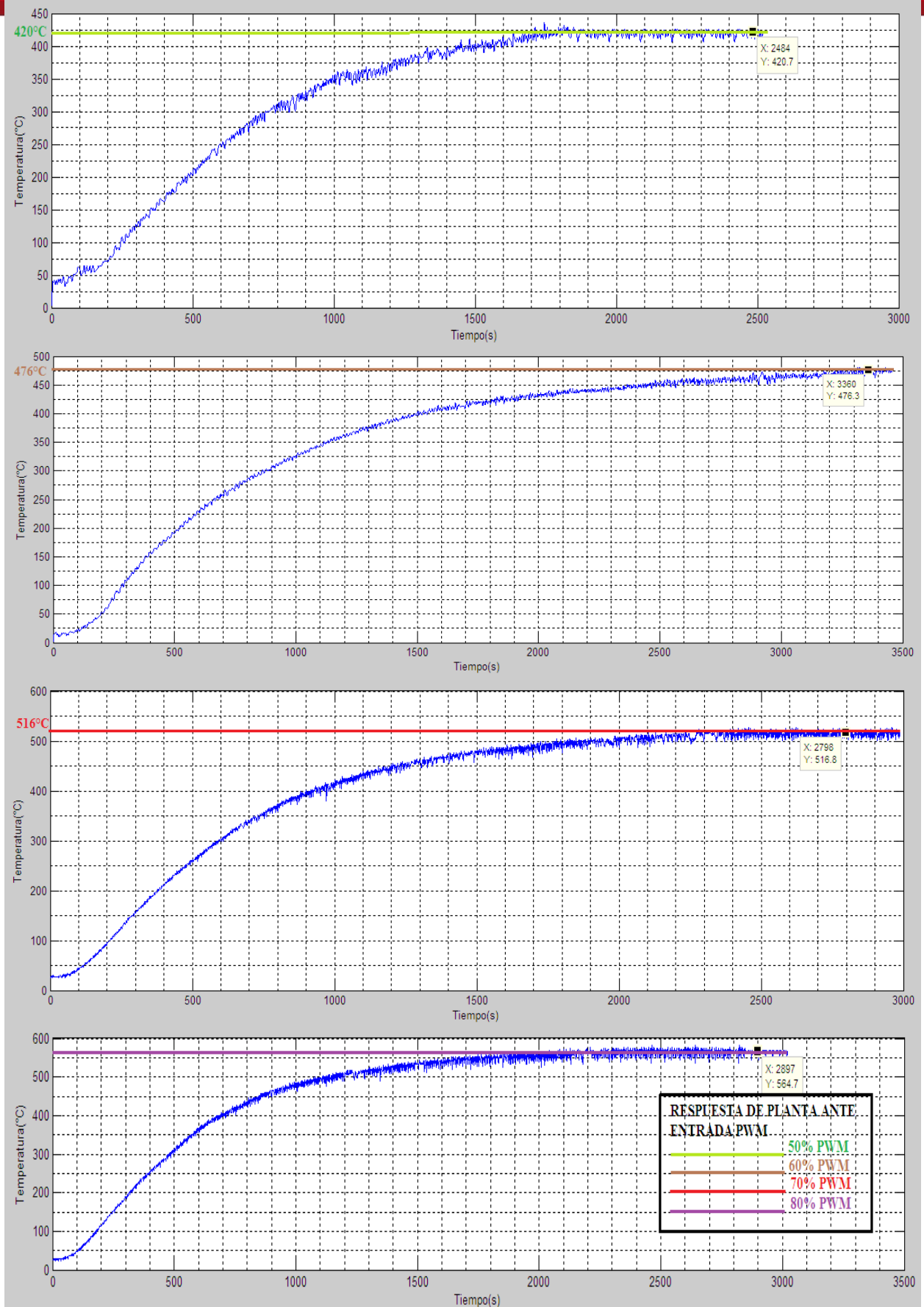


Figura 3.11: Respuesta del actuador-plantia para 50%, 60%, 70%, y 80% de PWM.

La tabla 3.1, ordena la correspondencia entre las entradas de PWM y respectivas temperaturas como respuesta; realizado en la planta en lazo abierto.

| PWM(%) | Temperatura(°C) |
|--------|-----------------|
| 2 | 46 |
| 10 | 148 |
| 20 | 223 |
| 30 | 303 |
| 40 | 365 |
| 50 | 420 |
| 60 | 476 |
| 70 | 516 |
| 80 | 564 |

Tabla 3.1: Correspondencia entre PWM y temperatura.

La figura 3.12 muestra la curva característica del actuador-planta; que se obtuvo por la correspondencia entre PWM y temperatura. Se observa cuatro rangos lineales 2-10%, 10-40%, 40-60% y 60-80% de PWM.

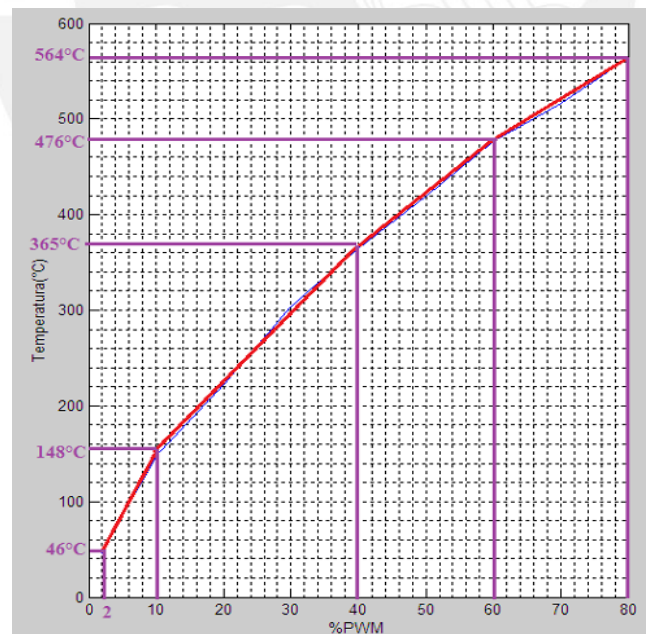


Figura 3.12: Curva característica del actuador-planta.

Para conocer la función de transferencia en cada uno de los rangos anteriores (Donde hay aproximación lineal) se trabajaron con las siguientes relaciones que se muestra en la figura 3.13:

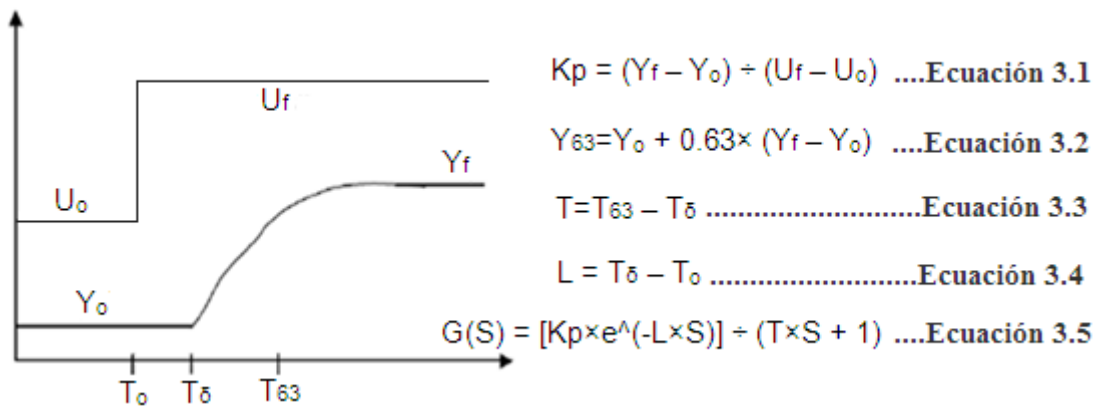


Figura 3.13: Relaciones para obtener función de transferencia.

Para probar los modelos matemáticos de la planta (función de transferencia) en los intervalos lineales, se ha realizado un programa en LabVIEW. En la figura 3.14 se observa el escalón de entrada, la función de transferencia que se le asigne a cada rango, la temperatura inicial (asumir 48°C, como sugerencia de los investigadores del laboratorio) como perturbación [19], [20]; un filtro y una señal ruidosa (simulada) de 1°C que se experimentó inicialmente en el monitoreo de temperatura sin filtro digital.

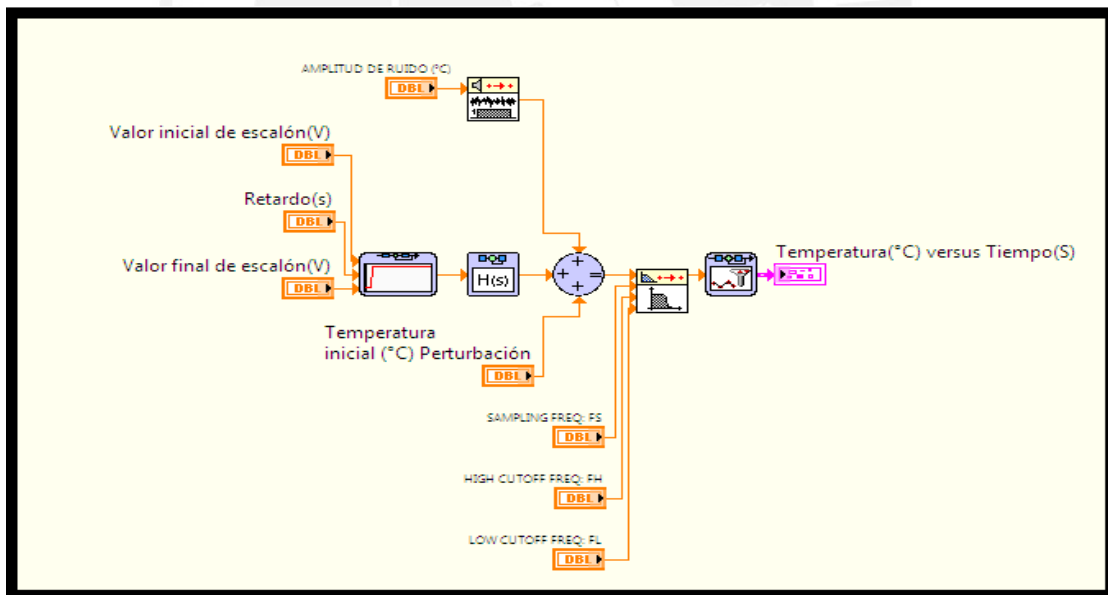


Figura 3.14: Programa en LabVIEW para verificar modelos en los rangos de operación.

Para obtener los parámetros de los modelos en las zonas lineales se realizan ensayos en lazo abierto, se aplican escalones a la entrada y se obtiene la respuesta dinámica del sistema (Figuras 3.15 a 3.22).

La respuesta del sistema en el rango 2 a 10% de PWM se muestra en la figura 3.15:

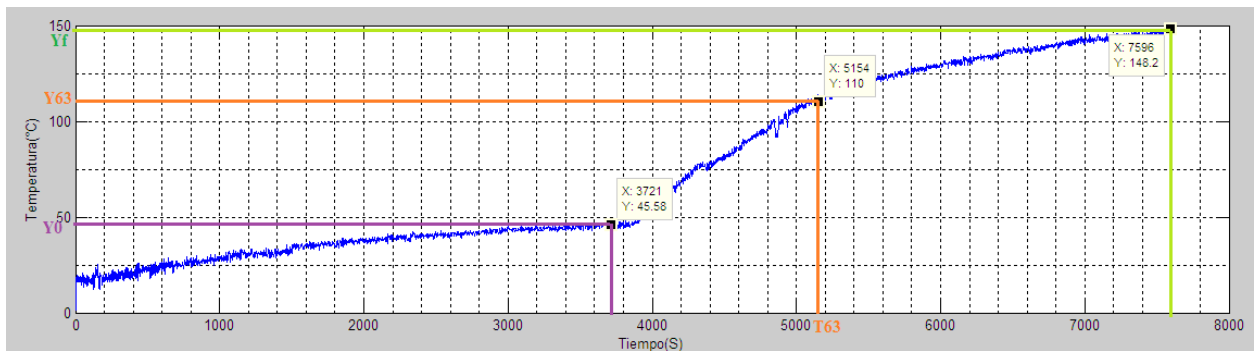


Figura 3.15: Respuesta del sistema en el rango de 2 a 10% de PWM.

