

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

ANEXOS

Presentado por el bachiller:

Jesús Alan Calderón Chavarri

Asesor:

Dr. José Dávalos Pinto

Lima, Octubre del 2012

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Elección de controlador PI.....	1
ANEXO B: Diagramas del circuito de control.....	5
ANEXO C: Código para generar señales PWM.....	7
ANEXO D: Fotografías del diseño.....	10
ANEXO E: Tiempo de muestreo y tiempo de respuesta.....	22
ANEXO F: Selección de filtro.....	14



ANEXO A

Se plantea el siguiente esquema de retroalimentación para el sistema a controlar, mostrado en la figura A.1 (Las referencias bibliográficas citadas en este anexo pertenecen a la bibliografía de la tesis).

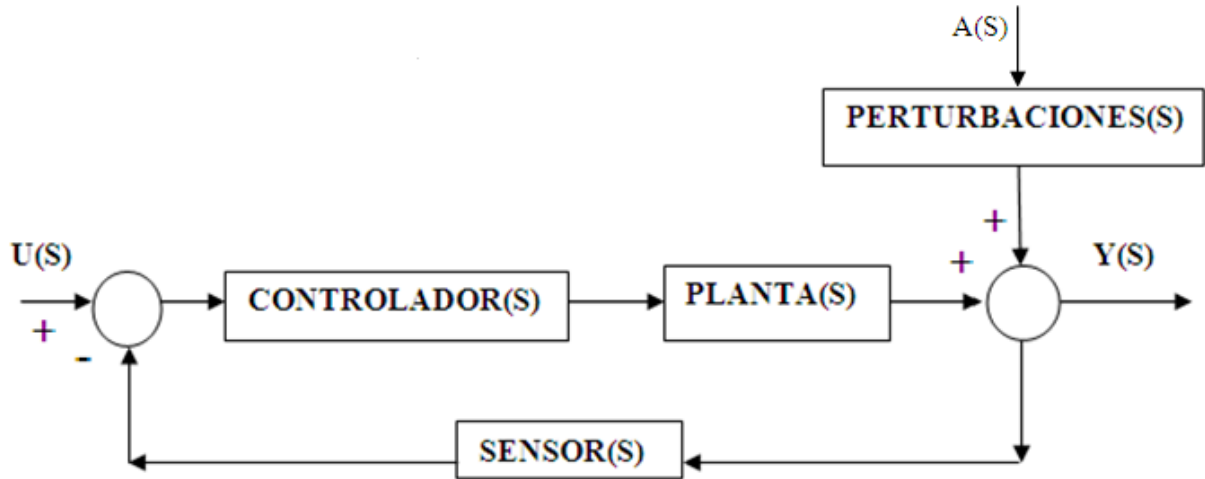


Figura A.1

Planteando ecuación a la figura A.1:

$$[U(S) - Y(S) \times \text{SENSOR}(S)] \times [\text{CONTROLADOR}(S) \times \text{PLANTA}(S)] + A(S) \times \text{PERTURBACIONES}(S) = Y(S) \dots \dots \dots \text{Ecuación A.1}$$

Se plantean las funciones de transferencia:

$$\text{CONTROLADOR}(S) = K \times (1 + 1 \div (T_i \times S)); \text{ caso controlador PI.}$$

$$\text{PLANTA}(S) = (K_p \times e^{(-L \times S)}) \div (T \times S + 1)$$

$$\text{SENSOR}(S) = C = 0.01$$

$$\text{PERTURBACIONES}(S) = D$$

Donde C, ganancia atribuida al circuito adaptación sensor, es de 10mV/°C [18]. Las perturbaciones se las considera como ganancia en escalón, debido a la temperatura inicial del sistema [17], [19].

De acuerdo a Ziegler-Nichols, los parámetros para obtener el controlador se muestran en la tabla A1. Donde L es el retardo y $\alpha = K_p \times L \div T$:

CONTROLADOR	K_c	T_i	T_d
P	$1 \div \alpha$	0	0
PI	$0.9 \div \alpha$	$3 \times L$	0
PID	$1.2 \div \alpha$	$2 \times L$	$L \div 2$

Tabla A1: Parámetros de controlador por Z & N.

En la obtención de las funciones de transferencia de cada rango trabajado, los escalones proporcionados en lazo abierto se consideró la ganancia del circuito adaptación del sensor ($C = 10\text{mV}/^\circ\text{C}$) con lo cual se obtiene la tabla A2, para calcular los parámetros de los controladores. Donde L es el retardo y $\alpha' = K_p \times L \times C \div T$.

