

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA
AUTOMATIZACION DE UN HORNO A GAS USADO EN LA QUEMA DE
CERAMICA**

JOHN ALEXANDER DIAZ ASTUDILLO

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA
2011**

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA
AUTOMATIZACION DE UN HORNO A GAS USADO EN LA QUEMA DE
CERAMICA**

JOHN ALEXANDER DIAZ ASTUDILLO

Trabajo para optar el titulo de
INGENIERO ELECTRONICO

Director de tesis
AGUSTIN SOTO
Ingeniero Electrónico

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA
2011**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del primer jurado

Firma del segundo jurado

Neiva, 26 de Octubre de 2011

Dedico este trabajo de grado a Dios por prestarme la vida;
A mi Madre, por confiar en mí durante todos estos años;
A mis amigos por los momentos que compartimos.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mi madre por su comprensión y por su constante apoyo en mi formación personal y profesional.

A todos los ingenieros del programa, en especial al director de tesis, ingeniero Agustín Soto, por el tiempo dedicado y sugerencias para el desarrollo del proyecto.

Al equipo de Tecnoparque nodo Neiva por su calidad humana y el apoyo constante en el diseño e implementación del proyecto.

A mis amigos que hicieron una agradable vida universitaria.

Al señor Alirio Parra, dueño de expresarte, por la financiación del proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
1. DESCRIPCIÓN DEL HORNO	16
1.1 PROCESOS QUE SE REALIZAN EN EL HORNO	18
1.1.1 PREPARACIÓN DEL PRODUCTO CRUDO	18
1.1.2 BIZCOCHADO	18
1.1.2.1 ARCILLA BLANCA LIBRE DE SEDIMENTO	19
1.1.2.2 ARCILLA ROJA O FERRUGINOSA	20
1.1.3 ESMALTADO	20
1.1.4 VITROFUSIÓN	21
2. SELECCIÓN DEL ELEMENTO SENSORIAL	22
2.1 CARACTERÍSTICAS PARA EL ELEMENTO SENSORIAL	22
2.2 SENSORES DE TEMPERATURA	22
2.2.1 TERMOCUPLAS O TERMOPARES	22
2.2.1.1 VENTAJAS DE LOS TERMOPARES	22
2.2.1.2 DESVENTAJAS DE LOS TERMOPARES	22
2.2.1.3 TIPOS DE TERMOPARES	23
2.2.1.3.1 TIPO K	23
2.2.1.3.2 TIPO E	23
2.2.1.3.3 TIPO J	23
2.2.1.3.4 TIPO N	23
2.2.1.3.5 TIPO B	23
2.2.1.3.6 TIPO R	23
2.2.1.3.7 TIPO S	24
2.2.2 RTD	24
2.2.2.1 VENTAJAS	24
2.2.2.2 DESVENTAJAS	25
2.2.2.3 TIPOS DE RTD	25
2.2.2.3.1 PLATINO	25
2.2.2.3.2 NÍQUEL	25
2.2.2.3.3 COBRE	25

3. ELEMENTO MEDIDOR	26
3.1 ACONDICIONADOR DE SEÑAL	27
3.2 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN	28
3.2.1 TIPOS DE ACONDICIONAMIENTO CON TERMOPARES	28
3.2.1.1 MAX6675	28
3.2.1.2 AD620	29
3.2.1.3 AD594/595	29
3.2.1.4 AD596/597	29
3.2.1.5 INA128/129	29
3.3 AMPLIFICADOR ELEGIDO	30
3.4 COMPENSADOR DE UNION FRIA	31
3.5 LM35	31
3.6 DISEÑO DEL COMPENSADOR	32
3.7 MODELO MATEMATICO DEL TERMOPAR	33
3.8 PROGRAMACION DEL MICROCONTROLADOR	34
3.9 TRANSMISION TIEMPO REAL	35
3.10 CALIBRACION DEL ELEMENTO MEDIDOR	35
4. ELEMENTO ACTUADOR	37
4.1 ELECTROVALVULAS	37
4.2 ELECTROVALVULAS PROPORCIONALES	37
4.3 SERVOMOTOR	37
4.4 DISEÑO DEL ELEMENTO ACTUADOR	38
4.5 ARQUITECTURA DEL ELEMENTO ACTUADOR	38
4.6 DISEÑO MECANICO DEL ACTUADOR	39
4.6.1 ENGRANAJE DIÁMETRO SUPERIOR	39
4.6.2 ENGRANAJE DIÁMETRO INFERIOR	41
4.7 PROGRAMACION DEL ELEMENTO ACTUADOR	44
5. IDENTIFICACION DEL SISTEMA	46
5.1 TIPOS DE IDENTIFICACION DEL SISTEMA	46
5.1.1 MODELO DE CAJA BLANCA	46
5.1.2 MODELO DE CAJA NEGRA	46
5.1.2.1 IDENTIFICACION MEDIANTE REDES NEURONALES	46
5.1.2.1.1 RED NEURONAL	46
5.2 IDENTIFICACION DEL HORNO	48
5.2.1 ENTRENAMIENTO	49
5.2.1.1 SCRIPT EN MATLAB PARA ENTRENAMIENTO	49
5.2.2 VALIDACION	51
5.2.2.1 SCRIBPT DE VALIDACION	51

5.3 ARQUITECTURA DE LA RED NEURONAL	52
6. CONTROL	54
6.1 TIPOS DE CONTROL	54
6.1.1 CONTROL ON-OFF	54
6.1.2 CONTROL PROPORCIONAL	54
6.1.2 CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO	54
6.1.3 CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL	55
6.1.4 CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO	55
6.2 DISEÑO DE UN CONTROLADOR PI DIGITAL PARA LA PLANTA	55
6.2.1 FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA	55
6.2.2 CONTROLADOR PI DIGITAL	57
7. HARDWARE DISPOSITIVO FINAL	61
7.1 TENSIONES DE ALIMENTACION	62
7.2 ENTRADA TERMOPAR Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL	63
7.3 COMPENSADOR	63
7.4 ENCENDIDO AUTOMÁTICO	64
7.5 CONTROLADOR	65
8. SOFTWARE DE MONITOREO	67
9. CONCLUSIONES	68
10. RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFIA	70
ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Bizcochado arcilla blanca	66
Tabla 2. Bizcochado arcilla roja	66
Tabla 3. Esmaltado	66
Tabla 4. Vitrofundición	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura del horno	16
Figura 2. Suministro de gas	17
Figura 3. Desfogue del horno	17
Figura 4. Horno preparado para el bizcochado	19
Figura 5. Bizcocho con arcilla blanca	19
Figura 6. Bizcocho con arcilla roja	20
Figura 7. Productos esmaltados	21
Figura 8. Producto hecho con la técnica de la vitrofusión	21
Figura 9. Termopar	26
Figura 10. Diagrama de bloques del elemento medidor	27
Figura 11. Forma física y distribución de pines del sensor LM35	32
Figura 12. Diagrama de bloques del compensador	32
Figura 13. Tensión de salida del termopar	33
Figura 14. Servomotor	38
Figura 15. Llave de paso	38
Figura 16. Engranaje para la llave de paso	41
Figura 17. Engranaje para el servomotor	42
Figura 18. Acople piñones	43
Figura 19. Acople llave – servomotor	43
Figura 20. Forma física del elemento actuador	44
Figura 21. Diagrama de bloques del diseño electrónico del actuador	44
Figura 22. Diseño electrónico del actuador	45
Figura 23. Funciones de activación	47
Figura 24. Datos para la identificación del sistema	48
Figura 25. Entrenamiento de forma grafica	50
Figura 26. Validación de la red	51
Figura 27. Arquitectura de la red neuronal	52
Figura 28. Entradas y salidas del sistema	56
Figura 29. Validación de la función de transferencia	56
Figura 30. Respuesta de la planta con el controlador	60
Figura 31. Diagrama de bloques del dispositivo final	61
Figura 32. Forma física del dispositivo final	61
Figura 33. Alimentación del sistema	62
Figura 34. Acondicionamiento del termopar	63
Figura 35. Circuito compensador	63

Figura 36. Quemador	64
Figura 37. Encendido automático	64
Figura 38. Software de monitoreo de temperatura	67

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Regulador 7805	71
ANEXO B. Regulador 7905	72
ANEXO A. Puente rectificador KBU1010	73
ANEXO D. Tabla normalizada termocupla tipo K	75
ANEXO E. Sensor de temperatura LM35	79
ANEXO F. Amplificador operacional LM358	80
ANEXO G. Amplificador de instrumentación INA128	81
ANEXO H. Microcontrolador PIC18f4550	82
ANEXO I. Circuito impreso dispositivo final	84
ANEXO B. Código fuente programa final	85

RESUMEN

Este proyecto fue desarrollado para el taller de arte Expresarte y consistió en la automatización de un horno a gas, usado en la quema de cerámica y de vidrio. El proyecto se dividió en diferentes etapas, tales como la selección de los dispositivos a utilizar, el diseño de un elemento medidor y el diseño de un elemento actuador, todo esto con el fin de identificar el sistema y finalmente implementar un dispositivo que fuera capaz de realizar diferentes procesos de manera automática.

La variable a controlar es la temperatura en el interior del horno, para adquirir una medida exacta y confiable se eligió un termopar tipo k, el cual requirió de un acondicionamiento de señal, que contó con un amplificador instrumental de bajo ruido, un compensador de unión fría y un microcontrolador con un modulo ADC de 10bits.

La implementación de una electroválvula proporcional suponía un incremento considerable en el valor del producto final, entonces se decidió fabricar el elemento actuador que regule la entrada de gas al horno, y se logró a partir de un servomotor y una llave de paso, debidamente acoplados con piñones.

Se identificó el sistema, a partir de datos de entrada y salida, se diseñó un control tipo proporcional integral, pero no se implementó debido a que los procesos de quemado en el taller, no necesitan de un incremento rápido de temperatura en el horno, sino un crecimiento progresivo, debido a la manipulación en la entrada gas, a determinado tiempo y temperatura.

El dispositivo final diseñado e implementado, cuenta con cuatro algoritmos de quema diferente, para que realice automáticamente, además de la opción de realizar quemas semiautomáticas, que no estén programadas en el dispositivo.

Finalmente se desarrolló un software de monitoreo, que muestra el comportamiento de la temperatura, respecto al tiempo, de manera gráfica.

ABSTRACT

This project was developed for the workshop of art "Expresarte" and the goal of it was automated a gas kiln used to burned ceramic and glass. This project was divided in different parts, like the choose of the devices to use, the design of a measure element and the design of a actuator element, everything with the goal of identify the system and finally implement an electronic device capable to do different process by itself.

The variable to control is the temp inside the kiln, to get a reliable and exact measure, was used a k thermocouple, it needed a signal conditioning witch a low noise instrumentation amplifier, a cold junction compensator and a microcontroller with ten bits ADC module.

The implementation of a proportional solenoid mean a considerable increase in the final product's value , then decided to make the actuator element to regulate the entry of gas inside the kiln, and managed from a servomotor and a cock, properly coupled with pine nuts.

The system was identified, from entry and exit data, was designed a proportional integral control, but wasn't implemented because the burning process in the workshop don't need a fast temperature increase in in the kiln, else if a progressive growth, due to the gas input handling at a fixed time and temperature.

The final device was designed and implemented with four different burning algorithms, to perform automatically, also has the option of semi burning that weren't programmed into the device.

Finally was developed a monitoring software, which displays the temperature versus time behavior.

INTRODUCCIÓN

El propósito del proyecto consistió en la realización de un sistema que a partir del control de la temperatura en el horno, sea capaz de realizar automáticamente los distintos procesos de quema de cerámica que se realizan en el taller de arte expresarte. Para ello fue necesario el análisis del funcionamiento del horno con el fin de determinar el modelo matemático del sistema, luego se selecciono los dispositivos que se adaptaran a las necesidades, y finalmente se desarrollo una interfaz grafica para monitorear temperatura y la variable tiempo. La implementación de este proyecto mejora ampliamente la producción en la empresa, debido a que no se sufrirán mas perdidas por fallas en el manejo manual del horno.

1. DESCRIPCION DEL HORNO

El sistema con el cual se hace la cocción del producto crudo, se trata de un horno refractario a gas para cerámica, cuyo diseño y construcción es propio del taller de arte expresarte.

Figura 1. Estructura del horno



La estructura del horno, es metálica, forrada en lamina de acero inoxidable, internamente está construido por ladrillo aislante refractario y manta cerámica con capacidad térmica para 1280 °C.