En la curva de respuesta del sistema se toman medidas para hallar la función de transferencia.

$$K_p = (Y_f - Y_0) \div (U_f - U_0) = (148.2 - 45.58) \div (0.1 \times 5 - 0.02 \times 5) = 256.55$$

$$Y_{63} = Y_0 + 0.63 \times (Y_f - Y_0) = 45.58 + 0.63 \times (148.2 - 45.58) = 110.23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 3721\text{s}, T_\delta = 3725\text{s}, T_{63} = 5154\text{s}$$

$$T = T_{63} - T_\delta = 5154 - 3725 = 1429\text{s}$$

$$L = T_\delta - T_0 = 3725 - 3721 = 4\text{s}$$

$$G_1(S) = [K_p \times e^{-L \times S}] \div (T \times S + 1) = [256.55 \times e^{-4 \times S}] \div (1429 \times S + 1)$$

Se prueba el modelo para el rango de 2 a 10% de PWM.

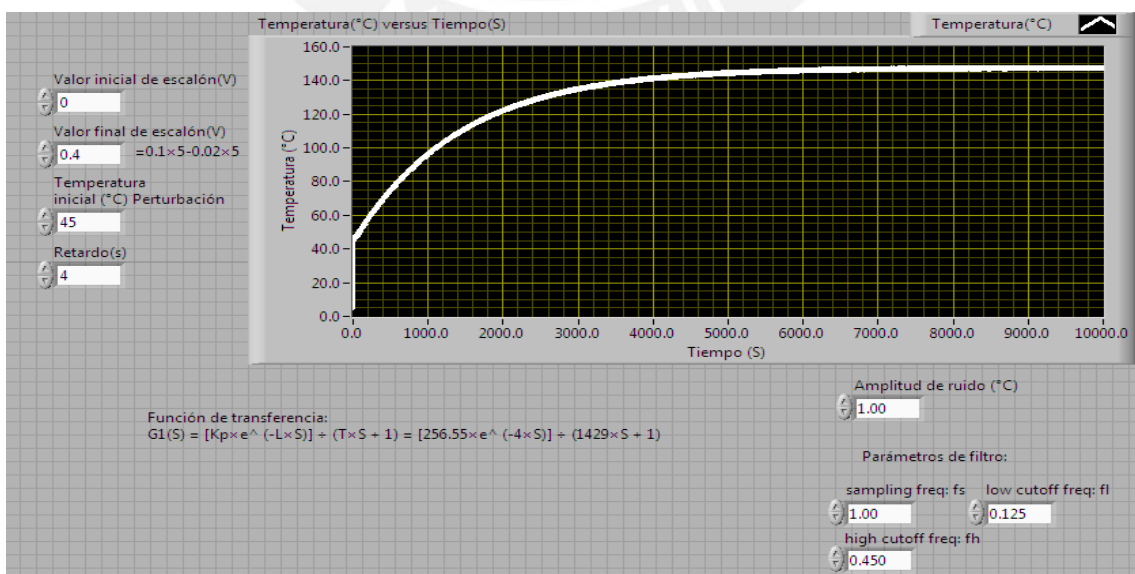


Figura 3.16: Curva de respuesta del sistema para el rango de 2 a 10% de PWM.

La respuesta del sistema en el rango 10 a 40% de PWM se muestra en la figura 3.17:

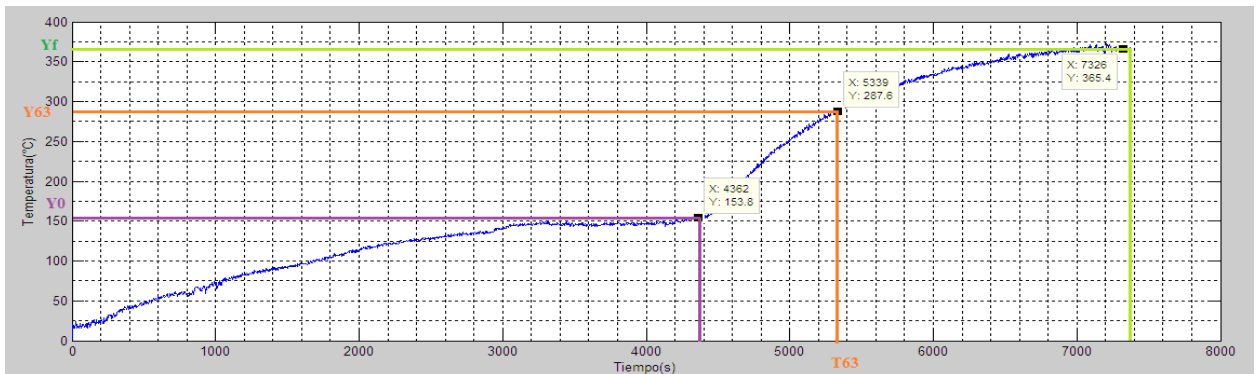


Figura 3.17: Respuesta del sistema en el rango de 10 a 40% de PWM.

En la curva de respuesta del sistema se toman medidas para hallar la función de transferencia.

$$K_p = (Y_f - Y_o) \div (U_f - U_o) = (365.4 - 153.8) \div (0.4 \times 5 - 0.1 \times 5) = 141.07$$

$$Y_{63} = Y_o + 0.63 \times (Y_f - Y_o) = 153.8 + 0.63 \times (365.4 - 153.8) = 287.11 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_o = 4362 \text{ s}, T_\delta = 4366 \text{ s}, T_{63} = 5339 \text{ s}$$

$$T = T_{63} - T_\delta = 5339 - 4366 = 973 \text{ s}$$

$$L = T_\delta - T_o = 4 \text{ s}$$

$$G_2(S) = [K_p x e^{-LxS}] \div (TxS + 1) = [141.07 x e^{-4xS}] \div (973xS + 1)$$

Se prueba el modelo para el rango de 10%PWM a 40%PWM:

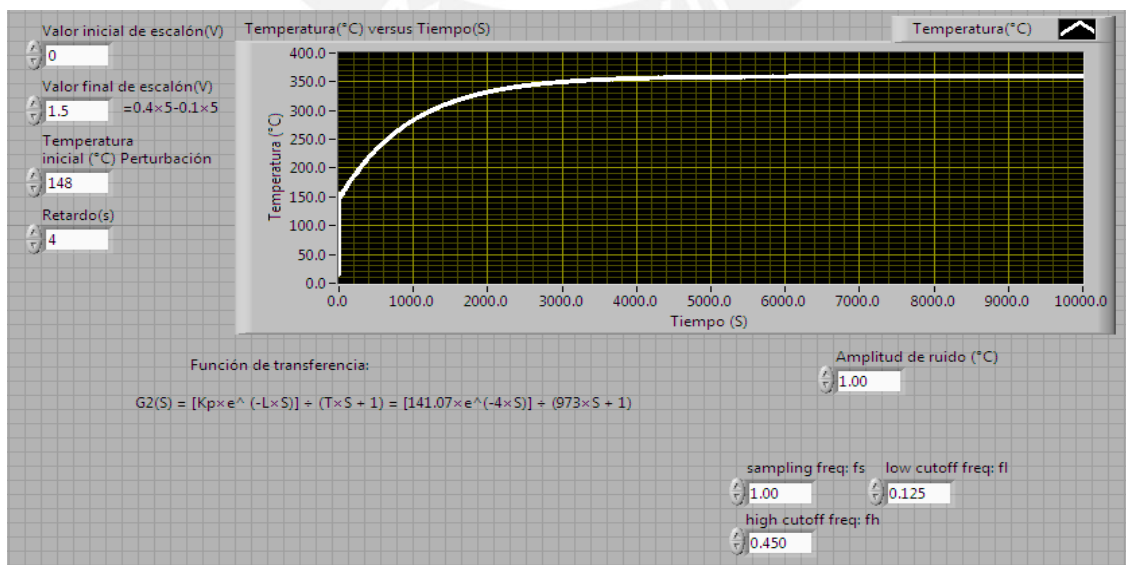


Figura 3.18: Curva de respuesta del sistema para rango 10 a 40% de PWM.

La respuesta del sistema en el rango 40 a 60% de PWM se muestra en la figura 3.19:

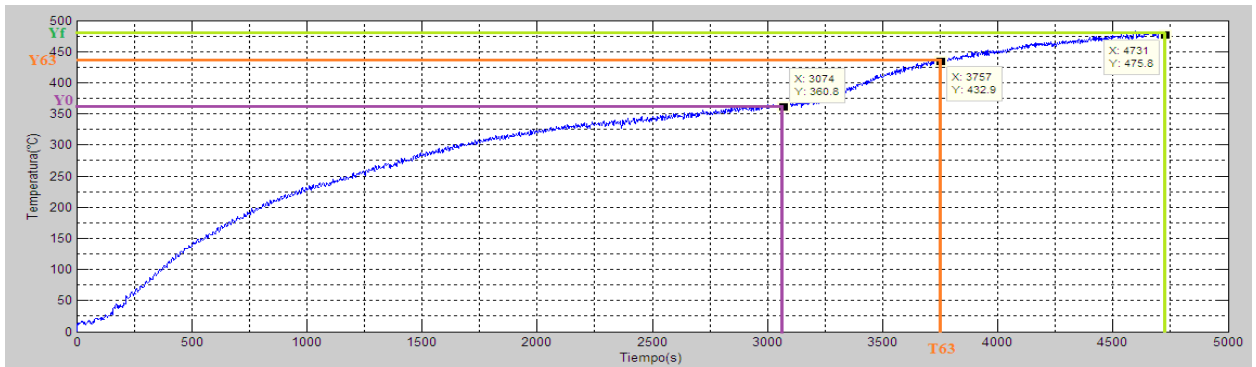


Figura 3.19: Respuesta del sistema en el rango de 40 a 60% de PWM.

En la curva de respuesta del sistema se toman medidas para hallar la función de transferencia.

$$K_p = (Y_f - Y_o) \div (U_f - U_o) = (475.8 - 360.8) \div (0.6 \times 5 - 0.4 \times 5) = 115$$

$$Y_{63} = Y_o + 0.63 \times (Y_f - Y_o) = 360.8 + 0.63 \times (475.8 - 360.8) = 433.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_o = 3074 \text{ s}, T_\delta = 3077 \text{ s}, T_{63} = 3757 \text{ s}$$

$$T = T_{63} - T_\delta = 3757 - 3077 = 680 \text{ s}$$

$$L = T_\delta - T_o = 3 \text{ s}$$

$$G_3(S) = [K_p \times e^{-L \times S}] \div (T \times S + 1) = [115 \times e^{-3 \times S}] \div (680 \times S + 1)$$

Se prueba el modelo para el rango de 40 a 60% de PWM:

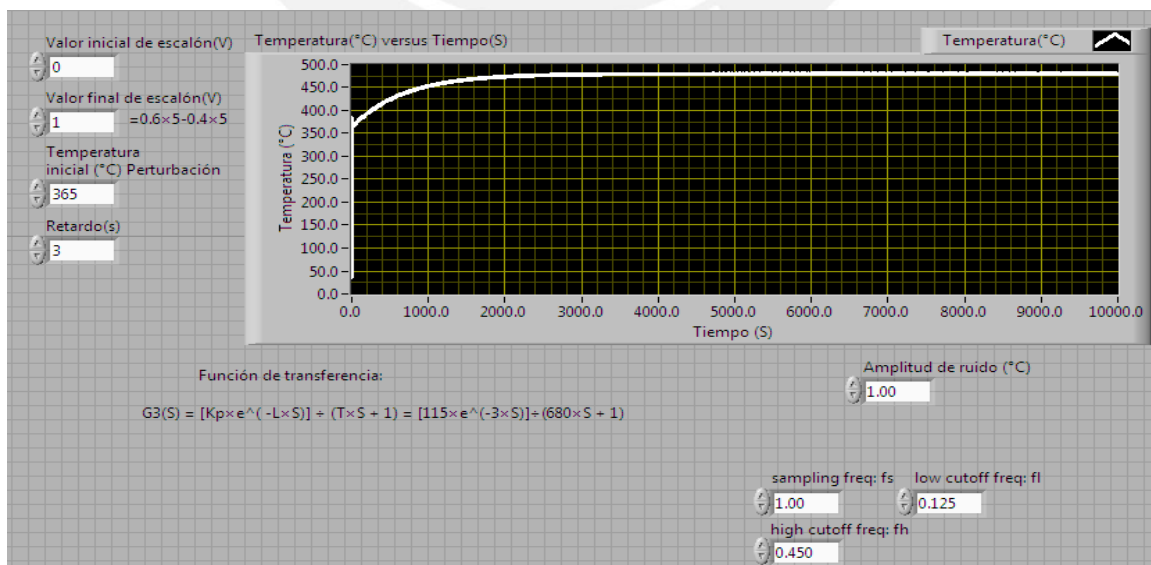


Figura 3.20: Curva de respuesta del Sistema para rango 40 a 60% de PWM.