CONTROLADOR	K_c	T_i	T_d
P	$1 \div \alpha'$	0	0
PI	$0.9 \div \alpha'$	$3 \times L$	0
PID	$1.2 \div \alpha'$	$2 \times L$	$L \div 2$

Tabla A2: Parámetros para obtener controladores.

Reemplazando valores en la tabla A2, para la función de transferencia $G_1(S)$, de características mostradas en tabla A3:

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

$$\alpha' = K_p \times L \times C \div T$$

K_p	$C(\text{mV}/^\circ\text{C})$	$L(\text{s})$	$T(\text{s})$	α'
256.55	0.01	4	1429	0.007181

Tabla A3: Características de Función de Transferencia $G_1(S)$.

Con lo cual se obtiene los parámetros del controlador 1, mostrado en la tabla A4.

CONTROLADOR1	K_c	$T_i(\text{s})$	$T_d(\text{s})$
P	139.25	0	0

PI	125.33	12	0
PID	167.10	8	2

Tabla A4: Parámetros calculados para controlador 1.

Similarmente, mediante la tabla A2, se obtiene los controladores: 2, 3 y 4.

En las figuras A2, A3 y A4, se muestran las simulaciones para cada uno de los controladores:

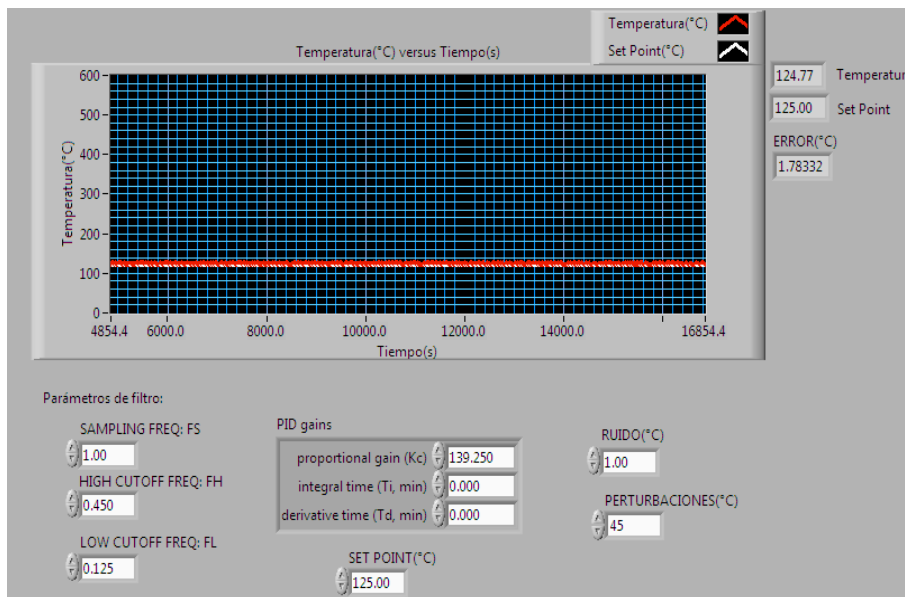


Figura A2: Simulación para controlador P (Proporcional).

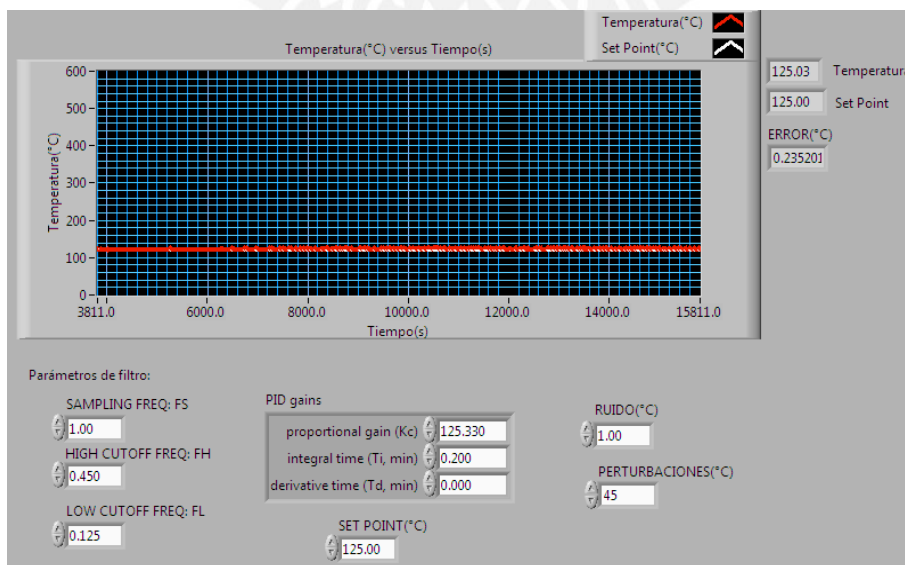


Figura A3: Simulación para controlador PI (Proporcional-Integral)