La tapa posterior posee solamente manta cerámica, el suministro de gas se hace a través de 4 quemadores atmosféricos, cuyo diseño y construcción también son propios del taller de arte expresarte. Los cuales están constituidos a partir de tubo galvanizado con fixton de presión.

Figura 2. Suministro de gas



También cuenta con un desfogue, que se trata de una cavidad en la parte trasera, cuyo tamaño depende y tiene relación proporcional a la capacidad interna del horno, este desfogue tiene como finalidad la combustión al interior del horno, de manera que el oxígeno que se arrastra por los quemadores, se queme dentro del horno, en una atmosférica oxidante que no genera dióxido de carbono. Lo cual representa una quema limpia, en cuanto a contaminación se refiere.

Figura 3. Desfogue del horno



1.1 PROCESOS QUE SE REALIZAN EN EL HORNO

La cerámica es el producto finalizado, para llegar a él, es necesario preparar el producto crudo y pasarlo por dos cocciones, denominados bizcochado y esmaltado respectivamente.

1.1.1 PREPARACIÓN DEL PRODUCTO CRUDO

Esta etapa empieza con la elaboración de la arcilla líquida, la cual se conoce como barrotina, y se prepara básicamente con agua y arcilla en polvo, además de otros componentes. A continuación se procede a llenar los moldes en yeso, con barrotina, de esta manera se adquiere un producto que toma la forma del molde con un cierto grado de dureza.

Para que se considere como producto crudo listo para la cocción, es necesario un secado de 24 horas, con el que se logra mayor dureza, para que finalmente pase por un proceso de pulida.

1.1.2 BIZCOCHADO

El bizcochado es el proceso en el cual el producto crudo se transforma en lo que se conoce como bizcocho, al cual se le puede aplicar pintura en seco y de esta manera obtener un producto listo para comercializar o aplicar pintura horneable y pasar por una segunda cocción.

En esta etapa se llena el horno de piezas crudas, se cierra y se encienden los quemadores, este proceso tiene dos etapas, en la cual la más importante es el caldeo o precalentamiento, que permite que el horno interiormente se vaya calentando de manera gradual sin dañar las piezas crudas, el caldeo depende del tipo de piezas, el cual a su vez depende de la calidad de la arcilla. La segunda etapa, consiste en un aumento de presión, con el cual se pueda lograr la temperatura deseada a un determinado tiempo.

El bizcochado depende del material con el que se elabora el producto crudo, para ello tenemos dos tipos de materiales, que son los más comunes: arcilla blanca libre de sedimento y arcilla ferruginosa con contenido de material orgánico y arenista.

Figura 4. Horno preparado para el bizcochado



1.1.2.1 ARCILLA BLANCA LIBRE DE SEDIMENTO

Este tipo de arcilla se considera como una arcilla limpia, el bizcochado de productos elaborados con ella, debe tener una etapa de precalentamiento o caldeo, de un tiempo aproximado de 45 minutos, tiempo en el cual se lograra una temperatura aproximada de 400 ° C, el objetivo se logra manipulando la relación de entrada de gas, aumentándola de manera gradual a los 15 y 30 minutos, después del encendido del horno, de modo que se aumente la presión a partir de los 45 minutos, hasta que se logre una temperatura máxima de 970 °C, en un tiempo estimado de 2 horas.

Figura 5. Bizcocho con arcilla blanca



1.1.2.2 ARCILLA ROJA O FERRUGINOSA

Este tipo de arcilla se conoce también como arcilla roja, por su baja calidad, se necesita tener más cuidado a la hora del bizcochado, para ello se debe tener especial cuidado en el caldeo, que en este caso debe durar 2 horas y media, con el que se lograra una temperatura de 450 °C, para ello solo se hace un cambio muy tenue en el flujo de entrada a las 2 horas, donde se debe registrar una temperatura de 300 °C, posterior al caldeo se aumenta la presión, de manera que se logre una temperatura de 950 °C, en un tiempo total de 3 horas y media.

Figura 6. Bizcocho con arcilla roja



1.1.3 ESMALTADO

El esmaltado es la segunda cocción y también se conoce como vidriado, en esta etapa el bizcocho se pule, y se le aplica pintura horneable, obteniendo después de la cocción, un producto con un excelente acabado.

A diferencia del bizcochado, los productos se colocan separados sobre una estantería refractaria, todo esto con el fin de que los productos no se unan debido al esmalte. Así como en el bizcochado, también existe caldeo, pero en este proceso el tiempo de caldeo, es mucho menor, debido a que el producto ya está cocido, y no hay peligro de que se rompa.

Cabe destacar que la pintura o esmalte horneable que se aplique al bizcocho, debe estar fabricada a la temperatura que el producto requiera.

Figura 7. Productos esmaltados



1.1.4 VITROFUSIÓN

La vitrofusión es el proceso de unir dos o más vidrios mediante calor. Debido a la capacidad térmica del horno, es posible realizar arte con la técnica del vidrio.

Para que se logre la unión del vidrio y obtener un producto listo para comercializar, se deben conseguir dos pedazos de vidrio planos y de igual tamaño, uno de ellos va a estar decorado por una pintura especial, y el otro va a ir encima. La acción del fuego hace que los dos vidrios se fusionen, además se puede colocar encima de algún molde y de esta manera lograr que el vidrio tome la figura del molde.

Figura 8. Producto hecho con la técnica de la vitrofusión



2. ELEMENTO SENSORIAL

El parámetro con el cual se automatizó el horno es la temperatura, en esta etapa se realizó un estudio minucioso sobre los distintos sensores de temperatura, de aplicación industrial, teniendo en cuenta las características, a las que debía afrontarse, cuando en conjunto con su respectivo acondicionamiento de señal, hiciera parte del aparato medidor de temperatura.

2.1 CARACTERÍSTICAS PARA EL ELEMENTO SENSORIAL

Para los distintos procesos de quema que se requieren en el taller, se encontró que las temperaturas registradas con el aparato medidor, nunca superan los 1280 grados centígrados. A partir de esto podemos indicar que la característica más relevante a la hora de elegir el elemento sensorial, es el rango de medida, el cual debe oscilar entre 30° C y 1280° C.

2.2 SENSORES DE TEMPERATURA

Entre los tipos de sensores que se usan a nivel industrial y que soportan temperaturas elevadas encontramos los termopares, y las RTD, a continuación se relacionan las características, ventajas y desventajas de cada uno de estos sensores.

2.2.1 TERMOCUPLAS O TERMOPARES

Los termopares debido a su sencillez, son los sensores más utilizados en el sector industrial, cuando se trata de determinar los valores que toma la variable temperatura en un proceso. Estos resultan de la unión de dos metales distintos que producen una diferencia de tensión, la cual es función de la diferencia de temperatura entre sus dos extremos, los cuales se definen como: unión caliente y unión fría o de referencia.

2.2.1.1 VENTAJAS DE LOS TERMOPARES

Los termopares miden un amplio rango de temperaturas, no necesitan de excitación externa, son económicos, responden rápidamente a los cambios de temperatura, tienen una fiabilidad elevada, tienen conectores estándar lo que significa que son intercambiables.

2.2.1.2 DESVENTAJAS DE LOS TERMOPARES

La principal desventaja es la exactitud ya que los errores del sistema inferiores a 1° C son difíciles de obtener, además de que la diferencia de tensión generada es función no lineal de la temperatura y se debe añadir al sistema de medida un circuito de compensación de unión fría.

2.2.1.3 TIPOS DE TERMOPARES

2.2.1.3.1 Tipo K

Resultan de unir el chromel (aleación de níquel y cromo) y el alumel (aleación de níquel y aluminio), su rango de temperatura es de -200° C a +1372° C y su sensibilidad es aproximadamente de 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

2.2.1.3.2 Tipo E

Resultan de unir el cromo y el constantán (aleación de cobre y níquel), su rango de temperatura es bajo y su sensibilidad es aproximadamente 68 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

2.2.1.3.3 Tipo J

Resultan de unir el hierro y el constantán, su rango de temperatura es de -40° C a +750° C y su sensibilidad es aproximadamente de 52 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

2.2.1.3.4 Tipo N

Resultan de unir el nicrosil (aleación de níquel, cromo y silicio) y el nisil (aleación de níquel y silicio), su rango de temperatura es alto.

2.2.1.3.5 Tipo B

Resultan de unir el platino y el rodio, su rango de temperatura mayor a 1800° C y su sensibilidad es aproximadamente de 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

2.2.1.3.6 Tipo R

Resultan de unir el platino y el rodio, su rango de temperatura es hasta 1300° C y su sensibilidad es aproximadamente de 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

2.2.1.3.7 Tipo S

Resultan de unir el platino y el rodio, su rango de temperatura es hasta 1300° C y su sensibilidad es aproximadamente de 10 uV/° C.

2.2.2 RTD

El principio de funcionamiento de la RTD se basa flujo de electrones a través de la resistencia. Cuando existe una variación de la temperatura en el material resistivo, el flujo de electrones varia, lo que significa entonces que la resistencia presenta una variación cuando existen cambios de temperatura.

Una RTD consiste en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento, el cual puede ser de cerámica o vidrio.

El hilo conductor más adecuado para la creación de estos sensores es el platino, debido a la alta precisión y estabilidad, pero el coste sería elevado, por esta razón se puede variar el platino por el níquel, con el cual no se garantiza linealidad, o por cobre, con el inconveniente de la baja resistividad.

Adquirir la señal de una RTD, supone conectar la salida a un puente wheastone, el cual se puede disponer en distintos montajes.

La RTD funciona de tal manera que a mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia, y dicha resistencia puede expresarse de manera polinómica:

$$R = R_0 * (1 + \alpha * \Delta T)$$

Donde

R_0 Es la resistencia a la temperatura de referencia T_0 .

ΔT Es la desviación de temperatura respecto a T_0 .

α Es el coeficiente de temperatura del conductor especificado a 0 °C, interesa que sea de gran valor y constante con la temperatura.

2.2.2.1 VENTAJAS

El rango de temperaturas de la RTD, es bastante amplio, las medidas de estas son mas exactas y repetitivas, son las más estables con el tiempo, la relación

entre temperatura y resistencia es mas lineal, la sensibilidad es mayor comparada con los termopares, no necesitan de la compensación de unión fría.

2.2.2.2 DESVENTAJAS

Teniendo en cuenta que los conductores presentan una resistividad demasiado baja, es necesario entonces que para obtener una resistividad significativa, se deba arrollar más material, lo que incrementa el coste y la masa y limita la velocidad del dispositivo.

Las RTD requieren excitación de corriente, pueden ser propensos a auto calentamiento y tiene una vida útil muy baja.

2.2.2.3 TIPOS DE RTD

La siguiente clasificación se hace según el material con el que este contruidos.

2.2.2.3.1 PLATINO

Es el metal óptimo para las RTDs, porque se logra precisión y estabilidad, pero su coste es elevado, el rango de medida es de -200 a +850 °C.

2.2.2.3.2 NÍQUEL

Aunque su coste es bajo, la falta de linealidad es su gran desventaja, el rango de medida es de -150 a 300 °C.

2.2.2.3.3 COBRE

Es el más económico, se considera estable y es lineal para temperaturas cercanas al medio ambiente, su rango de medida es de -200 a 120 °C.

3. ELEMENTO MEDIDOR

Después de realizar el estudio sobre los sensores de temperatura y teniendo en cuenta que el sistema a controlar, toma valores de temperatura hasta los 1250 °C, el dispositivo más apropiado para utilizar es el termopar.

De los distintos tipos de termopar, se eligió el tipo k, ya que se adapta a nuestras condiciones, debido a su rango de trabajo que llega hasta los 1372 °C, a continuación se procedió a seleccionar los dispositivos que en conjunto formaran el aparato de medida.

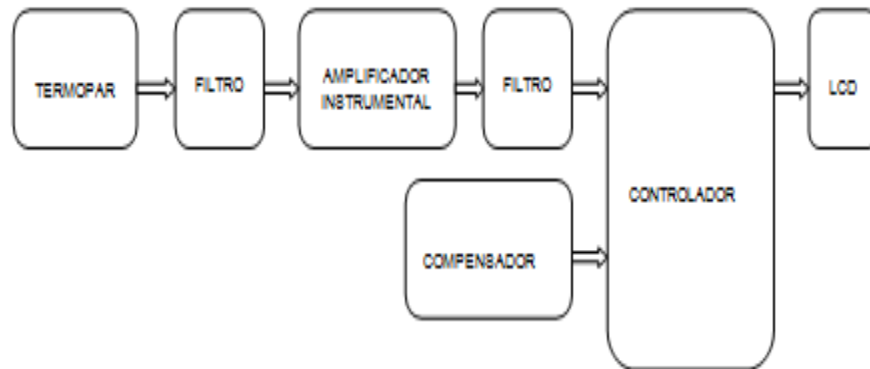
Figura 9. Termopar



El aparato de medida necesita un acondicionamiento de señal, un compensador de unión fría, un microcontrolador, una lcd y además de una etapa de filtrado pasabajo.