La respuesta del sistema en el rango 60 a 80% de PWM se muestra en la figura 3.21:

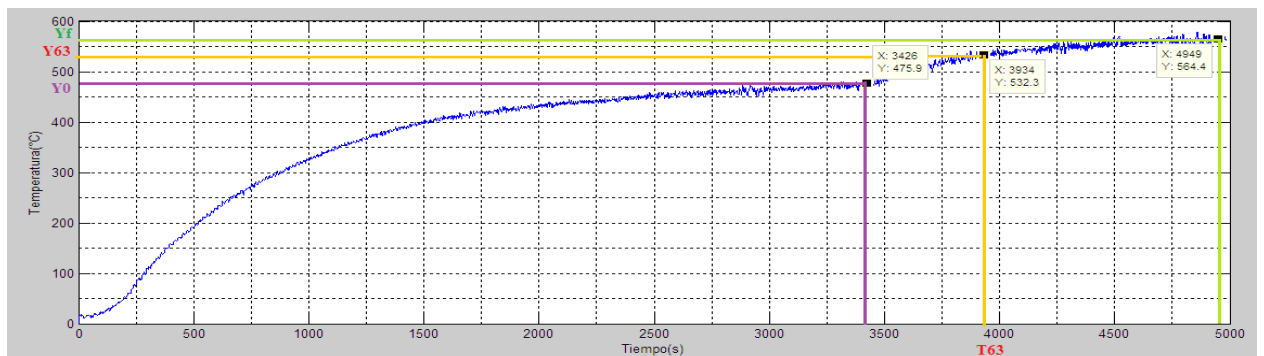


Figura 3.21: Respuesta del sistema en el rango de 60 a 80% de PWM.

En la curva de respuesta del sistema se toman medidas para hallar la función de transferencia.

$$K_p = (Y_f - Y_o) \div (U_f - U_o) = (564.4 - 475.9) \div (0.8 \times 5 - 0.6 \times 5) = 89$$

$$Y_{63} = Y_o + 0.63 \times (Y_f - Y_o) = 475.9 + 0.63 \times (564.4 - 475.9) = 531.66^\circ\text{C}$$

$$T_o = 3426 \text{ s}, T_{\delta} = 3429 \text{ s}, T_{63} = 3934 \text{ s}$$

$$T = T_{63} - T_{\delta} = 3934 - 3429 = 505 \text{ s}$$

$$L = T_{\delta} - T_o = 3429 - 3426 = 3 \text{ s}$$

$$G_4(S) = [K_p e^{-L \times S}] \div (T \times S + 1) = [89 e^{-3 \times S}] \div (505 \times S + 1)$$

Se prueba el modelo para el rango de 60 a 80% de PWM:

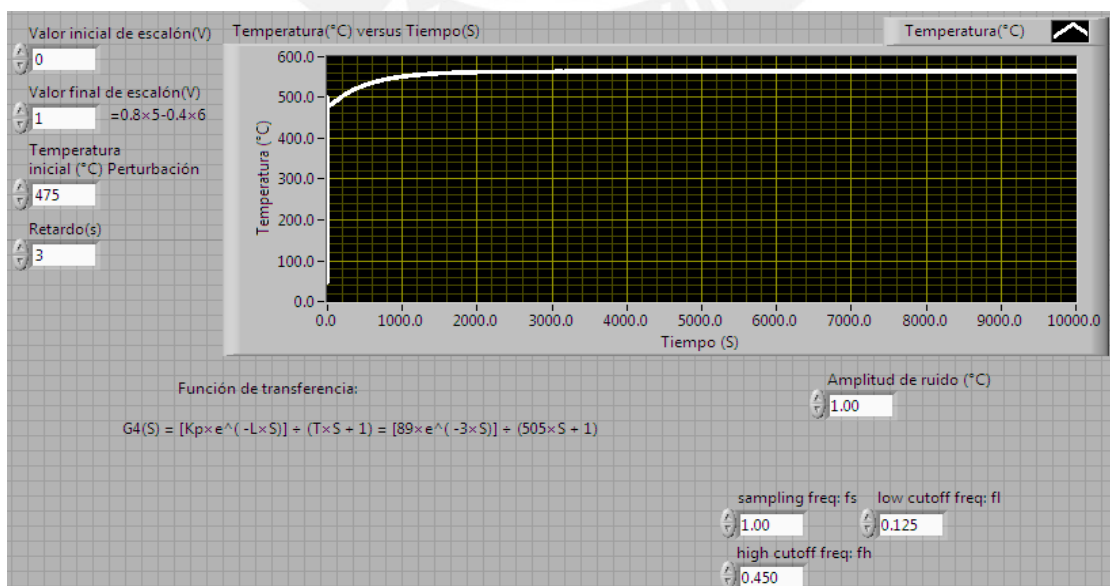


Figura 3.22: Curva de respuesta del sistema para rango 60 a 80% de PWM.

3.3 Adquisición de datos.

Para la adquisición y procesamiento de datos (temperatura medida), se trabajó con una termocupla tipo K, que posicionada adecuadamente en contacto al portasustrato midió su temperatura durante la transferencia de calor, de acuerdo a la señal del actuador que recibió órdenes del algoritmo en lazo abierto; ejecutado por el computador personal.

Dichos valores de temperatura luego fueron compensados y amplificados por el circuito integrado AD595 a la escala de 10mV/°C [18]. Después la señal de temperatura, expresada en Voltios, se transmite hacia una entrada analógica de la tarjeta de adquisición de datos de NI USB 6008 [11], donde se discretiza (se configura un tiempo de muestreo de 1s) hacia el computador personal, luego se procesaron y se hallaron las funciones de transferencia asignadas a cada rango lineal.

El tiempo de muestreo escogido es 1s (se configuró en la tarjeta de adquisición de datos), se escogió dicho valor por ser mucho menor a la quinta parte del tiempo de respuesta de la planta (Anexo E), lo cual se observa en las simulaciones y experiencias de las gráficas de control; con ello, los parámetros de control obtenidos pueden operarse directamente en el algoritmo diseñado [8]. En este caso en el computador personal se discretiza la señal de control, pues es éste quien ejecutará el algoritmo de control realizado en la plataforma de LabVIEW.

3.4 Diseño del control de temperatura.

El requerimiento es controlar la temperatura del portasustrato con un margen de error de 2°C, un sobre impulso máximo del 10% en todos los rangos de trabajo; y un tiempo de establecimiento de 30 minutos a 500°C.

Para obtener los parámetros del controlador se trabajó con el modelo propuesto por Ziegler and Nichols (Z&N) [17], [19] y [22]. Las tablas 3.2 a 3.5 muestran los valores de controladores obtenidos: Proporcional (P), Proporcional e integral (PI); y Proporcional, Integral y Derivativo (PID). (Anexo A)

-Para el rango de 2%PWM a 10%PWM, la función de transferencia $G1(S)$ obtenida es:

$$G1(S) = [Kp x e^{(-LxS)}] \div (TxS + 1) = [256.55 x e^{(-4xS)}] \div (1429xS + 1)$$

Con los datos obtenidos, se conocen los parámetros del controlador:

| CONTROLADOR1 | Kc | Ti(s) | Td(s) |
|--------------|--------|-------|-------|
| P | 139.25 | 0 | 0 |
| PI | 125.33 | 12 | 0 |
| PID | 167.10 | 8 | 2 |

Tabla 3.2: Parámetros del Controlador 1, para rango de 2 a 10% de PWM.

-Para el rango de 10%PWM a 40%PWM, la función de transferencia G2(S) obtenida es:

$$G2(S) = [Kp x e^{-LxS}] \div (TxS + 1) = [141.07 x e^{-4xS}] \div (973xS + 1)$$

Con los datos obtenidos, se conocen los parámetros del controlador:

| CONTROLADOR2 | Kc | Ti(s) | Td(s) |
|--------------|--------|-------|-------|
| P | 172.43 | 0 | 0 |
| PI | 155.19 | 12 | 0 |
| PID | 206.92 | 8 | 2 |

Tabla 3.3: Parámetros del Controlador 2, para rango de 10 a 40% de PWM.

-Para el rango de 40%PWM a 60%PWM, la función de transferencia G3(S) obtenida es:

$$G3(S) = [Kp x e^{-LxS}] \div (TxS + 1) = [115 x e^{-3xS}] \div (680xS + 1)$$

Con los datos obtenidos, se conocen los parámetros del controlador:

| CONTROLADOR3 | Kc | Ti(s) | Td(s) |
|--------------|--------|-------|-------|
| P | 197.10 | 0 | 0 |
| PI | 177.39 | 9 | 0 |
| PID | 236.52 | 6 | 1.5 |

Tabla 3.4: Parámetros del Controlador 3, para rango de 40 a 60% de PWM.

-Para el rango de 60%PWM a 80%PWM, la función de transferencia G4(S) obtenida es:

$$G4(S) = [Kp x e^{-LxS}] \div (TxS + 1) = [89 x e^{-3xS}] \div (505xS + 1)$$

Con los datos obtenidos, se conocen los parámetros del controlador:

| CONTROLADOR4 | Kc | Ti(s) | Td(s) |
|--------------|--------|-------|-------|
| P | 189.14 | 0 | 0 |
| PI | 170.22 | 9 | 0 |
| PID | 226.97 | 6 | 1.5 |

Tabla 3.5: Parámetros del Controlador 4, para rango de 60 a 80% de PWM.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Se muestran simulaciones para el control de temperatura del portasustrato, estas simulaciones corresponden a los cuatro rangos lineales de trabajo obtenidos en el portasustrato estudiado. Finalmente se muestran gráficas de procesos experimentales hechos al portasustrato, donde el control realizado tiene un error aproximado menor a 2°C en estado estacionario. Las pruebas experimentales se realizaron en una caja metálica que aproximan las condiciones físicas a las de la cámara de alto vacío (Anexo D).

Se ha decidido trabajar con controlador PI, debido a que la temperatura del portasustrato no tiene cambios abruptos, entonces la acción derivativa del controlador PID no sería necesaria pues generaría ruido al no encontrar cambios bruscos en la señal medida [19] (Anexo A).

Para simular las perturbaciones de ruido y carga [8], asumir 48°C como temperatura inicial del sistema donde se encuentre el portasustrato (sugerencia de los investigadores del laboratorio). Además, la naturaleza de la retroalimentación en el sistema de control diseñado influenciará en atenuar las perturbaciones [19].