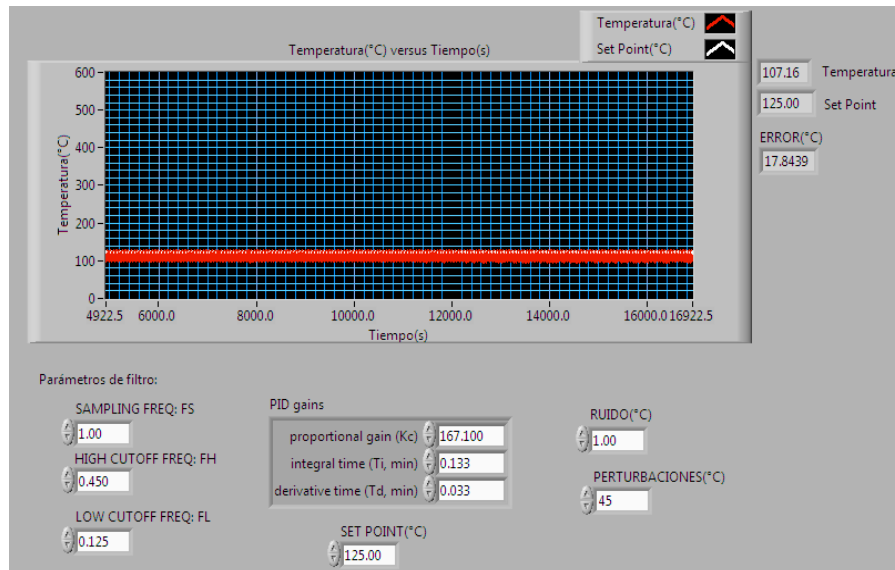


Figura A4: Simulación para controlador PID (Proporcional, Integral-Derivativo)

Se observa en las figuras A2, A3, y A4 que hay mejor control para el controlador PI, puesto que en los otros controladores el error estacionario es mayor; y en el PID la acción derivativa para cambios lentos (simulación de señal de temperatura) no son bruscos. Entonces, la acción derivativa es de poca ayuda para el control en esta tesis.

En las figura B2 se muestra al circuito impreso del circuito de control, así como sus respectivas conexiones.