3.1 ACONDICIONADOR DE SEÑAL

Figura 10. Diagrama de bloques del elemento medidor



Se sabe que el termopar tiene muchas desventajas con respecto a los demás sensores, lo que se tiene que hacer entonces es minimizar al máximo todas esas desventajas.

La salida de un termopar es muy pequeña, por lo que es muy susceptible al ruido eléctrico, es por eso que se crea un filtro pasabajo y se conecta a continuación de ella. Después de que la señal se encuentra filtrada, se hace una etapa de amplificación, y se anexa a este otro filtro pasabajo. La razón de los filtros pasabajos, es minimizar los ruidos, ya que la frecuencia a la que oscila la temperatura, es menor a la frecuencia de estos.

Se sabe que por los efectos termoeléctricos que sufre el termopar, la temperatura final que este detecta es función de la diferencia de temperaturas entre sus dos extremos, de ahí que se necesite de un compensador de unión fría, el cual tendrá la función de adicionar la temperatura ambiente, que es la que se supone a la que estará expuesta el extremo frío del termopar, para que finalmente obtengamos la temperatura real a la que se expone el sistema que se quiere medir.

La adición de temperaturas entre la que registra el termopar y el compensador de unión fría, se realiza en un microcontrolador utilizando los puertos análogos, además en este último se programa la función polinómica del termopar.

3.2 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN

El componente central de esta etapa es un amplificador de instrumentación ya que estos están diseñados para tener una alta impedancia de entrada y un alto rechazo al modo común, lo que hace común en aplicaciones donde se trabaja con señales débiles, tales como las salidas de los termopares, con el fin de minimizar el error de medida.

Para aplicaciones típicas de termopar se encontraron los siguientes amplificadores de instrumentación: max6675, ad620, ad594/595, ad596/597, ina128/129 y el lt1025, a continuación se relacionan algunas características de estos empaquetados.

3.2.1 TIPOS DE ACONDICIONAMIENTO CON TERMOPARES

3.2.1.1 MAX6675

Este circuito integrado tiene apariencia pequeña de 8 pines, tipo Soic, se conoce como convertidor analógico a digital para termopares tipo k, pero es mucho más que esto, puesto que dentro de este pequeño empaquetado se encuentra toda la electrónica necesaria para amplificar, compensar y convertir a digital la diferencia de tensión generada por el termopar, lo que hace muy sencilla conexión entre el termopar y el micro, además de que ahorrara demasiado espacio, a la hora del diseño del circuito impreso, el inconveniente de usar este integrado, proviene del tipo empaquetado, ya que es difícil su uso en protoboard, porque necesitaría de un adaptador para la experimentación, el cual habrá que adquirir o diseñar.

Entre algunas características proporcionadas por el fabricante, encontramos que la medición de temperaturas alcanza los 1024 °C, la conversión a digital la realiza en 12 bits, lo que equivale a una resolución de 0.25 °C, funciona con alimentación de 3.3 a 5 voltios, consume como máximo 1.5 mA, contiene interfaz compatible con SPI de solo lectura con frecuencia de reloj spi máxima de 4.3 Mhz y tiempo de conversión 0.17 s, máximo 0.22 s.

Existen consideraciones al usar este integrado, con el fin de mejorar la estabilidad de las mediciones, tales como colocar capacitores bypass, cerca de sus pines de alimentación, además deja pendiente el hecho de que el termopar presenta una respuesta que no es lineal, algo que se debe tener en cuenta en aplicaciones donde se necesita precisión.

3.2.1.2 AD620

Es un amplificador de instrumentación de alta precisión, bajo costo, solo requiere de una resistencia externa para establecer ganancias de 1 a 1000, opera con voltajes bipolares de +- 18 voltios, su empaquetado es de ocho pines, consume máximo 1.3 mA, su desempeño en DC es excelente debido a su máximo offset de 50uV, también se puede adquirir en empaquetado tipo SOIC, su bajo consumo lo hace conveniente en aplicaciones portátiles, además lo encontramos en la instrumentación médica, la amplificación de transductores, las basculas electrónicas, etc.

3.2.1.3 AD594/595

Es un completo amplificador de instrumentación con compensador de unión fría para termopar en un chip monolítico, su funcionalidad consiste en recibir en la entrada la señal proveniente del termopar y entregar a su salida un nivel de voltaje alto, con una proporcionalidad lineal de factor 10mV/ °C. Opera con una alimentación máxima de 36 voltios entre sus pines +vs y -vs.

3.2.1.4 AD596/597

Es un controlador monolítico de temperatura que se ha optimizado para aplicaciones de control de horno, donde se registran temperaturas elevadas. Este dispositivo amplifica la señal de termopar, realiza su compensación de unión fría, con el fin de determinar de proporcionar la temperatura interna, esta señal interna se compara con un setpoint externo, con el fin de obtener una señal de control a la salida. El setpoint se programa utilizando una sola resistencia externa. Alternativamente se puede configurar para que entregue una salida de tensión proporcional de 10mV/°C, directamente de la señal del termopar. Puede ser alimentado con un máximo de 36 voltios y su salida de alarma tiene un formato flexible, de manera puedan ser utilizadas por reles, leds o lógica ttl.

3.2.1.5 INA128/129

Es un amplificador de instrumentación de baja potencia, la característica más importante de este dispositivo es su excelente precisión. Su diseño basado en tres amplificadores operacionales y su pequeño tamaño lo hace ideal en diversas aplicaciones. Se puede obtener ganancias de 1 a 10000, a partir del valor de una resistencia externa que se conecta en dos de sus terminales. Dicha ganancia obedece a una ecuación estándar en la industria y es compatible con el AD620.

3.3 AMPLIFICADOR ELEGIDO

Después de revisar la información de cada uno de los amplificadores de instrumentación, se elige el ina128.

Como la ganancia del dispositivo depende del valor de una resistencia externa que se conecta entre las terminales R_G , se procede a elegir el valor, para la elección de dicho valor, se debe considerar que la salida se va a conectar a una entrada análoga de un microcontrolador, osea que los valores de voltaje a la salida del amplificador deben oscilar entre 0 y 5 voltios.

El máximo valor que puede sensar el termopar tipo k, es 1372 °C, para dicha temperatura, el entregara una diferencia de tensión entre su unión fría de 54.886 mV.

Tenemos entonces que la ganancia máxima que debe proporcionar el amplificador de instrumentación, queda definida así:

$$G = \frac{5}{54.886 * 10^{-3}}$$

$$G = 91.097$$

A partir del valor de ganancia, encontramos el valor de R_G , el cual encontramos gracias a la ecuación estándar del INA, que es la siguiente:

$$G = 1 + \frac{50 K\Omega}{R_G}$$

Despejando obtenemos:

$$R_G = \frac{50 K\Omega}{G - 1}$$

Reemplazando la ganancia especifica $G = 91.097$; obtenemos

$$R_G = \frac{50 K\Omega}{91.097 - 1}$$

$$R_G = 554.951 \Omega$$

Ahora procedemos a conseguir un valor comercial para R_g , encontrando 510Ω y 560Ω , los valores de resistencia más cercanos, de ellos se elige la resistencia de mayor valor, debido a que con este valor se reduce la ganancia, pero se sigue garantizando la salida menor a 5 voltios del amplificador.

Tenemos entonces una ganancia:

$$G = 1 + \frac{50 \text{ K}\Omega}{560 \Omega}$$

$$G = 90.285$$

3.4 COMPENSADOR DE UNIÓN FRÍA

Por los efectos termoeléctricos que sufre el termopar, sabemos que la temperatura, finalmente sensada, se debe a la diferencia de temperaturas entre la unión caliente y la unión fría.

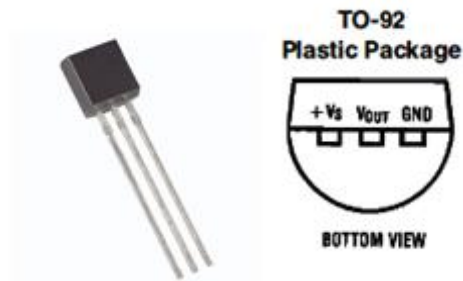
Para nuestro caso, la unión caliente del termopar, se encontrara en el interior del horno, soportando las altas temperaturas, y la unión fría se encontrara alejada del horno, es decir que soportara la temperatura ambiente.

Se hace necesario entonces, de un circuito que adicione la temperatura ambiente, con el fin de que la temperatura final medida, sea la que se encuentra en el interior del horno, dicho circuito toma el nombre de compensador de unión fría.

3.5 LM35

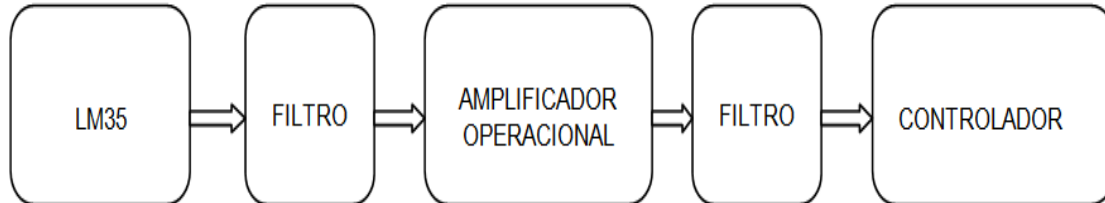
Es un circuito integrado sensor de temperatura, cuya tensión de salida es directamente proporcional a la escala de grados Celsius. Es de bajo costo y no necesita de una calibración externa para proporcionar una salida lineal. Su sensibilidad equivale a $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, y su rango de trabajo es de -55°C a 150°C .

Figura 11. Forma física y distribución de pines del sensor LM35



3.6 DISEÑO DEL COMPENSADOR

Figura 12. Diagrama de bloques del compensador



El circuito compensador tiene como elemento principal el sensor de temperatura lm35, y debido a sus características, es necesario de una amplificación, dicha amplificación, se puede conseguir con solo un amplificador operacional, debido a que la ganancia es pequeña.

La temperatura máxima que soporta el dispositivo es de 150 °C, lo que supone una salida de 1.5 voltios, como la tensión máxima que recibe el microcontrolador es 5 voltios, necesitaremos una ganancia, definida por:

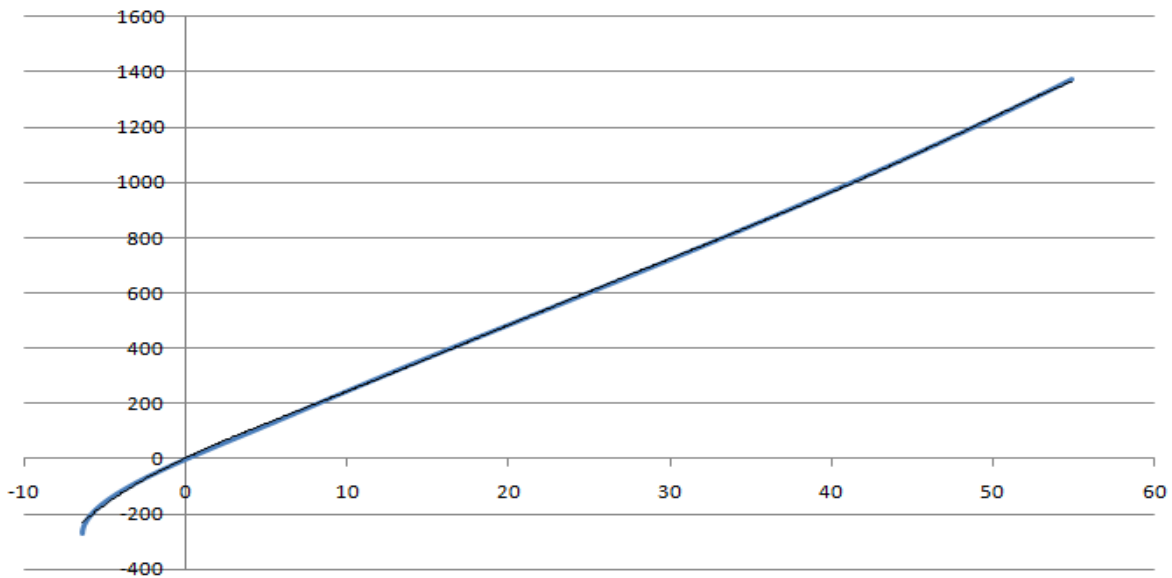
$$G = \frac{5}{1.5} = 3.333$$

Cabe destacar que el compensador, soportara máximo 50 °C.