Los parámetros del controlador diseñado, para cada uno de los rangos lineales encontrados, deberán ser escritos por el usuario en los programas de simulación y de pruebas (Figura 4.1 y 4.7), los cuales son recibidos por el elemento "PID gains" del PID.vi que presenta la plataforma LabVIEW. Este entorno de control "PID.vi" es muy versátil con muchas propiedades para el control del proceso, como por ejemplo permite no repetir valores de entrada al lazo del controlador PID para obtener los valores de la variable de salida en control (variable de control); de esa forma se optimiza en algoritmo de control diseñado. Por ello se optó trabajar con PID.vi en el algoritmo diseñado para el control de temperatura del portasustrato (en simulaciones y pruebas).

Los parámetros del controlador, tiempo de integración y tiempo de derivación se calcularon en unidades de segundos; para la ejecución de los algoritmos en simulaciones y pruebas se deben colocar los parámetros en unidades de minutos, pues así son requeridos por el PID.vi de los algoritmos diseñados.

4.1 Simulaciones

Se diseñó el programa mostrado en la figura 4.1, en LabVIEW, el cual se ejecutó adecuadamente con los parámetros de control en los rangos lineales del sistema 2-10%, 10-40%, 40-60% y 60-80% de PWM. Se observa los parámetros del controlador (“PID gains”), los parámetros del filtro, la perturbación que ingresa al sistema como ruido y perturbación de temperatura inicial del sistema. Todos estos valores pueden ser modificados por el usuario para poder analizar el sistema de control diseñado.

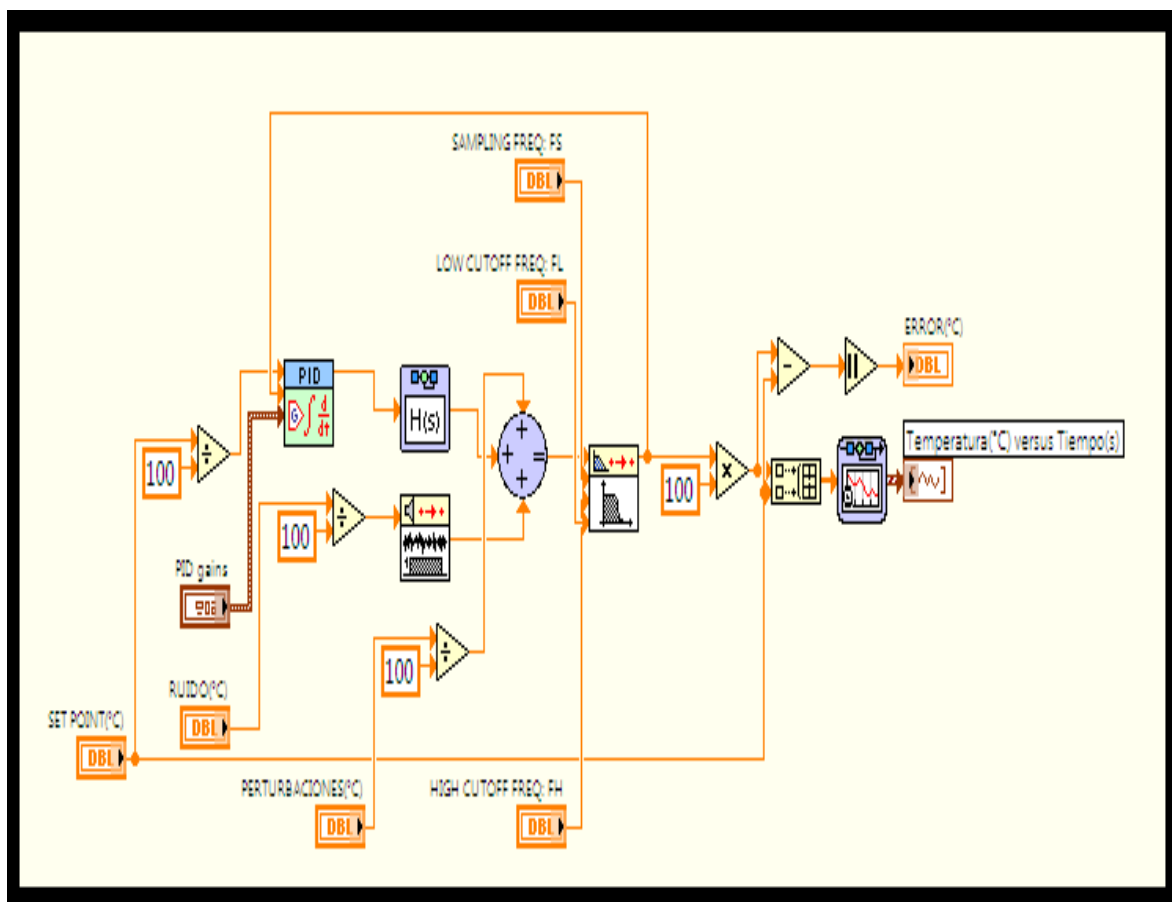


Figura 4.1: Programa en LabVIEW para simular la respuesta del sistema.

En las figuras 4.2 a 4.3 se muestran las simulaciones del proceso para Set Point de 125°C a 145°C, en el rango de 2 a 10% de PWM.

La figura 4.2 muestra las pruebas del controlador para 125°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.17°C.

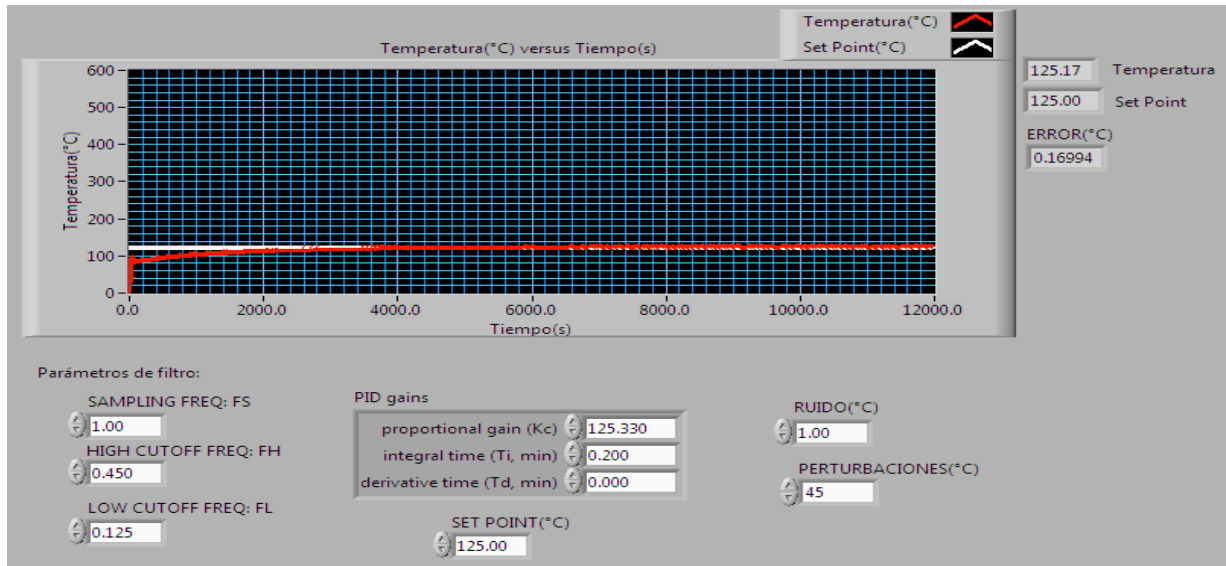


Figura 4.2: Simulación del proceso a un Set Point de 125°C.

La figura 4.3 muestra las pruebas del controlador para 145°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.47°C.

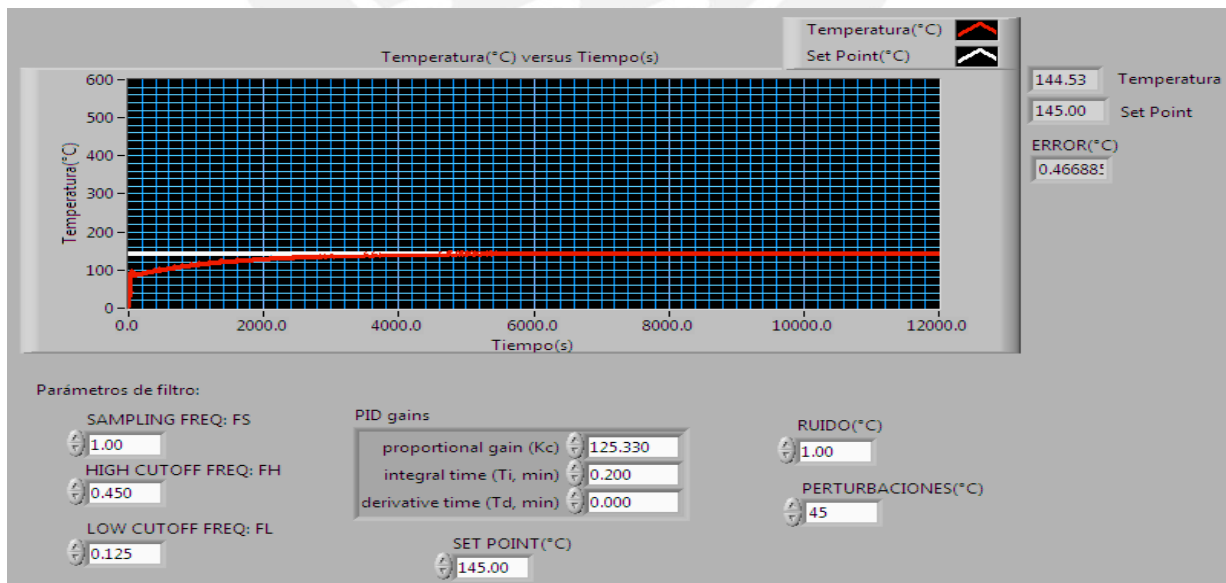


Figura 4.3: Simulación del proceso a un Set Point de 145°C.

En las figuras 4.4 a 4.5 se muestran las simulaciones del proceso para Set Point de 305°C a 365°C, en el rango de 10 a 40% de PWM.

- La figura 4.4 muestra las pruebas del controlador para 305°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.21°C:

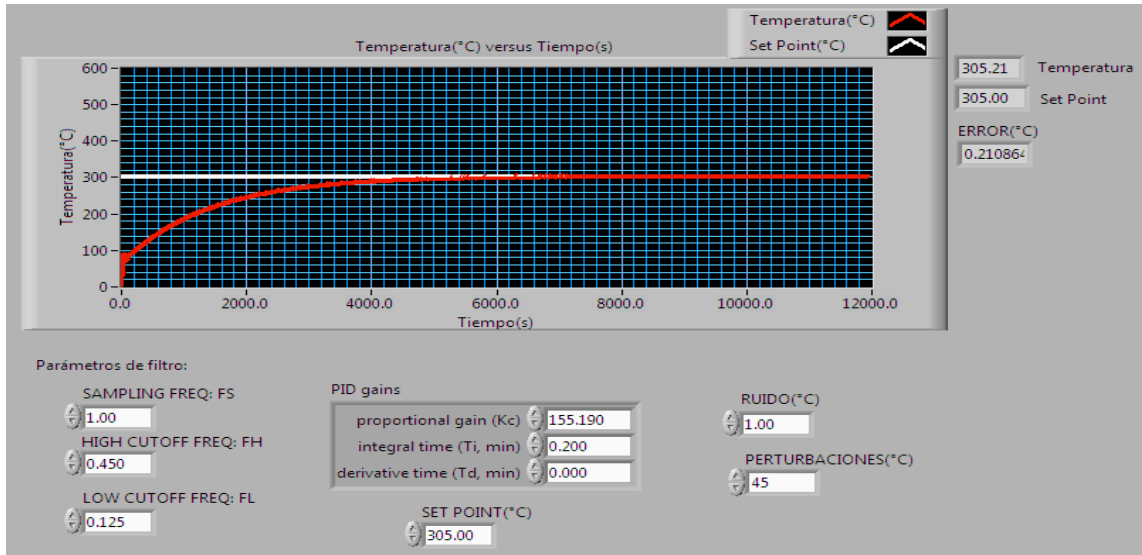


Figura 4.4: Simulación del proceso a un Set Point de 305°C.