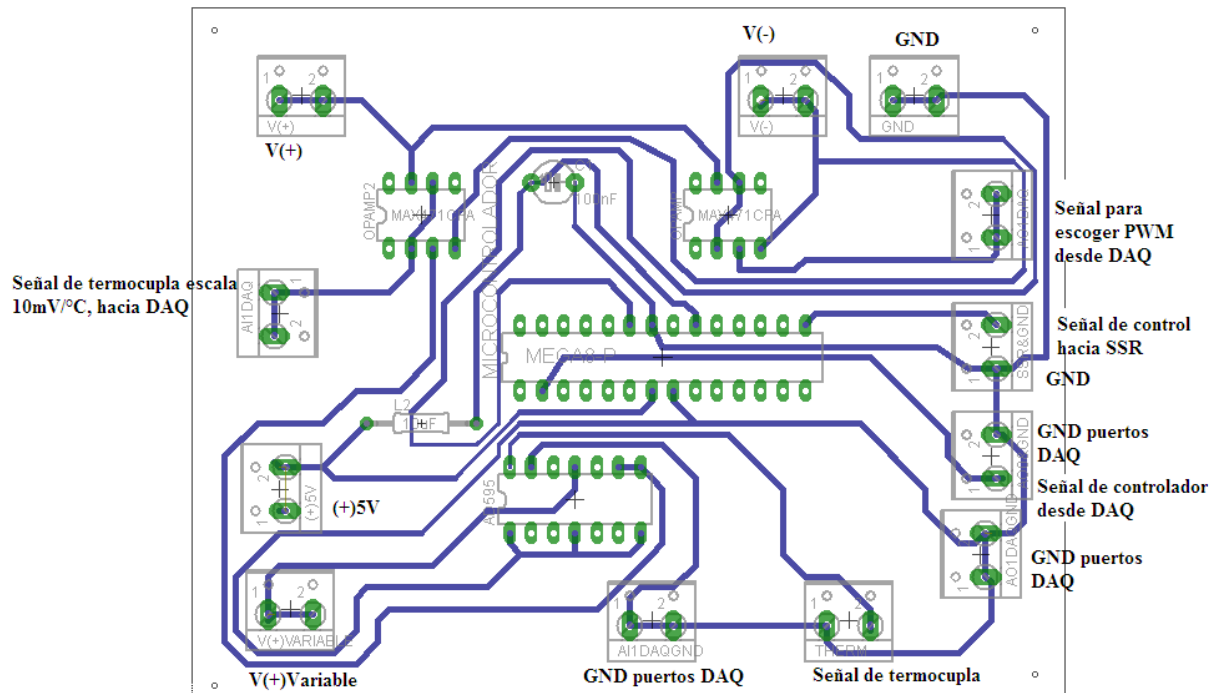


Figura B2: Circuito impreso del circuito de control.

ANEXO C

Código en C, para generar señal PWM, en el microcontrolador ATMEGA 8 (Las referencias bibliográficas citadas en este anexo pertenecen a la bibliografía de la tesis).

El presente código procesa un valor de voltaje en el ADC del microcontrolador ATMEGA 8 [25], que representan diferentes porcentajes de PWM, enviados como valor numérico desde la plataforma de LabVIEW; por el usuario.

```

////////////////////////////////////
//CCODE FOR CHOOSE PWM
//
//Author: Alan Calderón
////////////////////////////////////

#include <stdint.h>
#include <avr/io.h>
#include <stdlib.h>

#define PIND_MASK ((1<<PDI))

int main(void)
{
  unsigned int ADC_TEMP_L;
  unsigned int ADC_TEMP_H;
  unsigned int ADC_TOT;

  DDRC=0b11111110; //PC0 AS INPUT FOR ADC
  DDRB=0b11111111; //PB1 AS PWM OUTPUT
  DDRD=0b11111110; //PDI AS INPUT FOR PID

  //ADLAR = 0 AJUSTE A LA DERECHA, TRABAJAR CON 10 BITS
  ADMUX|=(0<<REFS1)|(1<<REFS0);
  ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0); //enable ADC with dummy conversion

  while(1)
  {
    char buffer;
    buffer = (PIND) & PIND_MASK; /*CHANGE STATE WITH (~PIND)*/

    if(buffer & (1<<PDI))
    {
      ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
      ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

      while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
      ADC_TEMP_L=ADCL;
      ADC_TEMP_H=ADCH;

      ADCSRA|=(0<<ADIF);

      ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
      if((ADC_TOT>=4.5)&&(ADC_TOT<90)) //Vinput=0.02V to 0.44V.....Choose 0V
      {
        OCR1AH=0b00000000;
        OCR1AL=0; //0%pwm
        TCCR1A=0;
        TCCR1B=0;
        PORTB=0b11111101;
      }

      ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
      ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

      while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
      ADC_TEMP_L=ADCL;
      ADC_TEMP_H=ADCH;

      ADCSRA|=(0<<ADIF);

      ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
      if((ADC_TOT>=90)&&(ADC_TOT<150)) //Vinput 0.44 to 0.73V.....Choose 0.5V
      {
        OCR1AH=0b00000000;
        OCR1AL=4; //2%pwm
        TCCR1A=129;
        TCCR1B=13;
      }

      ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
      ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
    }
  }
}

```

```

while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
ADC_TEMP_L=ADCL;
ADC_TEMP_H=ADCH;

ADCSRA|=(0<<ADIF);

ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
if((ADC_TOT>=150)&&(ADC_TOT<250))//Vinput 0.73V to 1.22v.....Choose 1V
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=25;//10%pwm
    TCCR1A=129;
    TCCR1B=13;
}

ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
ADC_TEMP_L=ADCL;
ADC_TEMP_H=ADCH;

ADCSRA|=(0<<ADIF);

ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
if((ADC_TOT>=250)&&(ADC_TOT<380))//Vinput 1.22V to 1.86V.....Choose 1.5V
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=50;//20%pwm
    TCCR1A=129;
    TCCR1B=13;
}

ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
ADC_TEMP_L=ADCL;
ADC_TEMP_H=ADCH;

ADCSRA|=(0<<ADIF);

ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
if((ADC_TOT>=380)&&(ADC_TOT<480))//Vinput 1.86V to 2.34V.....Choose 2V
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=76;//30%pwm
    TCCR1A=129;
    TCCR1B=13;
}

ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
ADC_TEMP_L=ADCL;
ADC_TEMP_H=ADCH;

ADCSRA|=(0<<ADIF);

ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
if((ADC_TOT>=480)&&(ADC_TOT<570))////Vinput 2.34V to 2.7832V.....Choose 2.5V
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=101;//40%pwm
    TCCR1A=129;
    TCCR1B=13;
}

ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