3.7 MODELO MATEMÁTICO DEL TERMOPAR

El termopar proporciona una tensión de salida no lineal, respecto a la temperatura, para una correcta lectura, se debe acudir a las tablas normalizadas de las termocuplas, y a partir de ellas hacer una aproximación polinómica a la salida no lineal.

Figura 13. Tensión de salida del termopar



Con ayuda de Excel, obtenemos los coeficientes del polinomio que aproxima la respuesta no lineal de la temperatura.

Para que la aproximación sea lo más precisa posible, se recomienda utilizar un polinomio de grado seis, de manera que la ecuación polinómica sería de esta manera:

$$T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6$$

Donde:

T = temperatura

x = voltaje entregado por el termopar

a = coeficientes de ajuste del polinomio

Para un termopar tipo K, tenemos los siguientes coeficientes de polinomio:

$$a_6 = 5.912e-008$$

$$a_5 = -1.053e-005$$

$$a_4 = 0.0007209$$

$$a_3 = -0.02188$$

$$a_2 = 0.2635$$

$$a_1 = 23.41$$

$$a_0 = 1.134$$

La aproximación polinómica se graba en el programa del microcontrolador.

3.8 PROGRAMACION DEL MICROCONTROLADOR

El microcontrolador utilizado para el elemento medidor es el PIC18f4550, este recibirá dos entradas análogas, en el puerto A, el pin AN0 recibirá la señal proveniente del termopar, para saber el valor en mili voltios, seguimos algunos pasos, utilizamos un conversor análogo – digital de 10 bits.

Entonces para leer el dato análogo debemos

$$Resolucion = \frac{5}{2^n - 1}$$

Donde n es el número de bits del conversor

$$Resolucion = \frac{5}{2^{10} - 1}$$

$$Resolucion = 4.887585533 * 10^{-3}$$

Multiplicamos el dato digital por la resolución, y obtenemos el valor análogo recibido, procedemos a dividir este valor por la ganancia proporcionada por el amplificador de instrumentación, la cual es de 92.40767825 y continuamente se multiplica por 1000, para convertir este dato en mili voltios, este último dato es el

que se introduce en la ecuación polinómica del termopar, y obtenemos la variable de temperatura indicada por el termopar.

Por el pin AN1, se recibe la señal proveniente del compensador, entonces el valor digital se multiplica por la resolución, que en este caso es la misma, y se divide por la ganancia que se le dio al amplificador operacional, la cual es 5.94, posteriormente se halla el valor en mili voltios, multiplicando por 1000 y como la relación de temperatura en el lm35, es de 10mV/°C, se divide el dato en mili voltios por 10 y obtenemos la temperatura en el compensador.

Teniendo los datos de temperatura del termopar y el compensador, los sumamos, y de esta manera se encuentra el valor real de temperatura en el interior del horno y es mostrado en el aparato medidor por una lcd monocromática de 20x2.

3.9 TRANSMISION TIEMPO REAL

La programación del microcontrolador, cuenta con una rutina que me envía por los pines de transmisión y recepción, vía usb, el valor de la temperatura en el interior del horno.

3.10 CALIBRACION DEL ELEMENTO MEDIDOR

Cuando no se cuenta con un dispositivo patrón, para comprobar la exactitud de las medidas de temperatura, que se realizan, es posible comprobar esta medida con temperaturas conocidas, como por ejemplo el punto de ebullición del agua, la cual está estimada en 100°C, pero depende de la presión atmosférica del lugar donde se hace la prueba. La ecuación para obtener la temperatura de ebullición del agua es la siguiente:

$$T = \frac{1730.630}{8.07131 - \log P} - 233.426$$

Donde P se refiere a la presión atmosférica, donde se hace la prueba, en mmHg.

Para esto es necesario encontrar la presión atmosférica de Neiva, la cual es aproximada a 1008.12 mb.

Teniendo en cuenta que 1mb = 0.75006mmHg, encontramos que la presión atmosférica de Neiva en mmHg es de 75601504872.

Reemplazando en la formula, tenemos:

$$T = \frac{1730.630}{8.07131 - \log(756.1504872)} - 233.426$$

$$T = 99.8552 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Conociendo esta información, se hace la prueba del instrumento medidor, se sumerge el termopar en una olla, la cual contiene agua, y se encuentra elevando su temperatura, debido a la acción del fuego de una estufa, encontrando que cuando empieza la ebullición del agua, el aparato de medición empieza a tener temperaturas constantes en un rango de 98 a 100 °C.

4. ELEMENTO ACTUADOR

El elemento actuador, es un dispositivo que genera un efecto sobre un proceso automatizado, a partir de energía hidráulica, neumática o eléctrica. El elemento actuador recibe la orden de un controlador y en función de ella activa o desactiva un elemento final de control.

En nuestro caso el elemento actuador es el encargado de controlar el flujo de gas hacia el horno, es decir, necesitamos una válvula que se controle electrónicamente, las cuales se han definido como electroválvulas.

4.1 ELECTROVALVULAS

Son válvulas electromecánicas, controladas por una corriente eléctrica a través de una bobina solenoidal, están diseñadas para controlar el flujo a través de un conducto.

Se compone de dos partes fundamentales: el solenoide y la válvula, el solenoide transforma la energía eléctrica a energía mecánica, que finalmente actúa sobre la válvula.

Existen diversos tipos de electroválvulas, pero todas coinciden en un funcionamiento todo o nada, es decir, con presencia de energía, permiten el flujo de gas, y en ausencia de energía, el paso de fluido se obstruye, en nuestro proceso se hace necesario, de una electroválvula, en la cual la apertura de la válvula pueda tener diferentes tipos de posicionamiento. Un dispositivo como el que se requiere, recibe el nombre de electroválvula proporcional.

4.2 ELECTROVALVULAS PROPORCIONALES

Este tipo de válvulas regula la presión y el caudal a través de un conducto por medio de una señal eléctrica, que puede ser corriente o voltaje. Su principal aplicación es el control de posición y fuerza, ya que los movimientos son proporcionales y de precisión, lo que permite un manejo más exacto del paso de fluido.

4.3 SERVOMOTOR

Es un dispositivo actuador pequeño que consta de un motor de corriente continua, una caja reductora y un circuito de control, el cual tiene la capacidad de ser

llevado a cualquier posición angular, cuando se envía una señal codificada en la entrada. Dicha posición se mantendrá, mientras sea constante su entrada, y cuando esta varia, la posición angular del engranaje también varia. Esta condición, hace que los servomotores sean usados en aplicaciones robóticas y de radio control.

4.4 DISEÑO DEL ELEMENTO ACTUADOR

En nuestra aplicación es preciso controlar el flujo de gas que llega al horno, es por eso que debemos garantizar una regulación adecuada, esta situación hace pensar que una electroválvula proporcional funcione como elemento actuador, pero su elevado costo, nos lleva a elegir el servomotor.

Una vez elegido el servomotor se procede a evaluar el acople de este, para que realice una función similar, a una electroválvula proporcional.

4.5 ARQUITECTURA DEL ELEMENTO ACTUADOR

La arquitectura del elemento actuador, consta de la forma como se acopla el servomotor a la llave de paso que controla el flujo gas hacia los cuatro quemadores, que indican el nivel de llama en el horno a controlar.

Figura 14. Servomotor



Figura 15. Llave de paso



Se evaluaron dos formas de acople, la primera fue tener una relación de 2 piñones colocados en el servo y en la llave, conectados entre ellos por una correa dentada, la segunda era tener una relación directa entre piñones.

4.6 DISEÑO MECANICO DEL ACTUADOR

Se opto por la segunda opción, es así como se fabricaron dos piñones que se acoplaran, de manera adecuada al servo y a la llave de paso.

El tipo de engranaje utilizado fue cilíndrico de dientes rectos, se escogió este porque en estos se transmite una mayor fuerza, aunque la debilidad de estos es la poca velocidad que manejan.

Para lograr mayor fuerza, se decide fabricar los piñones de distinto diámetro, es decir un engranaje con un diámetro inferior para el servomotor, y un engranaje con un diámetro superior para la llave de paso, todo esto con la finalidad de que con una fuerza no muy elevada, se logre la posición reguladora en el paso de gas.

En el diseño de engranaje se deben tener en cuenta las siguientes variables

De: Diámetro exterior

Dp: Diámetro primitivo

Di: Diametro interior

Z: numero de dientes

M: modulo de fabricación

Pc: paso diametral o circular

4.6.1 ENGRANAJE DIÁMETRO SUPERIOR

Partimos de que nuestro engranaje debe tener un diámetro de 80mm y que utilizaremos un modulo 2 de fabricación

Empezamos de la ecuación del diámetro exterior

$$D_e = D_p + 2 \times M$$

De esta despejamos el diámetro primitivo y hallamos su respectivo valor

$$D_p = D_e - 2 \times M$$

$$D_p = 80 - 2 \times 2$$

$$D_p = 76$$

Seguimos con la ecuación de diámetro interior y hallamos su valor

$$D_i = D_p - 2.5 \times M$$

$$D_i = 76 - 2.5 \times 2$$

$$D_i = 71$$

Ecuación del diámetro primitivo

$$D_p = Z \times M$$

Hallamos el número de dientes

$$Z = D_p \div M$$

$$Z = 76 \div 2$$

$$Z = 38$$

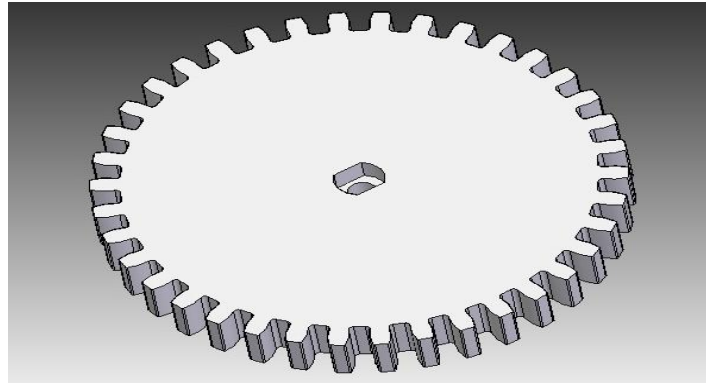
Encontramos el paso circular

$$P_c = \pi \times M$$

$$P_c = 3.14 \times 2$$

$$P_c = 6.28$$

Figura 16. Engranaje para la llave de paso



El acople a la llave de paso, es directo y se ajusta con un tornillo, con el propósito de tener un nivel igual, cuando se aplique la fuerza.