- La figura 4.5 muestra las pruebas del controlador para 365°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.25°C:

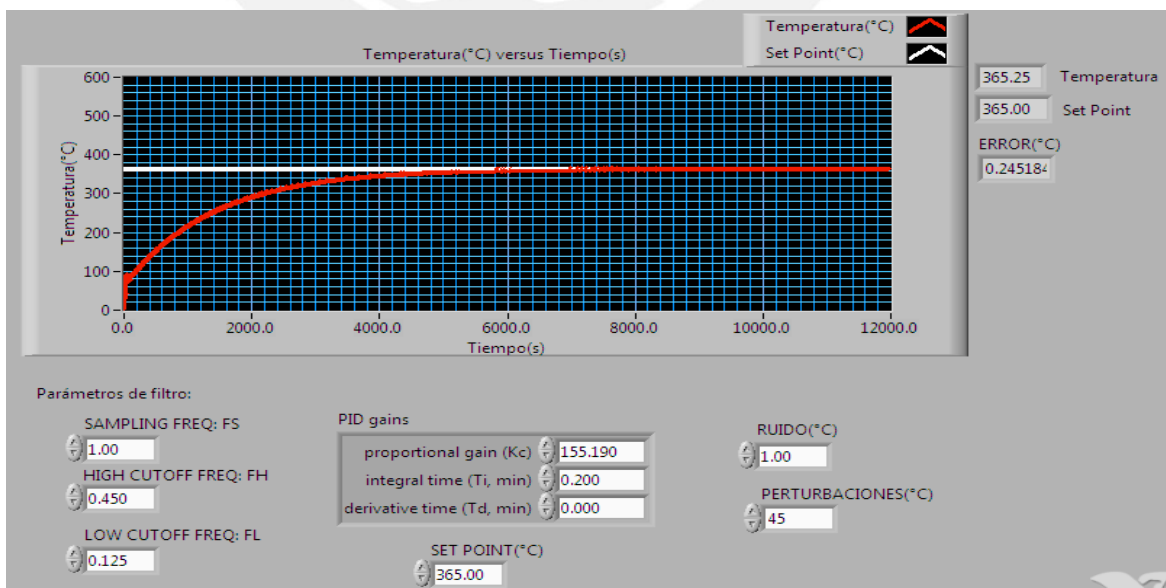


Figura 4.5: Simulación del proceso a un Set Point de 365°C.

En las figuras 4.6 a 4.7 se muestran las simulaciones del proceso para Set Point de 425°C a 450°C, en el rango de 40 a 60% de PWM.

- La figura 4.6 muestra las pruebas del controlador para 425°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.57°C:

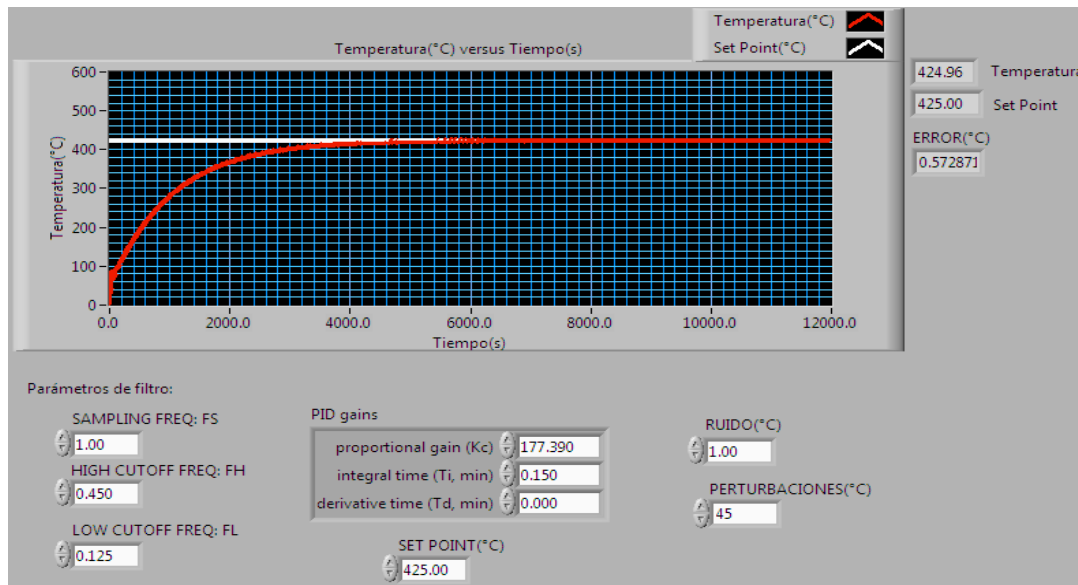


Figura 4.6: Simulación del proceso a un Set Point de 425°C.

-La figura 4.7 muestra las pruebas del controlador para 450°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.46°C:

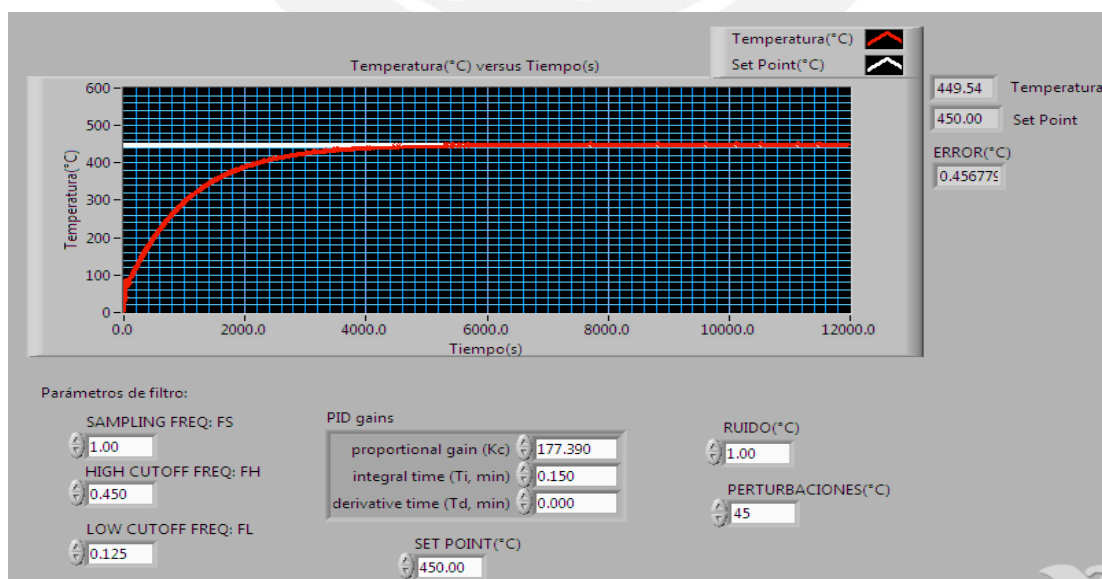


Figura 4.7: Simulación del proceso a un Set Point de 450°C.

En las figuras 4.8 a 4.9 se muestran las simulaciones del proceso para Set Point de 540°C a 560°C, en el rango de 60 a 80% de PWM.

-La figura 4.8 muestra las pruebas del controlador para 540°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.71°C:

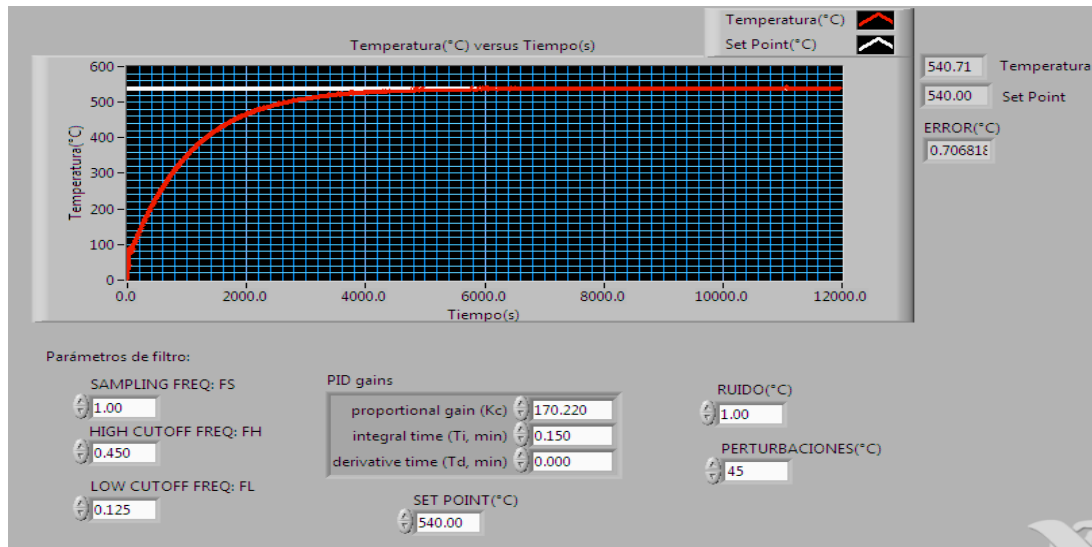


Figura 4.8: Simulación del proceso a un Set Point de 540°C.

-La figura 4.9 muestra las pruebas del controlador para 560°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.59°C:

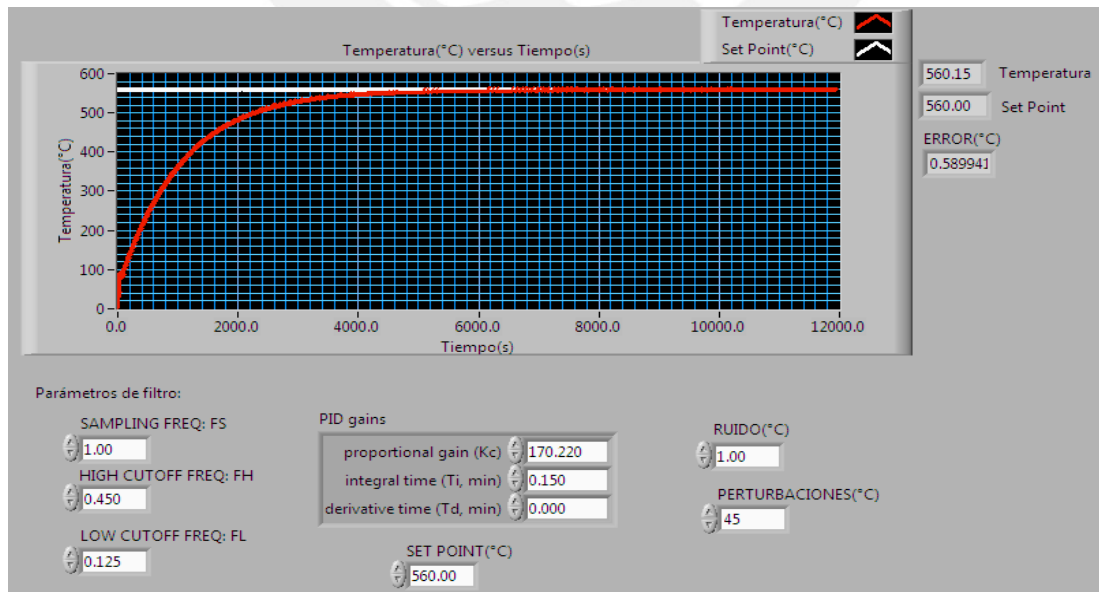


Figura 4.9: Simulación del proceso a un Set Point de 560°C.

4.2 Pruebas

El siguiente diagrama de flujo muestra el algoritmo de control de temperatura diseñado en LabVIEW; fue necesario adaptar un filtro digital para atenuar el ruido y evitar ruido en radiofrecuencia propio del proceso Sputtering, como sugiere el investigador Bolaños de la Universidad del Cauca, Colombia [10] (Anexo F).