```

```

while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
ADC_TEMP_L=ADCL;
ADC_TEMP_H=ADCH;

ADCSRA|=(0<<ADIF);

ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
if((ADC_TOT>=570)&&(ADC_TOT<670))//Vinput 2.7832V to 3.27V.....Choose 3V
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=127; //50%pwm
    TCCR1A=129;
    TCCR1B=13;
}

ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
ADC_TEMP_L=ADCL;
ADC_TEMP_H=ADCH;

ADCSRA|=(0<<ADIF);

ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
if((ADC_TOT>=670)&&(ADC_TOT<780))//Vinput 3.27V to 3.81V.....Choose 3.5V
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=153; //60%pwm
    TCCR1A=129;
    TCCR1B=13;
}

ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
ADC_TEMP_L=ADCL;
ADC_TEMP_H=ADCH;

ADCSRA|=(0<<ADIF);

ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
if((ADC_TOT>=780)&&(ADC_TOT<880))//Vinput 3.81V to 4.297V.....Choose 4V
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=178; //70%pwm
    TCCR1A=129;
    TCCR1B=13;
}

ADCSRA|=(1<<ADEN)|(0<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADSC)|(0<<ADFR)|(0<<ADIF)|(0<<ADIE)|(0<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);

while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
ADC_TEMP_L=ADCL;
ADC_TEMP_H=ADCH;

ADCSRA|=(0<<ADIF);

ADC_TOT = ADC_TEMP_H*256+ADC_TEMP_L;
if((ADC_TOT>=880)&&(ADC_TOT<990))//Vinput 4.297V to 4.83V.....Choose 4.5V
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=204; //80%pwm
    TCCR1A=129;
    TCCR1B=13;
}
}

else
{
    OCR1AH=0b00000000;
    OCR1AL=0;
    TCCR1A=0;
    TCCR1B=0;

    PORTB=0b11111101;

}

}

}

}
    
```

ANEXO D

Se muestran fotografías del diseño y de sus componentes. En la figura D1, se muestra una pieza metálica (portasustrato) que se dispuso inicialmente para ser el portasustrato del diseño; Sin embargo, a temperaturas cercanas a los 500°C empezó a variar propiedades mecánicas y físicas, por ello se lo reemplazó por una placa de acero puro (portasustrato) que no presentó cambios en las pruebas. Las dimensiones del portasustrato son 15×11cm con un espesor aproximado de 1mm.

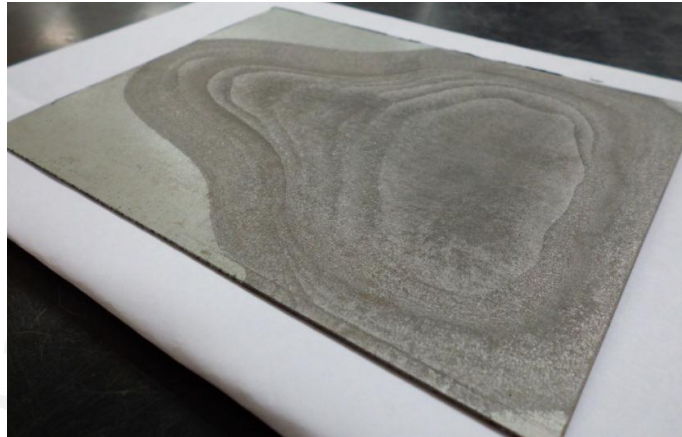


Figura D1: Placa de acero galvanizado.



Figura D2: Portasustrato de acero puro.

La figura D3 muestra pruebas de control en un primer diseño, donde la placa térmica de cerámico estaba descubierta, pero sí en el interior de una caja metálica cerrada de dimensiones $15 \times 20 \times 27 \text{ cm}^3$. Para que la placa térmica trabaje adecuadamente dentro de la cámara de alto vacío, no debe desprender partículas o deteriorarse fácilmente, entonces se la selló por completo con láminas de acero; lo cual corresponde al diseño final mostrado en la Figura D4.