4.6.2 ENGRANAJE DIÁMETRO INFERIOR

Partimos de que nuestro engranaje debe tener un diámetro de 30mm y que utilizaremos el mismo modulo 2 de fabricación

Empezamos de la ecuación del diámetro exterior

$$D_e = D_p + 2 \times M$$

De esta despejamos el diámetro primitivo y hallamos su respectivo valor

$$D_p = D_e - 2 \times M$$

$$D_p = 30 - 2 \times 2$$

$$D_p = 26$$

Seguimos con la ecuación de diámetro interior y hallamos su valor

$$D_i = D_p - 2.5 \times M$$

$$D_i = 26 - 2.5 \times 2$$

$$D_i = 21$$

Ecuación del diámetro primitivo

$$D_p = Z \times M$$

Hallamos el número de dientes

$$Z = D_p \div M$$

$$Z = 26 \div 2$$

$$Z = 13$$

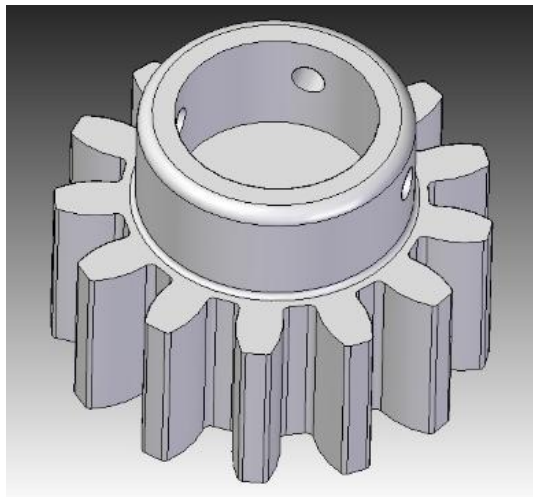
Encontramos el paso circular

$$P_c = \pi \times M$$

$$P_c = 3.14 \times 2$$

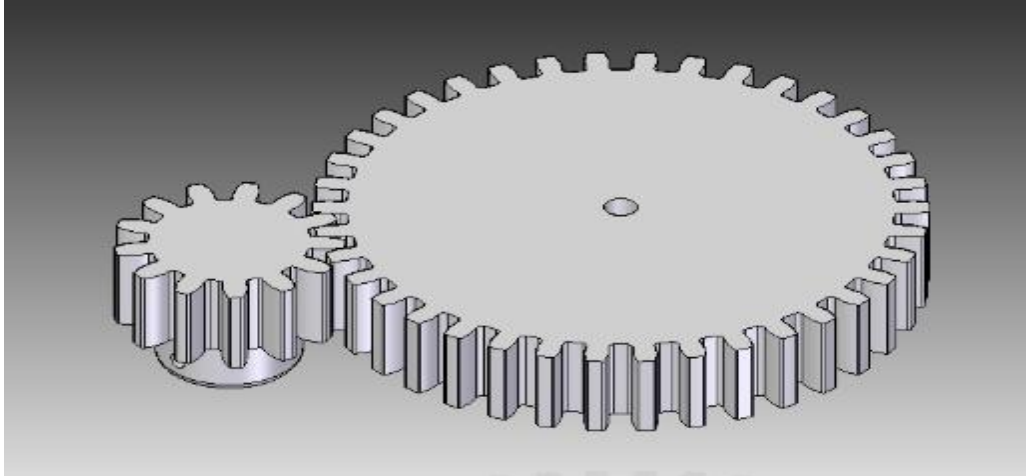
$$P_c = 6.28$$

Figura 17. Engranaje para el servomotor



El acople al servomotor es directo, pero el ajuste se hace con tres prisioneros.

Figura 18. Acople piñones



Para mantener una relación y sincronía entre los dos piñones, se procede a hacer un acople tipo abrazadera, para ello se toman todas las medidas posibles de llave de paso y servomotor, y finalmente se obtiene un diseño como en la figura 19.

Figura 19. Acople llave - servomotor

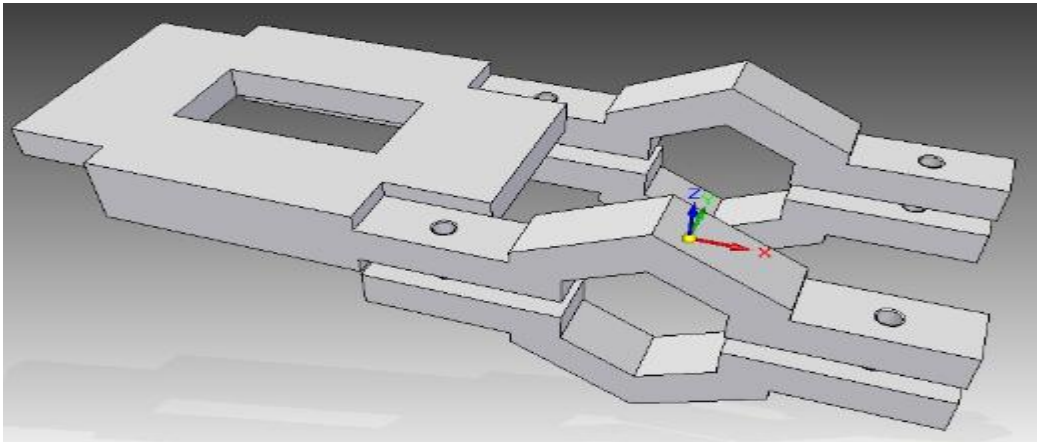


Figura 20. Forma física del elemento actuador



4.7 PROGRAMACION DEL ELEMENTO ACTUADOR

Figura 21. Diagrama de bloques del diseño electrónico del actuador

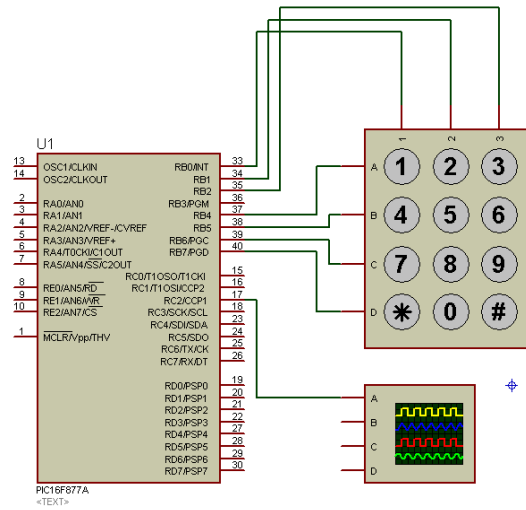


El servomotor posee tres alambres de conexión externa, uno es para la entrada de control, los dos restantes son para la alimentación.

La posición angular, se controla mediante una señal PWM aplicada en la entrada de control, a partir de esto se planea el hardware del elemento actuador. Que

consta de un teclado y un microcontrolador, de manera que con el teclado se puedan obtener diez posiciones fijas del servomotor.

Figura 22. Diseño electrónico del actuador



5. IDENTIFICACION DEL SISTEMA

Cuando se quiere controlar un sistema o automatizar un proceso, se hace necesario un modelo de planta, que caracterice su comportamiento, de manera que se pueda validar mediante simulación los parámetros del controlador.

5.1 TIPOS DE IDENTIFICACION DEL SISTEMA

La identificación de sistemas se puede clasificar en dos grandes grupos, el modelado de caja blanca y el modelado de caja negra.

5.1.1 MODELO DE CAJA BLANCA

Es una manera tradicional de identificar sistemas, y se refiere a un modelado físico del sistema, donde se recurre a un desarrollo analítico para describir el comportamiento dinámico de la planta, a partir de las leyes básicas de la física.

5.1.2 MODELO DE CAJA NEGRA

En oposición al modelo de caja blanca, este se basa en un desarrollo experimental y logra a partir de datos reales recogidos de la planta, un modelo de esta.

Existen varios métodos de identificación, basados en modelos de caja negra.

5.1.2.1 IDENTIFICACION MEDIANTE REDES NEURONALES

Las redes neuronales son aproximadores universales y eficientes, esta capacidad las convierte en una opción óptima cuando se quiere lograr una buena identificación de sistemas, y una estructura lineal no es suficiente.

5.1.2.1.1 RED NEURONAL










Las redes neuronales son modelos de aprendizaje, basados en sistemas nerviosos biológicos y se pueden representar de la siguiente manera:

$$a = f (w * p + b)$$

Donde a y p se refiere a la salida y a la entrada respectivamente, w y b son parámetros ajustables, y f es la función de activación de la red neuronal.

El objetivo de la función de activación es limitar el rango de la salida de la neurona.

Figura 23. Funciones de activación

Nombre	Relación Entrada /Salida	Icono	Función
Limitador Fuerte	$a = 0 \quad n < 0$ $a = 1 \quad n \geq 0$		<i>hardlim</i>
Limitador Fuerte Simétrico	$a = -1 \quad n < 0$ $a = +1 \quad n \geq 0$		<i>hardlims</i>
Lineal Positiva	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n$		<i>poslin</i>
Lineal	$a = n$		<i>purelin</i>
Lineal Saturado	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n \leq 1$ $a = 1 \quad n > 1$		<i>satlin</i>
Lineal Saturado Simétrico	$a = -1 \quad n < -1$ $a = n \quad -1 \leq n \leq 1$ $a = +1 \quad n > 1$		<i>satlins</i>
Sigmoidal Logarítmico	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$		<i>logsig</i>
Tangente Sigmoidal Hiperbólica	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		<i>tansig</i>
Competitiva	$a = 1 \quad \text{Neurona con } n \text{ max}$ $a = 0 \quad \text{El resto de neuronas}$		<i>compet</i>

Fuente: <http://ohm.utp.edu.co/neuronales>

La función de activación puede ser lineal o no lineal, estas se eligen de acuerdo al sistema, aunque muchas veces se hace por ensayo y error, también depende del algoritmo de aprendizaje de la red neuronal.

Uno de los algoritmos de aprendizaje más utilizado es el de levenberg marquardt debido a su velocidad de convergencia.

Después de definir la función de activación y el algoritmo de aprendizaje, se procede al entrenamiento de la red neuronal, donde los parámetros b y w , se

ajustan de forma dinámica mediante procesos iterativos, de manera que la red neuronal tenga un comportamiento deseado.

5.2 IDENTIFICACION DEL HORNO

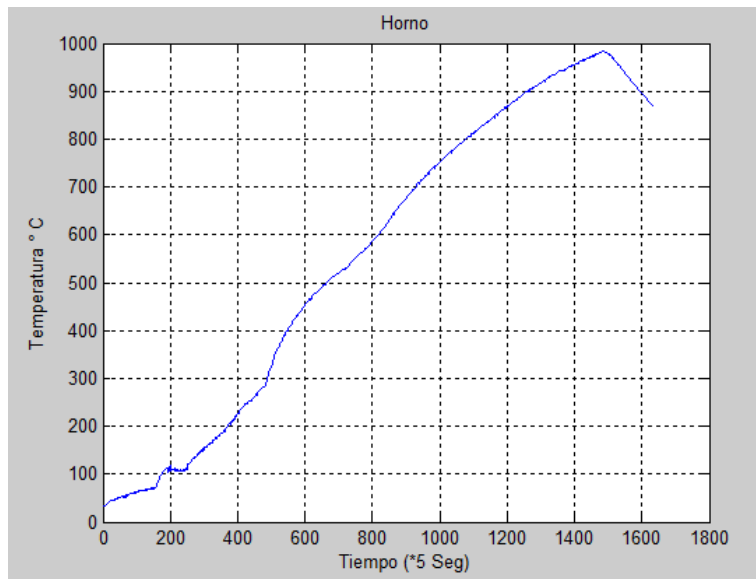
Para la identificación del horno, se optó por un modelado de caja negra, es así que teníamos que recoger una buena cantidad de datos de entrada y de salida del sistema.

Como entrada del sistema se registró los datos de apertura de la llave que suministra el gas a los quemadores del horno, estos fueron indicados por el elemento actuador, previamente diseñado.

Como salida del sistema se tomó la temperatura al interior del horno, que eran registradas en tiempo real, por el dispositivo medidor implementado, acompañado de un equipo de cómputo, que se encargaba de recibir los datos vía usb, a través del Hyperterminal.

Los datos se tomaron durante quemas reales del sistema, se tomaron datos cada 5 segundos, en un proceso que duró 2 horas, es decir registramos 1440 datos, teniendo como temperatura final 980 grados centígrados.

Figura 24. Datos para la identificación del sistema



En la anterior grafica se relaciona el comportamiento de la salida del sistema, donde se presentaron 5 cambios de graduación de la entrada.

5.2.1 ENTRENAMIENTO

Teniendo los valores de entrada y salida del sistema se dispone a entrenar la red neuronal, para ello utilizamos el programa matlab.

La totalidad de los datos se transpone y se divide en partes iguales, la primera mitad de ellos la utilizamos para la identificación, se establece un regresor, el cual indica la cantidad de entradas de la red neuronal y depende de los retardos a la entrada y la salida que se quieran emplear, es decir que tantos valores pasados de entrada y de salida vamos a emplear para la predicción de una salida presente.

Para el caso se utiliza dos retardos en la entrada y dos retardos en la salida, que prevé dos valores anteriores de entrada y salida, para generar una salida deseada actual.

Es necesario definir la cantidad de capas ocultas de la red neuronal, con el fin de no tener tanto gasto computacional, la red tendrá solo una capa oculta y la cantidad de neuronas en esta capa será de 8.

En total la red tendrá 3 capas, por ello necesita de dos funciones de activación, se opto por una función de activación lineal positiva para la capa oculta y una lineal para la salida.

Por último el encargado de generar los pesos y los bias de las neuronas, será el algoritmo de Levenberg Marquardt.

5.2.1.1 SCRIPT EN MATLAB PARA ENTRENAMIENTO

Se generan dos scripts en el primero esta todos los datos de entrada y salida del sistema.

El segundo script contiene todo el algoritmo de entrenamiento.