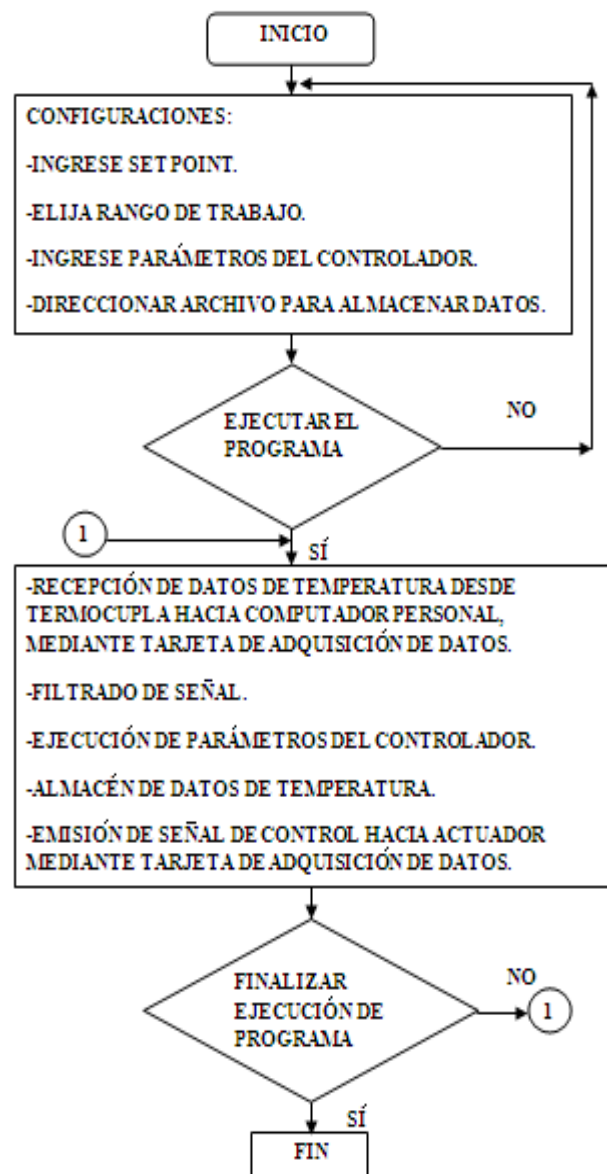


Figura 4.10: Diagrama de flujo para las pruebas.

El programa en LabVIEW para realizar las pruebas se muestra en la figura 4.7; el cual consiste en ejecutar la acción del controlador, para reducir el error estacionario lo máximo posible mediante retroalimentación.

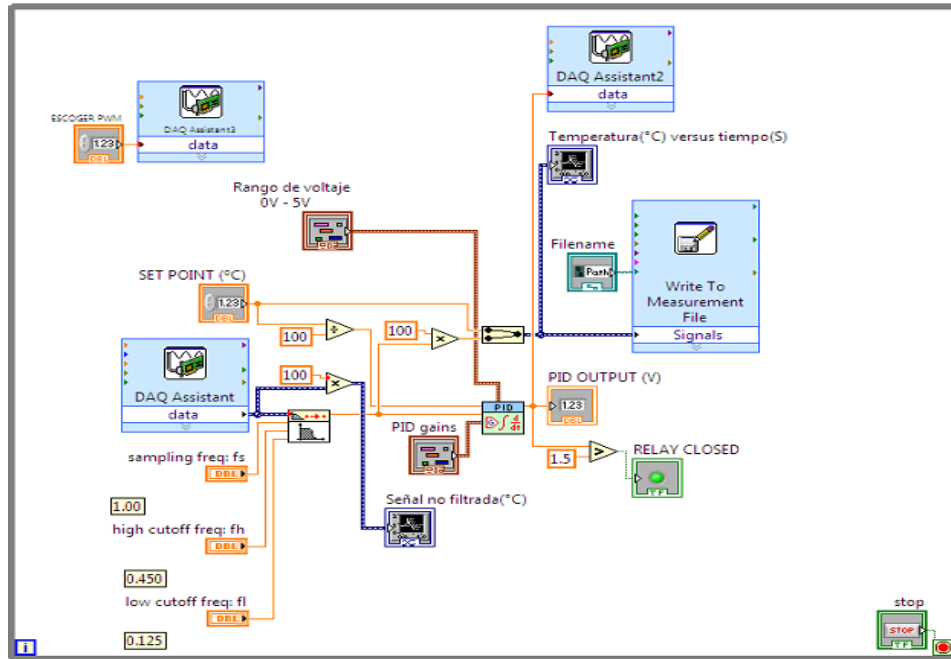


Figura 4.11: Programa en LabVIEW para las pruebas.

En este programa el usuario introduce los parámetros del controlador, desde la interfaz de usuario o “Front Panel”. La tabla 4.1 muestra los parámetros del controlador PI, que se seleccionó para cada rango de trabajo.

| Rango de trabajo | Kc | Ti(m) | Td(m) |
|------------------|--------|-------|-------|
| 2 a 10% de PWM | 125.33 | 0.2 | 0 |
| 10 a 40% de PWM | 155.19 | 0.2 | 0 |
| 40 a 60% de PWM | 177.39 | 0.15 | 0 |
| 60 a 80% de PWM | 170.22 | 0.15 | 0 |

Tabla 4.1: Parámetros de controlador PI en cada rango de trabajo.

La tabla 4.2 muestra los rangos de trabajo, el número selector que corresponde al valor de %PWM que se asigne, y se programó (Anexo C). Esta elección de número lo realiza el usuario desde la plataforma de LabVIEW. El usuario puede guiarse también con la tabla 3.1 para adecuar el valor de Set Point al cual deba obtener un control de temperatura y asignar un porcentaje de PWM. La señal de PWM es emitida desde el PIN PB1 del microcontrolador ATMEGA 8[15], también se muestran los %PWM atribuidos al número selector.

| Rango de trabajo | Número selector | %PWM |
|------------------|-----------------|------|
| 0 | 0 | 0 |
| 2 a 10% de PWM | 0.5 | 0.02 |
| 2 a 10% de PWM | 1 | 0.1 |
| 10 a 40% de PWM | 1.5 | 0.2 |
| 10 a 40% de PWM | 2 | 0.3 |
| 10 a 40% de PWM | 2.5 | 0.4 |
| 40 a 60% de PWM | 3 | 0.5 |
| 40 a 60% de PWM | 3.5 | 0.6 |
| 60 a 80% de PWM | 4 | 0.7 |
| 60 a 80% de PWM | 4.5 | 0.8 |

Tabla 4.2: Numeración para selección de PWM.

En la figura 4.8 se muestra la interfaz de usuario del programa diseñado que ejecuta el algoritmo de control de temperatura para el portasustrato. Se observa una prueba ya en control a un Set Point de 125°C (curva amarilla), y la señal de temperatura del portasustrato (curva roja) con un error aproximado de 1.72°C. También se observan los parámetros del controlador PI (que introduce el usuario), la gráfica de la señal cuando no es filtrada, las opciones para variar y adecuar un nuevo filtro, y el direccionamiento de archivo donde quiera almacenarse los datos monitoreados. El almacenamiento de los datos permite después analizarlos con Matlab o Excel, para interpretar las gráficas; también se observa el número selector %PWM que el usuario debe escribir (Tabla 4.2) cuando asigne un Set Point que pertenezca a un determinado rango de trabajo.

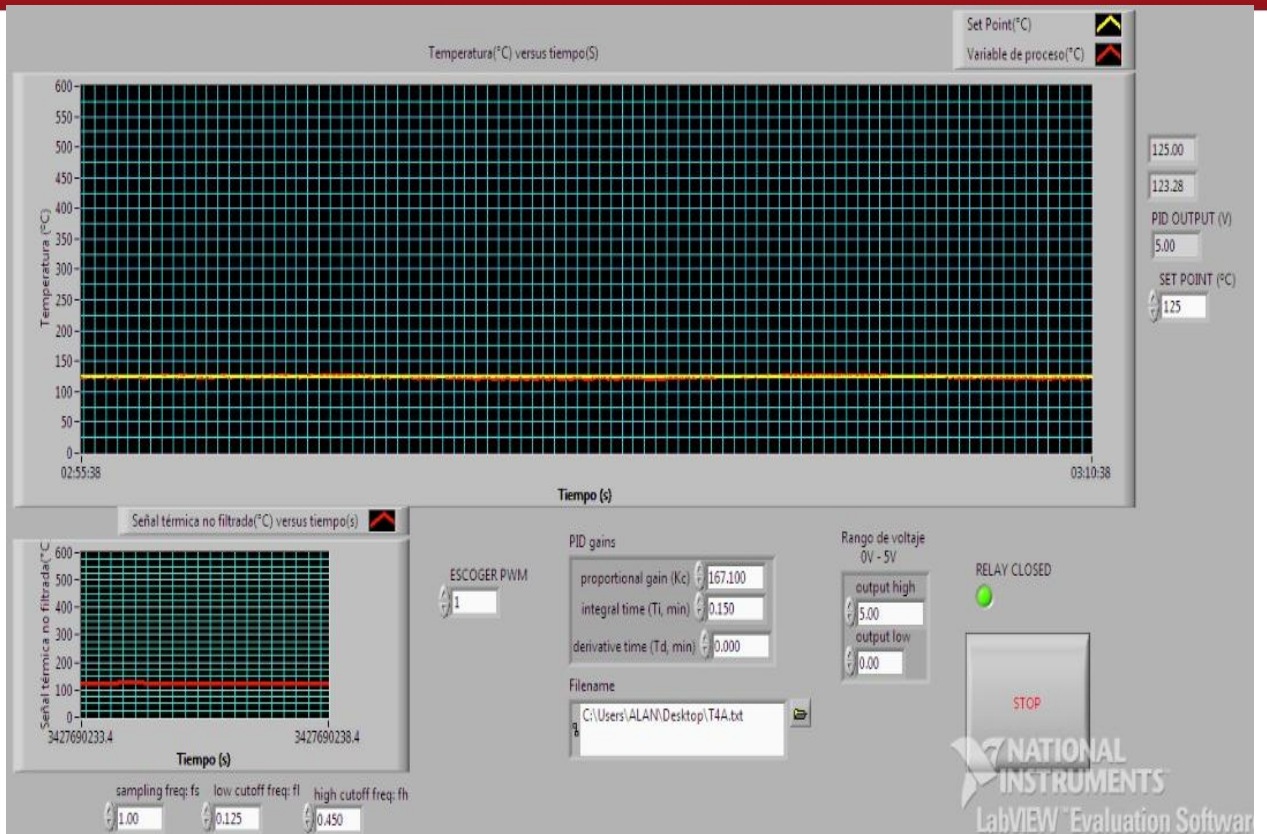


Figura 4.12: Interfaz de usuario del programa principal.

En las figuras 4.13 a 4.14 se muestran las pruebas experimentales del proceso para Set Point de 125°C a 145°C, en el rango de 2 a 10% de PWM.

La figura 4.13 muestra las pruebas del controlador para 125°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 1.3°C.