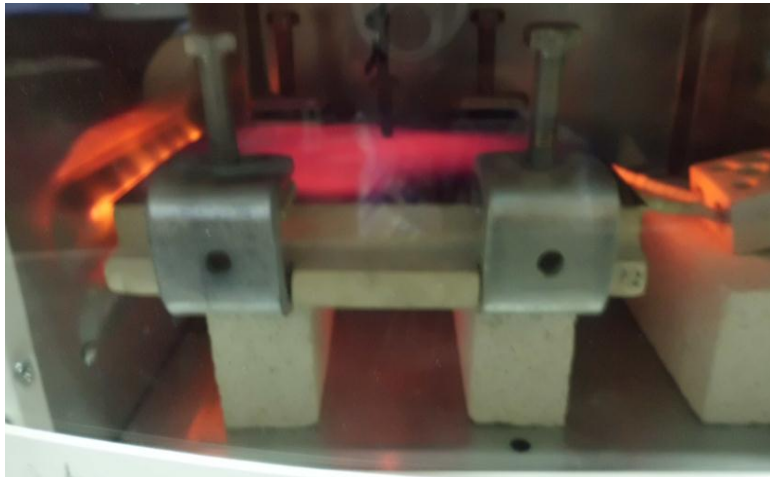


Figura D3: Pruebas en primer diseño.

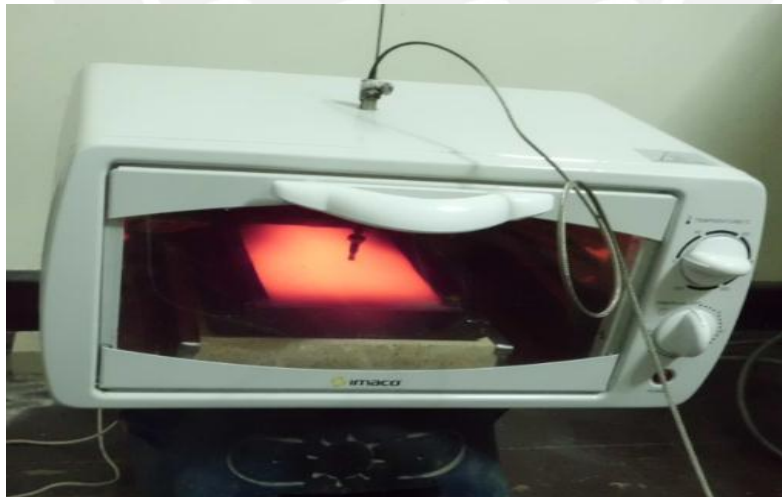


Figura D4: Pruebas en diseño final, controlado a 540°C

ANEXO E

Para verificar que el tiempo de muestreo (1s) es menor a la quinta parte del tiempo de respuesta T_r (s), en cada uno de los rangos de trabajo de la planta; se escogió una muestra, la de menor tiempo de respuesta que se observa en la figura E1, que corresponde al rango 60 a 80% de PWM.

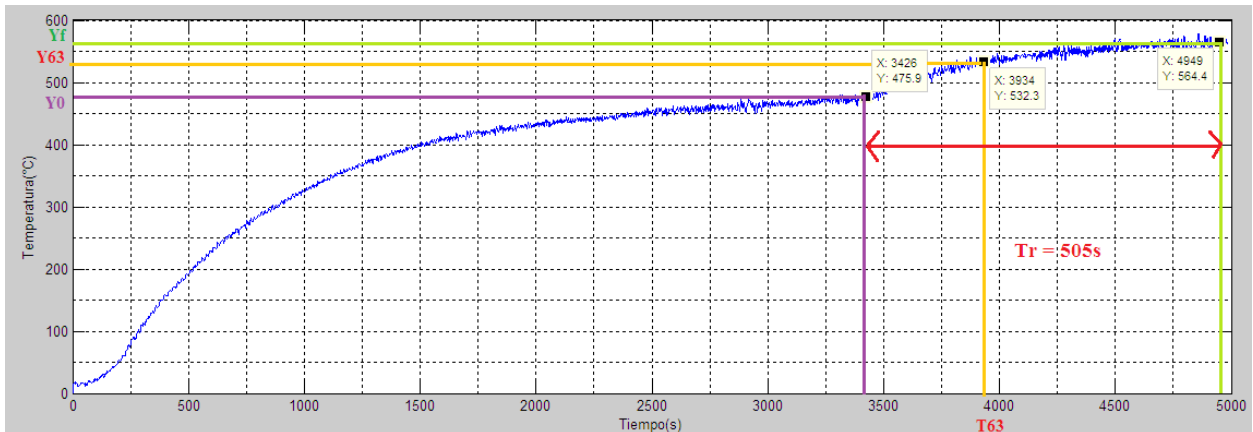


Figura E1: Tiempo de respuesta en el rango de 60 a 80% de PWM.