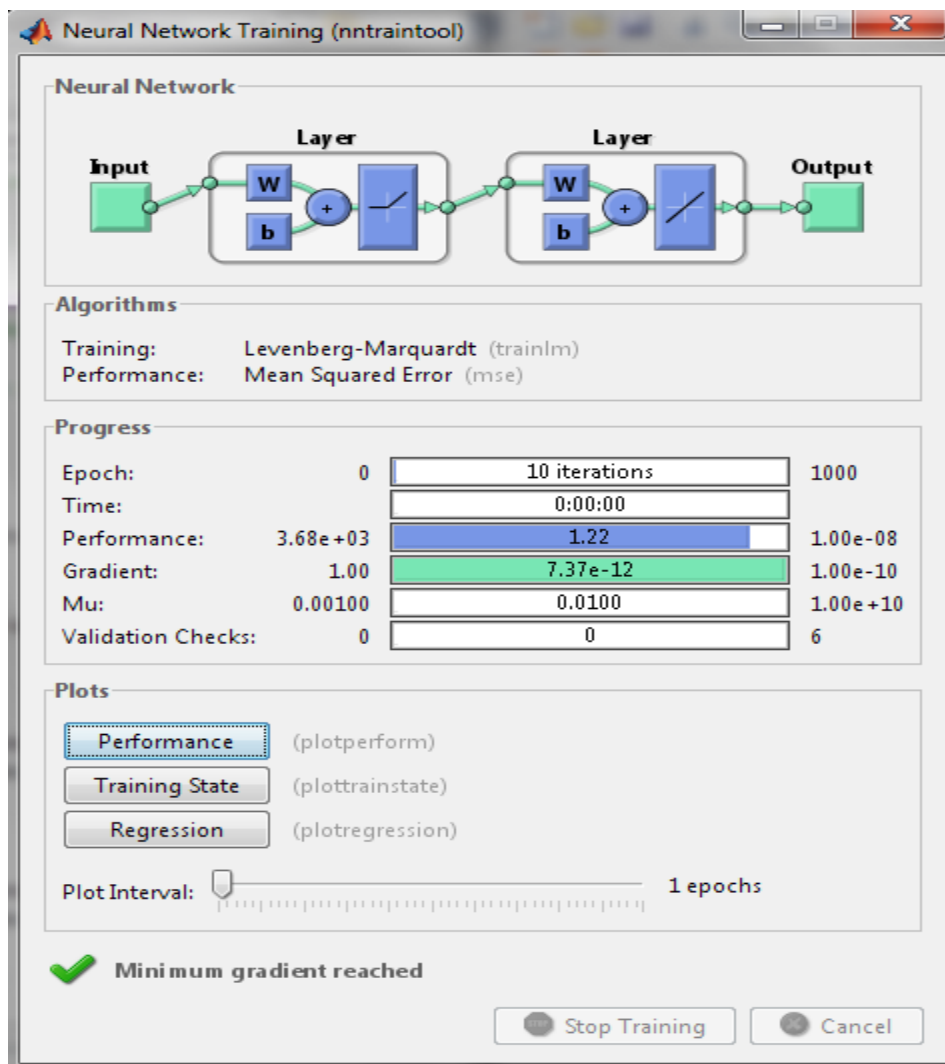
```
N = (length(IN)+1)/2;
ValIn=IN(N+1:end);
ValOut=OUT(N+1:end);
IN=IN(1:N);
OUT=OUT(1:N);
X = [OUT(2:N-1);OUT(1:N-2);IN(2:N-1);IN(1:N-2)];
```

```

Yd = [OUT(3:N)];
red = newff(minmax(X),[8 1],{'poslin','purelin'},'trainlm');
red.trainParam.show = 25;
red.trainParam.epochs = 1000;
red.trainParam.goal = 1e-8;
red = init(red);
[red,tr,Y,E]=train(red,X,Yd);

```

Figura 25. Entrenamiento de forma grafica



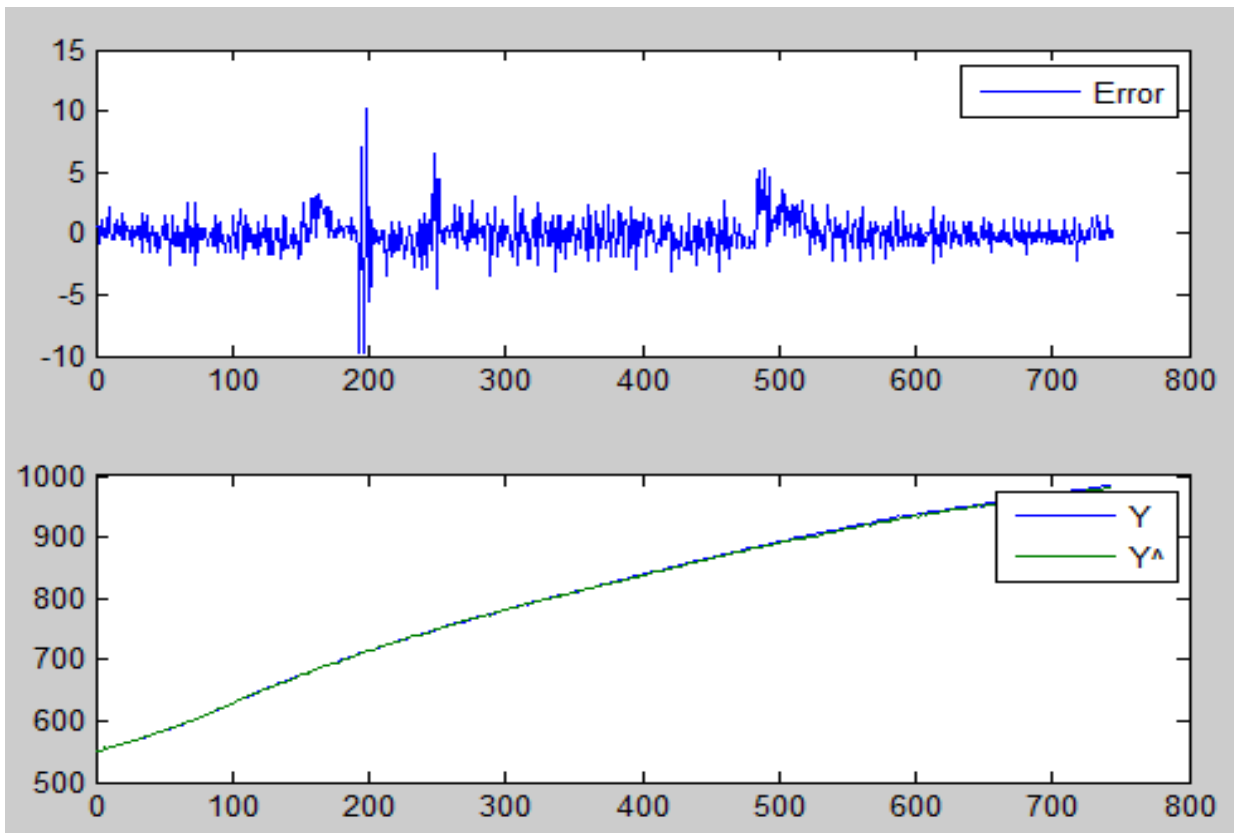
5.2.2 VALIDACIÓN

La segunda mitad de los datos se usa para la validación, es decir es una prueba para saber si nuestra red quedó entrenada de manera exitosa.

5.2.2.1 SCRIPT DE VALIDACIÓN

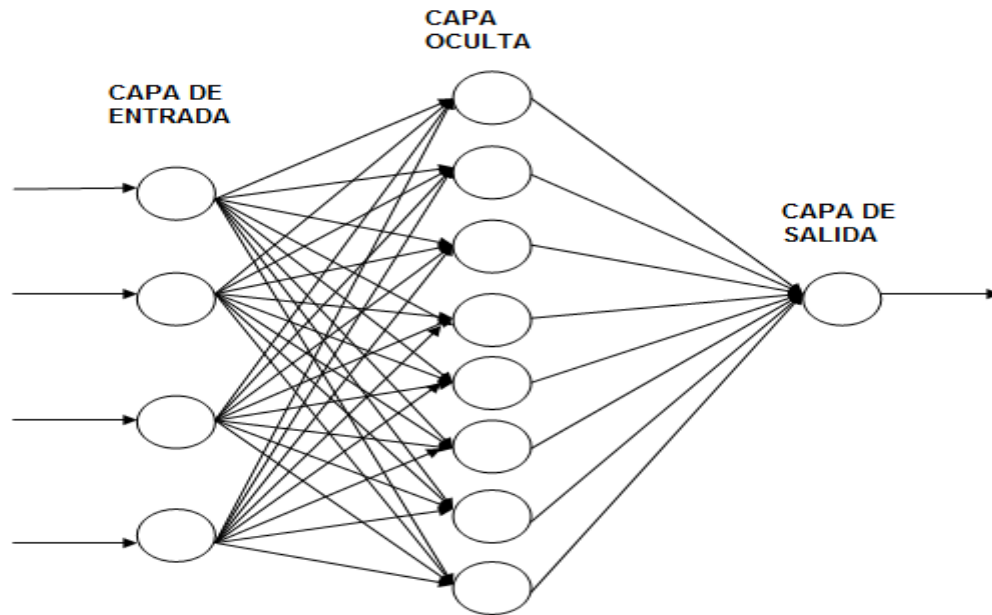
```
n=N-1;  
Xval=[ValOut(2:n-1);ValOut(1:n-2);ValIn(2:n-1);ValIn(1:n-2)];  
Yval=[ValOut(3:n); sim(red,Xval)];  
figure,  
subplot(2,1,1),plot(E),legend('Error'),  
subplot(2,1,2),plot(Yval'),legend('Y','Y^'),
```

Figura 26. Validación de la red



5.3 ARQUITECTURA DE LA RED NEURONAL

Figura 27. Arquitectura de la red neuronal



La red neuronal que me simula el sistema, cuenta con 8 neuronas en una sola capa oculta, los parámetros de la red neuronal que mejor se comportaron a la hora del entrenamiento, fueron los siguientes:

w1 =

0.5455	-0.3002	0.8898	-0.4802
-0.8291	0.0278	0.3817	0.4714
0.3594	-0.5524	-0.7228	-0.3000
0.3102	0.5025	-0.7014	-0.6068
-0.6748	-0.4898	-0.4850	-0.4978
-0.3921	0.1549	0.4017	0.6051
-0.0033	0.3982	-0.4914	-0.0534
1.0027	0.8081	0.5672	-0.2087

w2 =

-0.1400	-0.7280	-0.8921	0.0616	0.5583	0.5611	-0.7402	0.3221
---------	---------	---------	--------	--------	--------	---------	--------

b1 =

0.6715
0.0556
0.0994
0.8344
-0.4283
0.6251
0.5075
-0.2131

b2 =

0.0820

6. CONTROL

El control automático es en la actualidad parte importante de los procesos industriales y de manufactura. En las industrias es esencial el control de presión, temperatura, humedad y flujo en sus procesos.

6.1 TIPOS DE CONTROL

Los sistemas de control, se pueden clasificar en clásicos o modernos dependiendo de su estructura, o en análogos, digitales o mixtos, según su naturaleza.

6.1.1 CONTROL ON-OFF

Es la forma más simple de controlar, también se conoce como control de dos posiciones, debido a que el elemento actuador solo tiene dos posiciones fijas, que generalmente son de encendido y apagado.

La acción de este tipo de controlador depende de un rango en el que debe moverse la señal de error antes de que ocurra la conmutación. A dicho rango se le conoce como brecha diferencial, lo que indica que entre menor sea esta, la respuesta del sistema mejora sustancialmente, pero se debe tener en cuenta que para que esto suceda, la cantidad de conmutaciones, se incrementaría, lo que conllevaría a un mayor desgaste en el actuador.

Este tipo de control es comúnmente utilizado debido a que es relativamente simple y barato.

6.1.2 CONTROL PROPORCIONAL

Este tipo de control consiste en darle una ganancia al sistema, de manera que el cambio en la señal de entrada afecta directamente la salida. En esencia es un amplificador con ganancia ajustable.

6.1.2 CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO

Se suele conocer como control de velocidad, y entre sus ventajas encontramos que se reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización, por lo tanto, mejora la respuesta del sistema, aunque entre sus complicaciones, se encuentra el hecho

de que puede amplificar las señales de ruido, provocando efectos de saturación en el actuador.

6.1.3 CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL

Se caracteriza porque decrementa el tiempo de subida y tiene la capacidad de eliminar el error de estado estable, pero sus principales desventajas son el incremento del sobre impulso, y el tiempo de estabilización, además de que se debe tener en cuenta que esto se reflejara en que la respuesta transiente no es la mejor.

6.1.4 CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

Es la combinación de los tres efectos y por ello tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales, logrando una mayor exactitud y poder ser empleado en aplicaciones más cruciales.