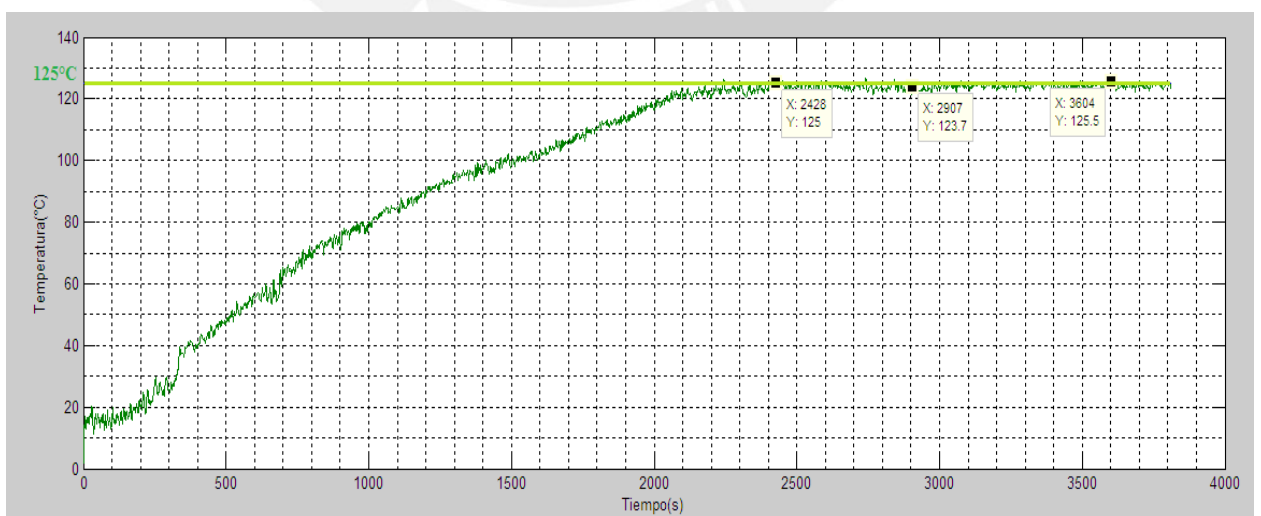


Figura 4.13: Prueba del controlador para 125°C de Set Point.

La figura 4.14 muestra las pruebas del controlador para 145°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 1°C.

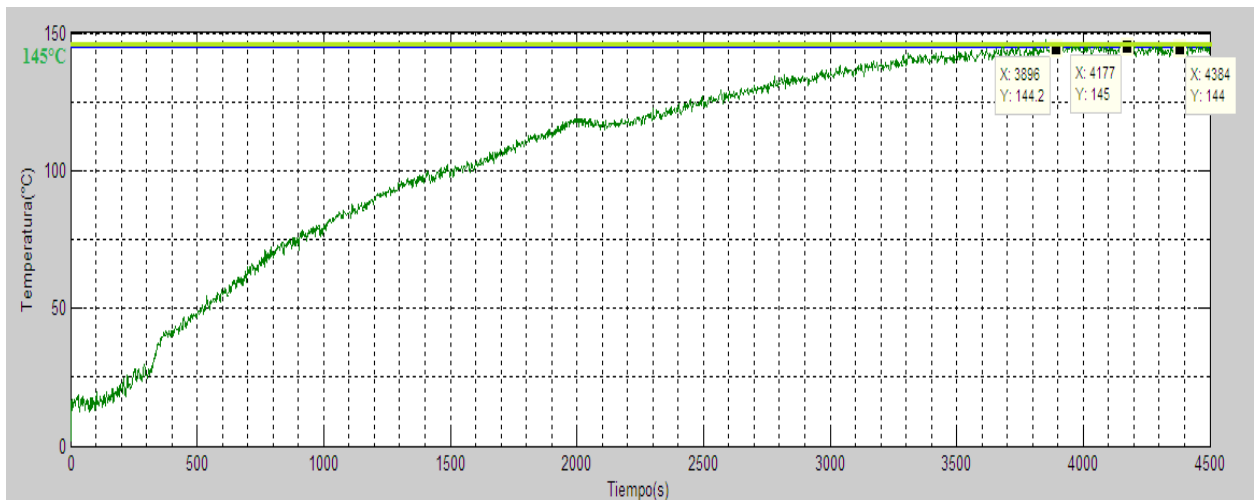


Figura 4.14: Prueba del controlador para 145°C de Set Point.

En las figuras 4.15 a 4.16 se muestran las pruebas experimentales del proceso para Set Point de 305°C a 365°C, en el rango de 10 a 40% de PWM.

La figura 4.15 muestra las pruebas del controlador para 305°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 1.1°C.

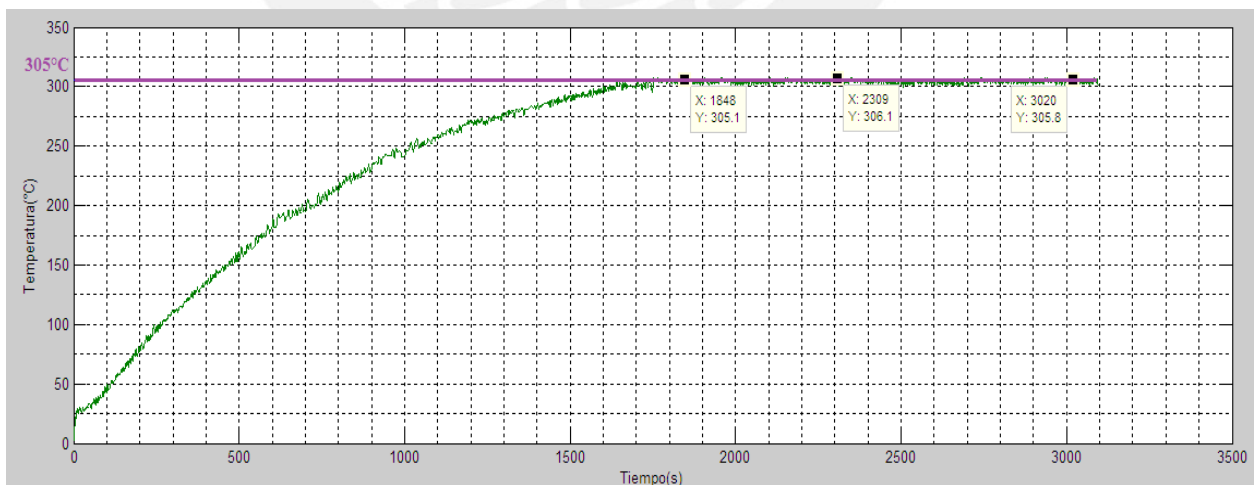


Figura 4.15: Prueba del controlador para 305°C de Set Point.

La figura 4.16 muestra las pruebas del controlador para 365°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 0.7°C.

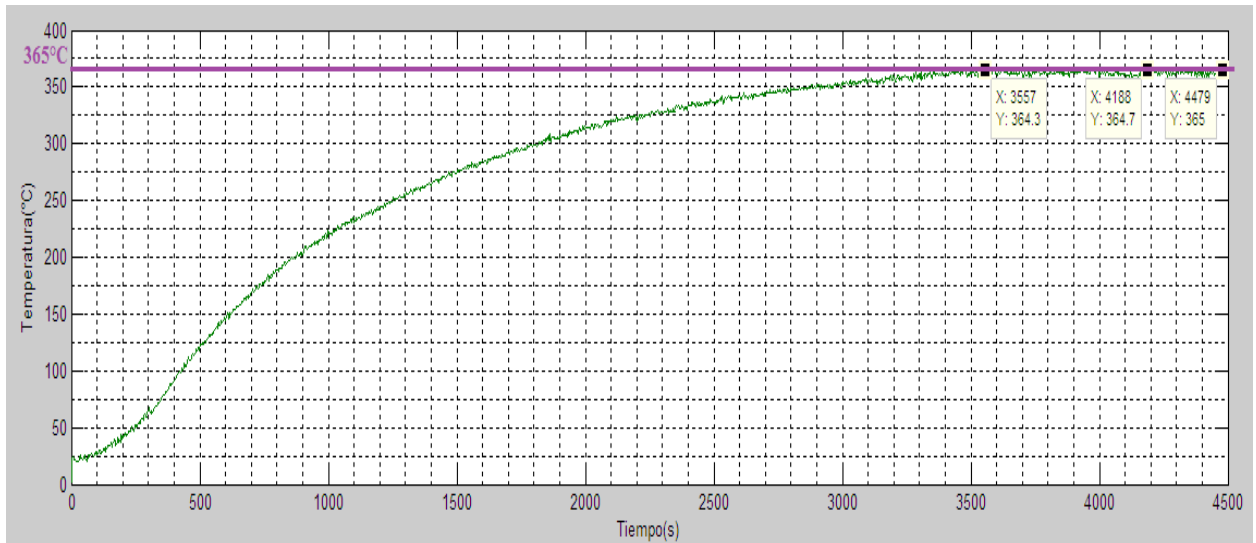


Figura 4.16: Prueba del controlador para 365°C de Set Point.

En las figuras 4.17 a 4.18 se muestran las pruebas experimentales del proceso para Set Point de 425°C a 450°C, en el rango de 40 a 60% de PWM.

La figura 4.17 muestra las pruebas del controlador para 425°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 1.3°C.

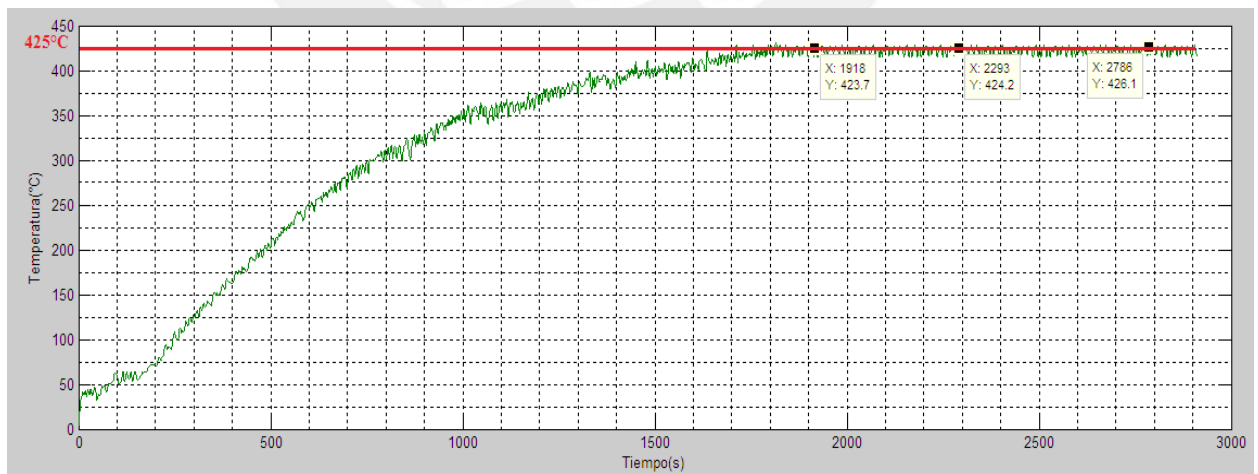


Figura 4.17: Prueba del controlador para 425°C de Set Point.

La figura 4.18 muestra las pruebas del controlador 450°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 1.9°C.

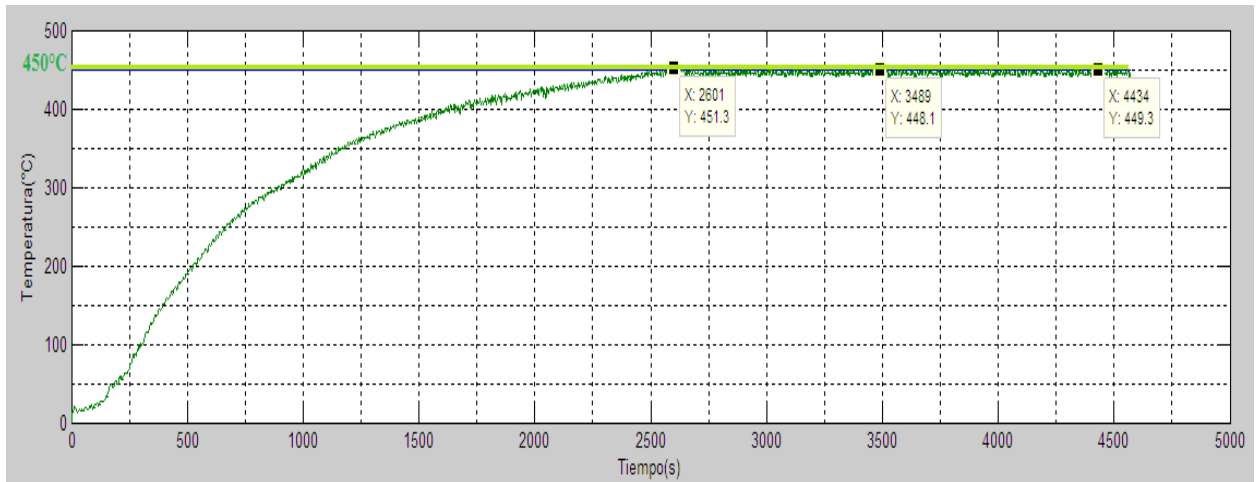


Figura 4.18: Prueba del controlador para 450°C de Set Point.