La figura E2, muestra la configuración del tiempo de muestreo en la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008.

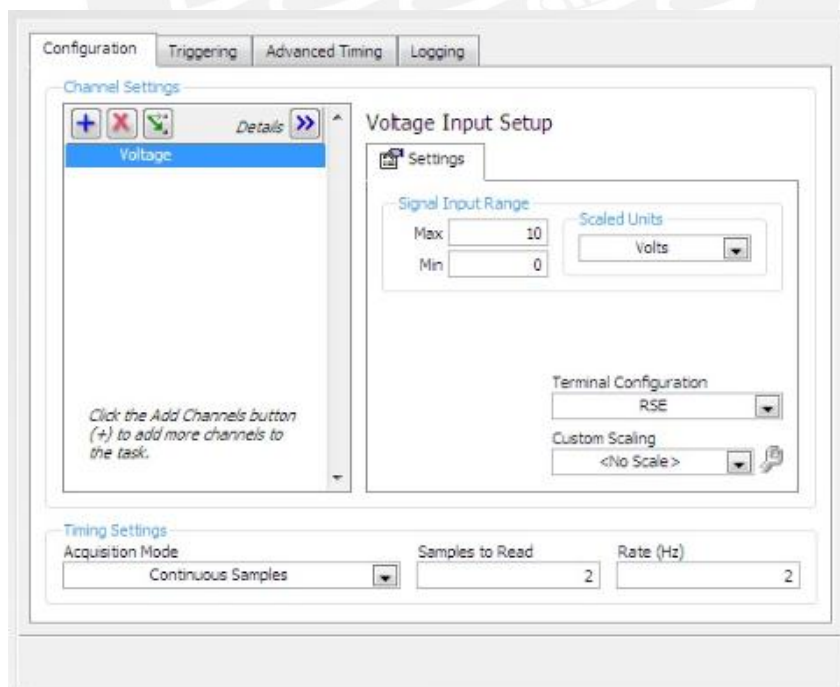


Figura E2: Configuración del tiempo de muestreo, DAQ NI USB 6008.

Entonces se verifica:

Tiempo de muestreo $< T_r \div 5$

1s $< 101s$

Con lo cual los parámetros del controlador PI (en todos los rangos de trabajo), hallados por Ziegler and Nichols (analógicamente) satisfarán adecuadamente el control digital realizado en el computador personal [12].



ANEXO F

Para la elección de los parámetros del filtro pasa bajos, se analizaron las gráficas obtenidas al evaluar los cambios de temperatura del portasustrato frente a los incrementos de la señal de entrada (variación de %PWM). La figura F1 muestra la frecuencia del incremento de temperatura del portasustrato como respuesta a la variación de la señal de entrada en el rango de 60 a 80% de PWM. Similar razón de cambio de la temperatura, se presenta en las demás gráficas que permitieron analizar la respuesta de la planta frente a cambios en la señal de entrada (Figuras: 3.15 – 3.22). (Las referencias bibliográficas citadas en este anexo pertenecen a la bibliografía de la tesis).