6.2 DISEÑO DE UN CONTROLADOR PI DIGITAL PARA LA PLANTA

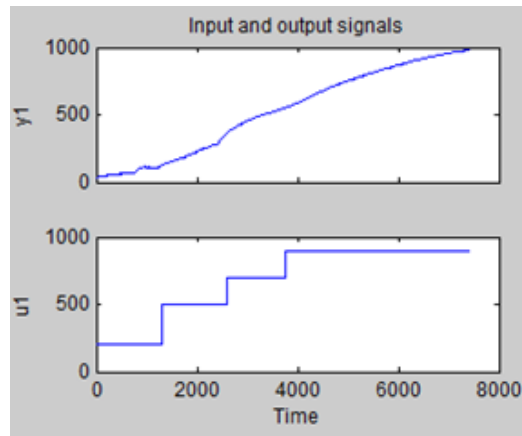
Se elige un control proporcional integral, pero primero hallamos la función de transferencia de la planta.

6.2.1 FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA

Para hallar la función de transferencia de la planta, utilizamos una herramienta del programa Matlab, que consiste en una herramienta guide, que se denomina system identification y que se invoca mediante la palabra ident.

Esta herramienta calcula funciones de transferencia a partir de entradas y salidas reales del sistema. Para este caso se importan los datos y se elige una aproximación a una planta de primer orden.

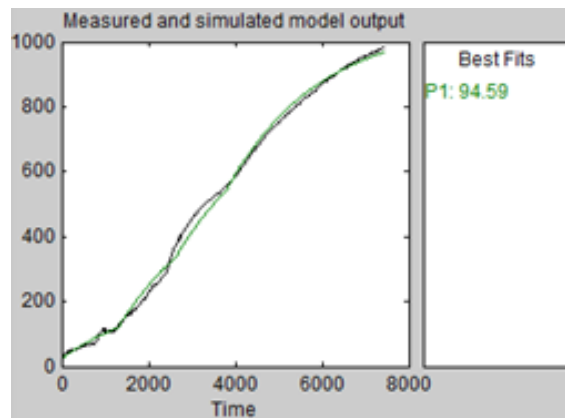
Figura 28. Entradas y salidas del sistema



La función de transferencia entregada por la herramienta GUIDE, es la siguiente:

$$G_P(S) = \frac{1.1871}{1 + 2196.9 * S}$$

Figura 29. Validación de la función de transferencia



6.2.2 CONTROLADOR PI DIGITAL

El controlador a diseñar es un tipo PI, con los siguientes criterios:

$$\zeta = 0.5$$

Numero de muestras por ciclo=10

$$T=1\text{seg}$$

Para ello partimos de la función de transferencia de la planta

$$G_P(S) = \frac{1.1871}{1 + 2196.9 * S}$$

La función de transferencia pulso de La planta por un retenedor de orden cero es:

$$G_P(Z) = \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \frac{0.00054035}{S + 0.0004552} \right]$$

$$G_P(Z) = \frac{0.0026987}{Z - 0.9977}$$

El controlador digital PI tiene la siguiente función de transferencia pulso:

$$G_D(Z) = K_P + K_I \frac{1}{1 - Z^{-1}}$$

$$G_D(Z) = (K_P + K_I) \frac{Z - \frac{K_P}{K_P + K_I}}{Z - 1}$$

La función de transferencia pulso en lazo abierto se convierte en

$$G_D(Z)G_P(Z) = (K_P + K_I) \frac{Z - \frac{K_P}{K_P + K_I}}{Z - 1} \frac{0.0026987}{Z - 0.9977}$$

Dado que se requiere tener 10 muestras por ciclo de la oscilación senoidal amortiguada, el polo dominante en lazo cerrado en la parte superior del plano z debe presentarse sobre una línea desde el origen con un ángulo de $360^\circ/10=36^\circ$.

Partimos de las siguientes condiciones

$$|Z| = \exp\left(-\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\xi^2}} \frac{w_d}{w_s}\right)$$

$$\angle z = 2\pi \frac{w_d}{w_s}$$

La localización deseada del polo en lazo cerrado puede determinarse como sigue: al notar que $\angle Z=36^\circ$, tenemos

$$2\pi \frac{w_d}{w_s} = \frac{2\pi}{10}$$

Es decir $w_d/w_s=0.1$. Dado que $\zeta = 0.5$, tenemos

$$|Z| = \exp\left(-\frac{2\pi * 0.5}{\sqrt{1-0.5^2}} \frac{1}{10}\right)$$

$$|Z| = e^{-0.3628}$$

$$|Z| = 0.6958$$

$$Z = 0.6958 \angle 36^\circ$$

$$Z = 0.5629 + j0.4090$$

Note que este punto de intersección del lugar geométrico de $\zeta = 0.5$ y la línea desde el origen que tiene un ángulo de 36° .

$$\tan\vartheta_1 = \frac{0.4090}{0.9211 - 0.5629}$$

Entonces

$$\vartheta_1 = 48.78$$

Y

$$\alpha_1 = 180 - \vartheta_1 = 131.21$$

Además

$$\tan\vartheta_2 = \frac{0.4090}{1 - 0.5629}$$

Entonces

$$\vartheta_2 = 43.09$$

Y

$$\alpha_2 = 180 - \vartheta_2 = 136.90$$

Si el punto debe ser una localización de polo en lazo cerrado en la parte superior del plano z , entonces la deficiencia angular en el punto p es:

$$-131.21 - 136.9 + 180 = -88.11$$

El cero debe contribuir con $+88.11$. Esto significa que el cero del controlador digital deberá colocarse en $z=0.549$. Por lo tanto,

$$\frac{K_p}{K_p + K_I} = 0.549 \quad (1)$$

De ahí el controlador PI queda determinado como sigue:

$$G_D(Z) = k \frac{Z - 0.549}{Z - 1}$$

Donde $k = K_p + K_I$, la constante de ganancia k se determina a partir de la condición de magnitud:

$$k \left| \frac{Z - 0.549}{Z - 1} \frac{0.00091009}{Z - 0.9211} \right|_{Z=0.5629+j0.4090} = 1$$

$$k = 910$$

Por lo tanto

$$K_p + K_I = 910 \quad (2)$$

De (1) y (2) obtenemos

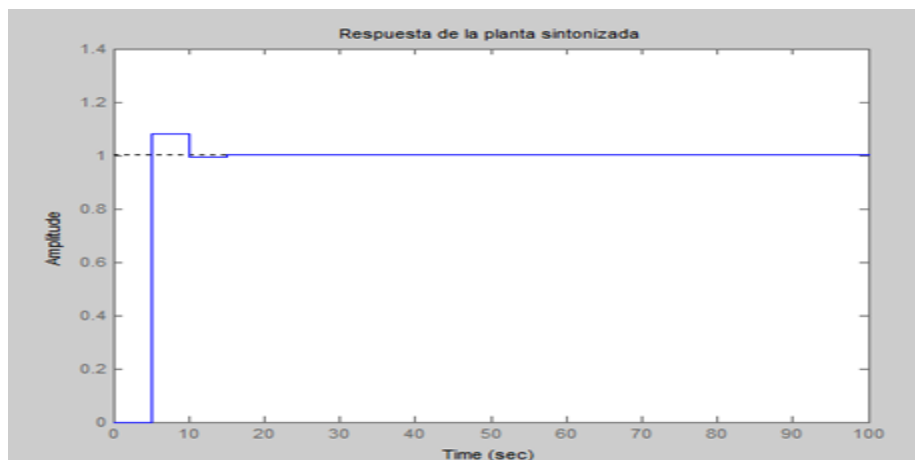
$$K_p = 500$$

$$K_i = 410$$

Y, por lo tanto, el controlador PI que acabamos de diseñar puede estar dado por

$$G_D(Z) = 910 \frac{Z - 0.549}{Z - 1}$$

Figura 30. Respuesta de la planta con el controlador



7. HARDWARE DISPOSITIVO FINAL

El hardware del dispositivo final, contiene varios módulos.

Figura 31. Diagrama de bloques del dispositivo final

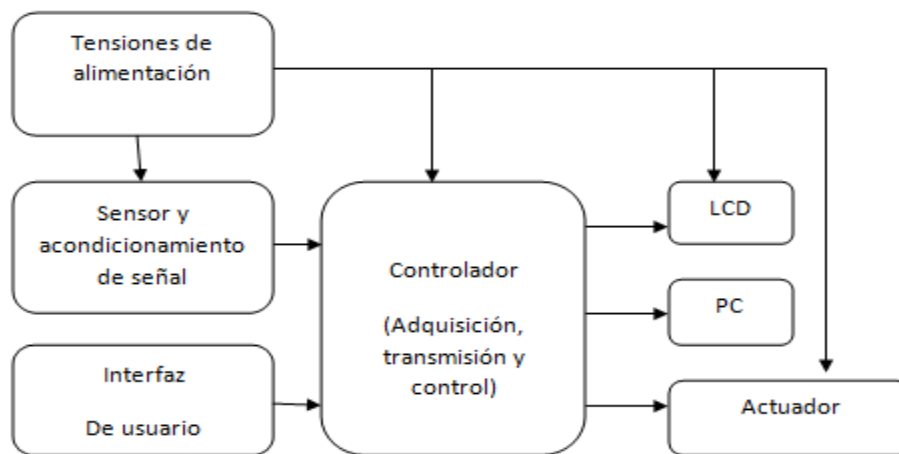


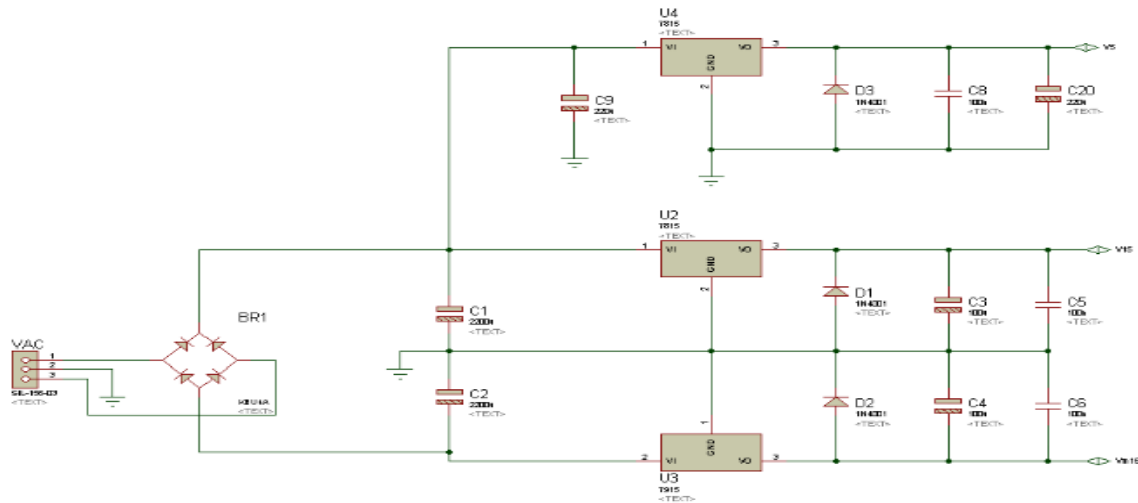
Figura 32. Forma física del dispositivo final



7.1 TENSIONES DE ALIMENTACION

La alimentación del sistema es entregada por un circuito que genera las tensiones que son necesarias para el correcto funcionamiento del sistema.

Figura 33. Alimentación del sistema



El circuito está formado por un transformador que se encarga de reducir la tensión de la línea de entrada a tensiones de 9 VAC. En el esquemático el conector VAC, donde se conectan las tres líneas del secundario del transformador.

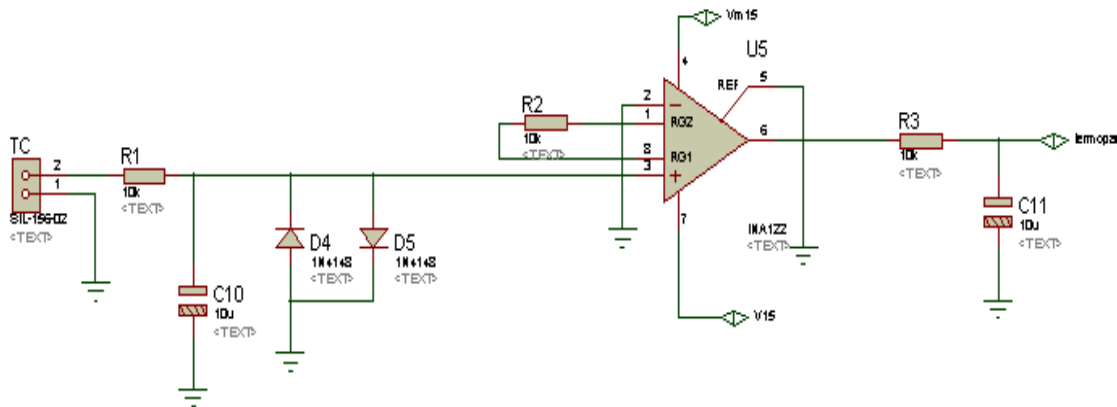
El puente rectificador convierte el voltaje de corriente alterna en continua, que después es filtrada por los condensadores C1, C2 y C9.