En las figuras 4.19 a 4.20 se muestran las pruebas experimentales del proceso para Set Point de 540°C a 560°C, en el rango de 60 a 80% de PWM.

La figura 4.19 muestra las pruebas del controlador para 540°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 1.8°C.

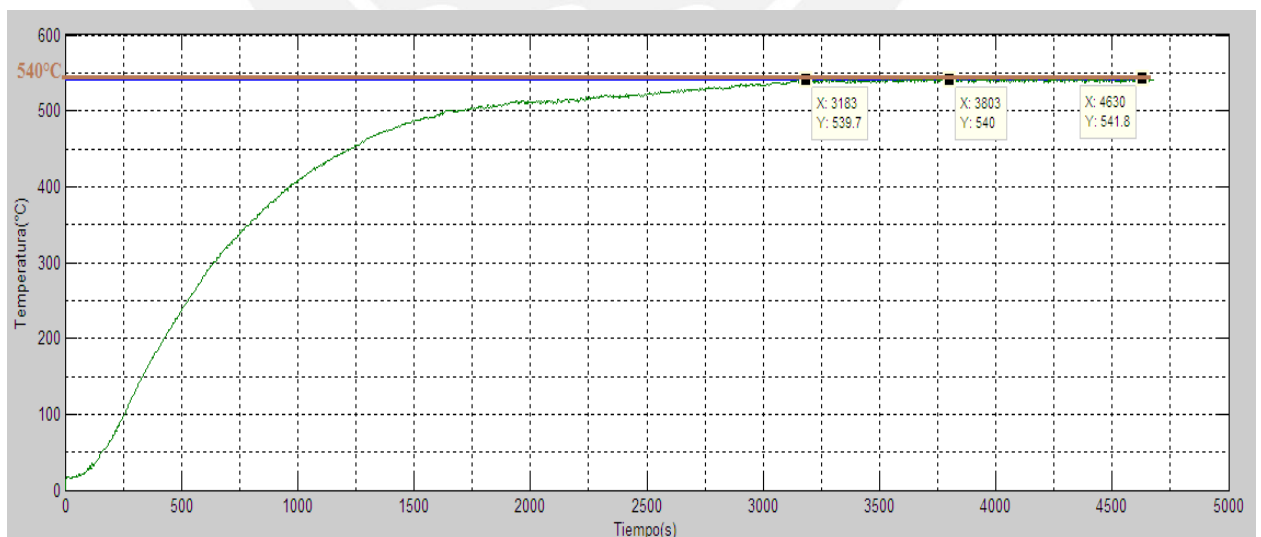


Figura 4.19: Prueba del controlador para 540°C de Set Point.

La figura 4.20 muestra las pruebas del controlador 560°C de temperatura de referencia; se observa un error aproximado de 1.6°C.

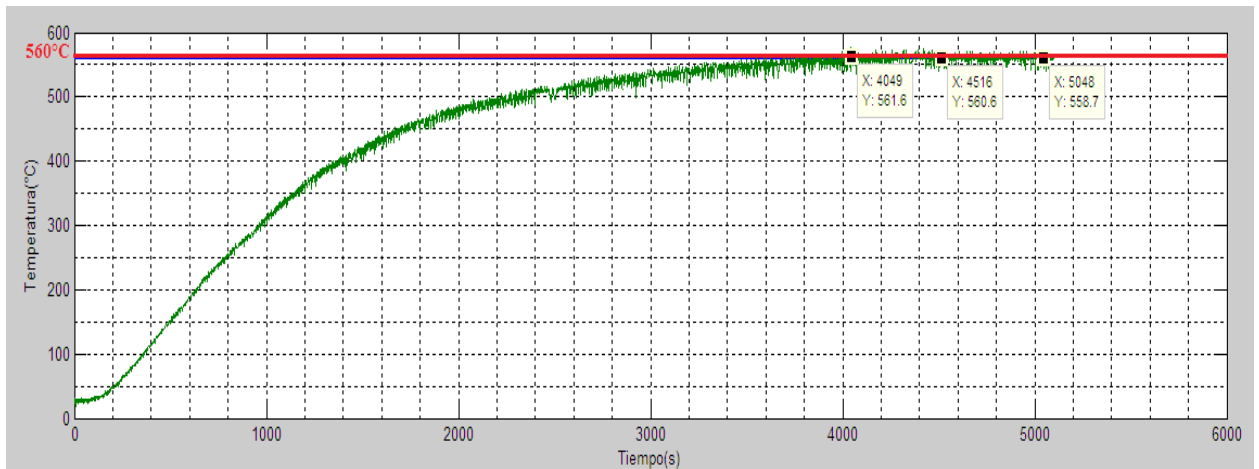


Figura 4.20: Prueba del controlador para 560°C de Set Point.

Se puede notar que entre los rangos lineales, tanto en mediciones experimentales y simuladas, el error en estado estable es menor a 2°C. El error experimental está dentro de rango permitido en el requerimiento de control el cual es menor a 2°C.

Los errores se muestran en la tabla 4.3 (Revisar Anexo D, donde se muestran pruebas experimentales). Finalmente, no se generó sobre impulso, como se observa en las gráficas de simulación y de experimentación (cumpliendo la condición de si hubiese sobre impulso, deba ser menor al 10%).

| Temperatura del portasustrato (°C) | Error estacionario simulación (°C) | Error estacionario experimental (°C) |
|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 125°C (Primer rango lineal) | 0.17 | 1.3 |
| 145°C (Primer rango lineal) | 0.47 | 1 |
| 305°C (Segundo rango lineal) | 0.21 | 1.1 |

| | | |
|------------------------------|------|-----|
| 365°C (Segundo rango lineal) | 0.25 | 0.7 |
| 425°C (Tercer rango lineal) | 0.57 | 1.3 |
| 450°C (Tercer rango lineal) | 0.46 | 1.9 |
| 540°C (Cuarto rango lineal) | 0.71 | 1.8 |
| 560°C (Cuarto rango lineal) | 0.59 | 1.6 |

Tabla 4.3: Comparación de error estacionario.



CONCLUSIONES

Se logró realizar el control de temperatura del portasustrato para la cámara de alto vacío del Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Sección Física de la PUCP, con un error en estado estacionario, menor a 2°C.

Se estudió el comportamiento estático y dinámico del portasustrato en el rango de 48 - 560°C, donde se encuentran 4 rangos lineales entre el incremento de la temperatura en el portasustrato como respuesta al incremento del ancho de pulso de la señal PWM. Para cada rango lineal encontrado, se calcularon los parámetros del controlador.

Se implementó un prototipo donde se sometió a pruebas el control de temperatura, obteniéndose resultados satisfactorios para el control de temperatura del portasustrato.



RECOMENDACIONES

Debido a las pruebas realizadas en el prototipo implementado, se recomienda posicionar adecuadamente la termocupla al portasustrato, que el punto de contacto entre sensor y portasustrato se mantenga fijo durante todo el proceso.

El portasustrato debe ser de acero, debido a sus propiedades térmicas no se deforma en el rango de temperatura de trabajo: 48 a 560°C.



BIBLIOGRAFÍA

[1] Wasa, Kiyotaka.

2004 Thin films material technology. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

http://books.google.com/books/about/Thin_film_materials_technology.html?id=LjaD7IkCg9kC

[2] Guerra, J. Andrés.

2011 Determination of the optical bandgap and disorder energies of thin amorphous SiC and AlN films produced by radio frequency magnetron sputtering. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://iopscience.iop.org/1742-6596/274/1/012113>

[3] Guerra, J. Andrés Erlenbach, Oliver.

2010 Determination of the optical bandgap of thin amorphous (SiC)_{1-x}(AlN)_x films. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://www.scientific.net/MSF.645-648.263>

[4] Weingärtner, R.

2005 Thermal activation, cathodo- and photoluminescence measurements of rare earth doped (Tm, Tb, Dy, Eu, Sm, Yb) amorphous/nanocrystalline AlN thin films prepared by reactive rf-sputtering. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=17655713>

[5] Jung, J.

2005 Process control for low temperature reactive deposition of Al doped ZnO films by ICP-assisted DC magnetron sputtering. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897205004500>

[6] José, Gálvez.

2008 Diseño, fabricación e instalación de un equipo en alto vacío para preparar muestras de películas delgadas de semiconductores.

Tesis de ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/382?show=full>

[7] AJA INTERNATIONAL, INC.

ATC-B ATCH COATING SYSTEMS. N. SCITUATE, MA USA. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

http://www.ajaint.com/systems_b.htm

[8] Haugen, Finn.

2004 PID CONTROL, Editor: Tapir Academic.

[9] TZN/TZ DUAL PID AUTOTUNNING CONTROLLERS. SERIES. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

http://www.wici.com/thirdPartyProducts/autonics/pdf/cat_pdf_files/TZSeries_Catalog_Page.pdf

[10] Córdoba, M. Bolaños, G.

2006 Instalación y adecuación de un horno, con adquisición automática de datos en un sistema de pulverización catódica R.F. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

http://calima.univalle.edu.co/revista/vol38_1/articulos/pdf/3801225.pdf

[11] NATIONAL INSTRUMENTS NI USB 6008. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201986>

[12] Ibrahim, Dogan.

2002 Microcontroller-based temperature monitoring. Editor: Newnes.

[13] Vásquez, Diana.

2008 Películas delgadas de teflón y nanocompuestos metal-dieléctrico producidos por DC y RF Magnetron Sputtering.

Tesis para obtener el título profesional de Licenciado en Física. Facultad de Ciencias, Escuela profesional de Física. Universidad Nacional de Ingeniería. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

http://cybertesis.uni.edu.pe/uni/2008/vasquez_md/pdf/vasquez_md.pdf

[14] YUEQING SONGLING ELECTRICAL METER

REX C700 PID. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://cnslyb.en.made-in-china.com/product/oMbmEeUuAyWO/China-REX-C700-PID-Digital-Intelligent-Temperature-Thermo-Controller.html>

[15] NATIONAL INSTRUMENTS NI LabVIEW Student Edition Product Selection. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://www.ni.com/labviewse/select.htm>

[16] Balderas Zapata.

2008 Automatización del control térmico de un sistema de evaporación de películas delgadas utilizando LabView. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen12/automatizacion_del_control.pdf

[17] Åstrom, Karl.

1995 Adaptive Control (segunda edición), Editor: Addison Wesley Longman.

[18] Circuito Integrado AD595. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/analogdevices/AD594AQ.pdf>

[19] Åstrom, Karl.

2006 Advanced PID control (Primera edición), ISA.

[20] Gene, Franklin.

2006 Feedback Control of Dynamic Systems (Cuarta edición), Editor: Prentice Hall.

[21] Ibrahim, Dogan.

2006 Microcontroller Based Applied Digital control. Editor: Wiley.

[22] Deshpande, P and Tantaleán R.

2006 Process Control and Optimization. Editor: SAC.

[23] Smith, J. and Van Ness, H.

1980 Introducción a la termodinámica en Ingeniería química. Editor: Mc Graw Hill.

[24] Çengel, Yunus and Afshin, J.

2011 Heat and Mass Transfer. Editor: Mc Graw Hill.

[25] Microcontrolador ATMEGA 8. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://www.atmel.com/images/doc2486.pdf>

[26] Amplificador operacional TL081. Consulta: 21 de Octubre del 2012.

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/tl081.pdf>

[27] Coughlin, Robert.

1998 Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales. Editor: Prentice Hall.

[28] Tomasi, Wayne.

2004 Electronic Communications Systems, Fundamentals through Advanced. Editor: Prentice Hall.

[29] Su, Kendall.

2002 Analog Filters. Editor: Kluwer.