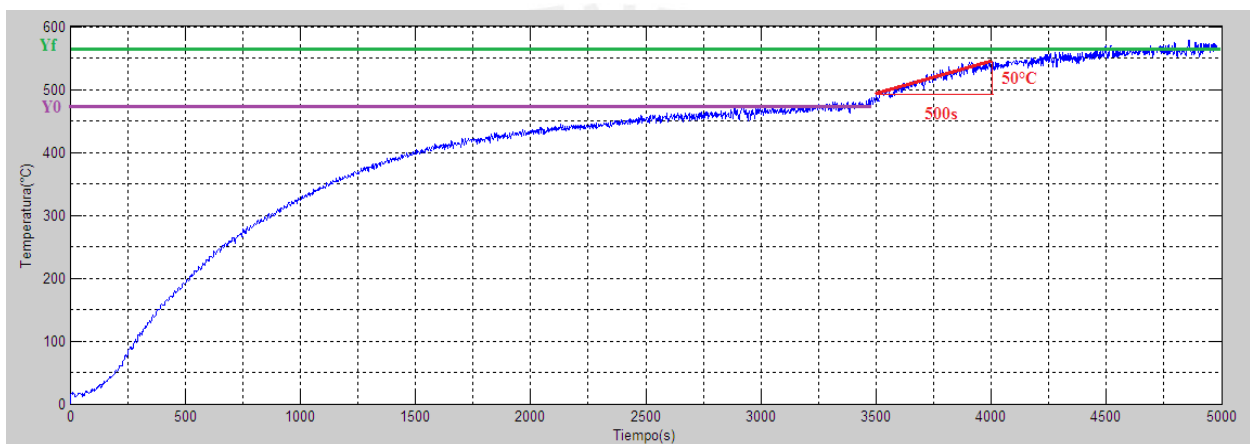


Figura F1: Frecuencia de cambio de la señal de temperatura.

Se observa la frecuencia de cambio de la señal es $50 \div 500 = 0.1^\circ\text{C/s}$, expresándolo como frecuencia de cambio:

Frecuencia de la señal = 0.1Hz. (Se puede observar en la figura H1, cuando la señal de temperatura tiende a un estado estacionario, la frecuencia de sus cambios serán mucho más lentos o menores a 0.1Hz)

Además se cumple el criterio de Nyquist-Shannon, que permite garantizar la reconstrucción de la señal de forma analógica a formato digital [28]:

Frecuencia de la señal $\times 2 <$ Frecuencia de muestreo

$$0.2\text{Hz} < 1\text{Hz}$$

Se debe filtrar esta señal de ruido en alta frecuencia, propio del proceso Sputtering en Radio frecuencia (desde el orden de KHz) [17]; también filtrar la señal, de los 60Hz de la red eléctrica 220 VAC, a la cual se instalan los equipos en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la PUCP.

Por ello, se hizo pruebas con los la opción de filtros digitales que presenta LabVIEW, y desde el programa de control diseñado, se observó que la señal de temperatura presentó filtrado de ruido. Para el diseño elaborado, básicamente el ruido era generado por las maquinarias conectadas a la red eléctrica.

Se escogió el filtro pasa bajos Butterworth, con las siguientes características:

Fc1 (“High cutoff frequency”) = 0.125Hz

Fc2 (“Low cutoff frequency”) = 0.45Hz

Al realizar las pruebas, como la frecuencia de la señal era cercana pero menor a Fc1, se observó poca atenuación en la ganancia de la señal, como se representa en la figura F2. Finalmente, además de la simplicidad en el análisis de un filtro Butterworth [29], se plantea que los parámetros del filtro trabajado en este diseño podrán filtrar a la señal del ruido en alta frecuencia propio del Proceso Sputtering en Radio Frecuencia.

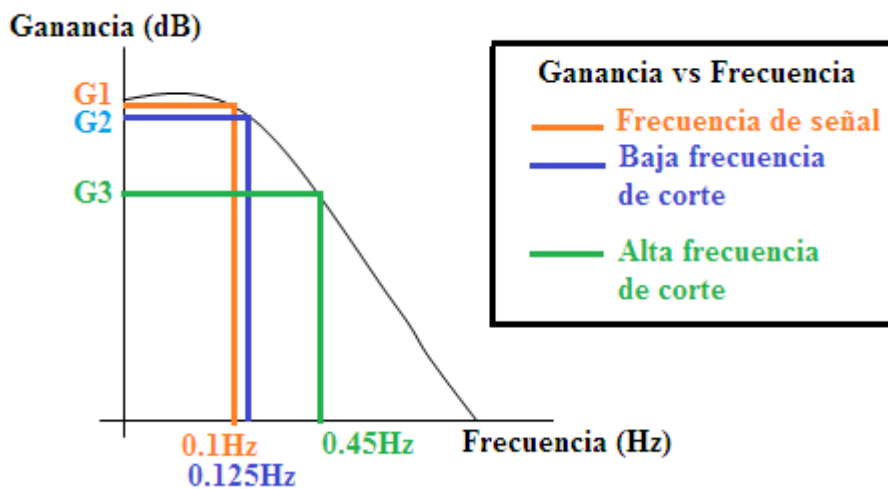


Figura F2: Representación de características del filtro trabajado.