Los reguladores, nos entregan las tensiones continuas que alimentarán el resto del sistema.

Los diodos son protección para los reguladores, debido a que impiden tensiones de signo contrario a su salida.

7.2 ENTRADA TERMOPAR Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

Figura 34. Acondicionamiento del termopar



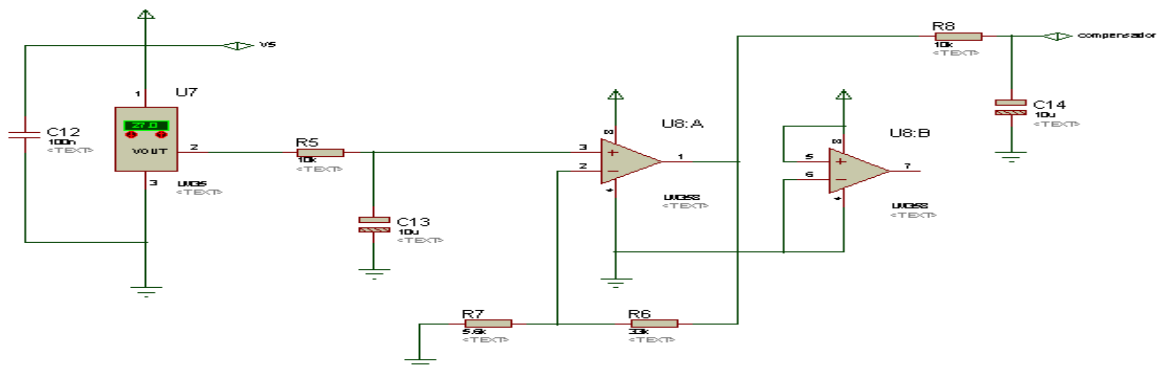
El conector TC recibe la señal del termopar, esta señal pasa por un circuito formado por R1 y C10, que se comportan como un filtro pasa bajo.

El amplificador de instrumentación INA128, se encarga de recibir la señal de baja tensión entregada por el termopar y amplificarla a un nivel apropiado, para la correcta lectura del convertor analógico – digital.

La red formada por R3 y C11, también se comporta como un filtro pasa bajo, que recibe la señal del amplificador y la entrega al microprocesador.

7.3 COMPENSADOR

Figura 35. Circuito compensador



El sensor LM35, entrega una señal correspondiente a la temperatura de la junta fría del termopar, dicha señal a pesar de no ser tan débil, se eleva utilizando un amplificador operacional.

7.4 ENCENDIDO AUTOMÁTICO

El encendido automático se realiza con una bujía para encendido de horno, la cual cuenta con entrada AC, que puede ser de 110 o 220 voltios.

Como el horno cuenta con 4 quemadores, fue necesario conseguir una bujía con 4 salidas, a cada una de ellas se conecta un cable siliconado, que soporta temperaturas superiores a un cable normal, el extremo de este cable se encuentra unido con una barra de acero, esta unión está recubierta por un aislante tipo losa, y la barra de acero esta doblada en un arco.

Figura 36. Quemador



Figura 37. Encendido automático



El funcionamiento de este es relativamente sencillo, se coloca un interruptor de disparo en uno de los cables que se conecta a la red, de manera que cuando se oprima, se genere la chispa, que encienda los quemadores.

Debido al diseño de los quemadores, la chispa generada no se estaba creando, donde había paso de gas, entonces fue necesario recubrir la losa del cable, por un revestimiento de cerámica, que fuera por supuesto más ancho y de mayor extensión, de manera que la chispa se creara al interior del quemador.

7.5 CONTROLADOR

El cerebro del sistema es un microcontrolador, que tiene a su cargo la recepción de las variables entregadas por el acondicionamiento del termopar y el compensador, a partir de esto transmite el valor de la temperatura a una lcd en el dispositivo, además de contar con la opción de transmitir el dato a un ordenador.

El controlador genera las órdenes al actuador, las cuales son señales codificadas, para que se realice el cambio en el flujo de entrada de gas al horno.

El sistema cuenta con cuatro algoritmos de quema, que fueron grabados en el microcontrolador, de manera que se realicen las quemas de manera automática, aunque se hizo el diseño del controlador, este no se implementó debido a que las quemas a las que se somete el horno, no necesitan de lograr altas temperaturas en el menor tiempo posible, si no un crecimiento gradual y uniforme de la temperatura, debido al cambio en la entrada de gas.

Además si se quiere utilizar el sistema para una quema diferente a las programadas, existe la opción de manejar u operar la válvula manualmente, es decir que se pueda controlar su apertura por medio del teclado del dispositivo.

7. 1 Quemadas programadas

Los algoritmos de quema se diseñaron a partir de datos suministrados por el operador del horno y experiencias en las pruebas que se realizaron.

Dichos algoritmos dependen de las variables de entrada y salida del sistema, es decir de la cantidad de flujo de gas y del nivel de temperatura, teniendo en cuenta a su vez la variable tiempo.

Estos valores se optimizaron y se explican a continuación, mediante las diferentes tablas.

Tabla 1. Bizcochado arcilla blanca

Tiempo (Minutos)	Apertura	Temperatura (°C)
0	1	Ambiente
15	2	150
30	3	300
45	4	450
120	0	950

Tabla 2. Bizcochado arcilla roja

Tiempo (Minutos)	Apertura	Temperatura (°C)
0	1	Ambiente
30	2	200
50	3	300
70	4	450
120	0	950

Tabla 3. Esmaltado

Tiempo (Minutos)	Apertura	Temperatura (°C)
0	1	Ambiente
10	2	150
20	3	300
30	5	450
180	0	1120

Tabla 4. Vitrofundición

Tiempo (Minutos)	Apertura	Temperatura (°C)
0	1	Ambiente
15	2	150
30	3	300
45	4	450
180	0	950

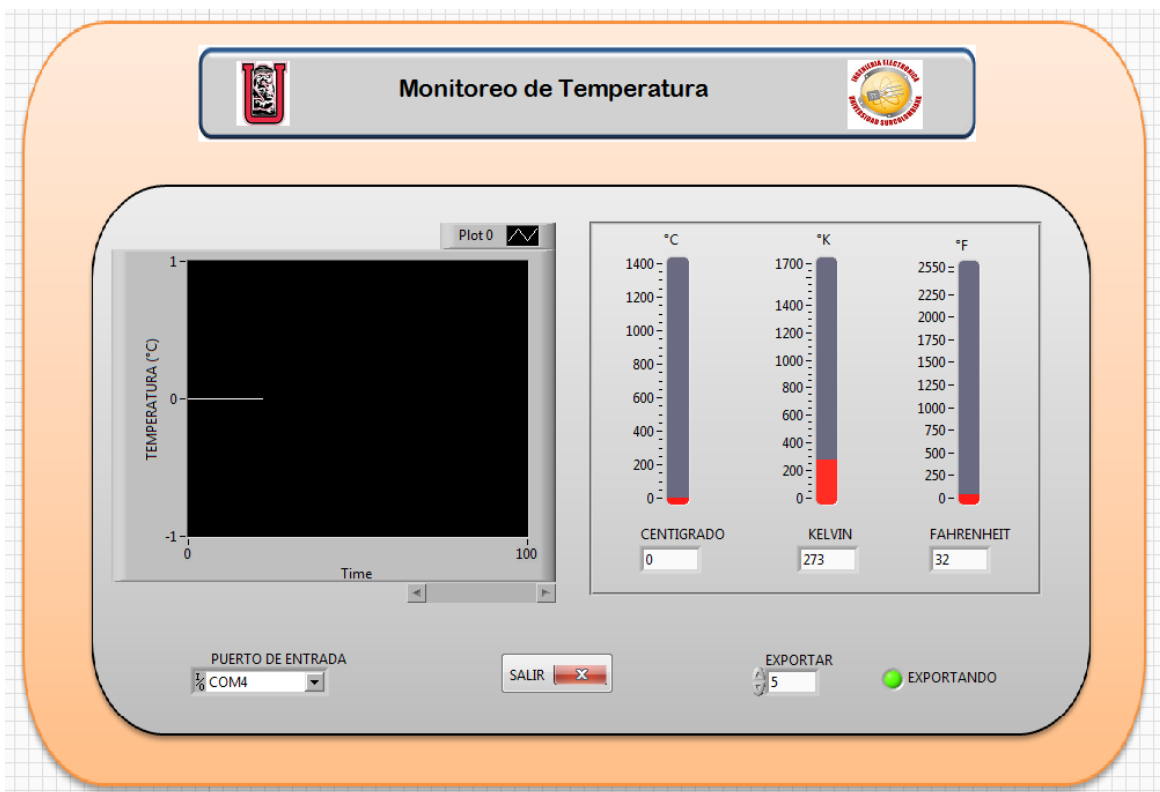
8. SOFTWARE DE MONITOREO

El software de monitoreo del sistema se realizó en el programa labview, cuenta con una pantalla, tipo osciloscopio que muestra gráficamente el valor de la temperatura con respecto al tiempo.

Además cuenta con tres termómetros que muestran de manera grafica la temperatura en diferentes sistemas de unidades, como son los grados Celsius, Kelvin, y Fahrenheit.

El sistema envía la información de temperatura en tiempo real, por medio de un puerto usb, teniendo en cuenta esto, el software elige el puerto de entrada, donde se conecta el sistema.

Figura 38. Software de monitoreo de temperatura



9. CONCLUSIONES

Los termopares poseen desventajas como la compensación de unión fría y la relación no lineal entre la temperatura y la energía generada, pero su amplio rango en la medida de temperatura, hace que su uso sea muy generalizado.

Debido a las características de los amplificadores de instrumentación de bajo ruido, fue posible proporcionar una medida confiable de temperatura.

La construcción de una electroválvula proporcional utilizando un servomotor, fue de mucha utilidad debido a la alta precisión de posicionado, fuerza y velocidad de respuesta, además de ser una solución de bajo costo para la regulación de la cantidad de flujo de entrada de gas hacia el horno.

Los sistemas de temperatura, se caracterizan por ser extremadamente lentos, lo cual se pudo notar al validar la planta como un sistema de primer orden, y aunque esto se conoció en la identificación, y no se implementó el posterior control, si fue de gran uso, cuando se procedió a diseñar los distintos algoritmos de quema, debido a que se optimizaron los niveles de temperatura a determinado tiempo, logrando así quemas efectivas y buena calidad en el producto finalizado.

10. RECOMENDACIONES

El software de monitoreo de temperatura del sistema, se realizó en el programa LabView, el cual hace parte de la compañía National Instruments, por lo que se presentaría inconvenientes con las licencias de Copyright, en el caso de comercializar este producto, por eso se recomienda usar un software libre para la creación y desarrollo del monitoreo mediante un ordenador.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sole, Antonio Creus. *Instrumentacion Industrial*. España: Marcombo S.A, 2005.
- [2] Ogata, Katsuhiko. *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana S.A, 1996.
- [3] WqyHuang, Han. *PIC Microcontroller: An Introduction to Software and Hardware Interfacing*. United States of America: Thompson, 2005.

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Regulador 7805

Electrical Characteristics (KA7805A)

(Refer to the test circuits. $0^{\circ}\text{C} < T_J < +125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 1\text{A}$, $V_I = 10\text{V}$, $C_I = 0.33\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\mu\text{F}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	4.9	5	5.1	V
		$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 7.5\text{V to } 20\text{V}$	4.8	5	5.2	
Line Regulation (Note1)	Regline	$V_I = 7.5\text{V to } 25\text{V}$ $I_O = 500\text{mA}$	-	5	50	mV
		$V_I = 8\text{V to } 12\text{V}$	-	3	50	
		$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 7.3\text{V to } 20\text{V}$	-	5	
		$V_I = 8\text{V to } 12\text{V}$	-	1.5	25	
Load Regulation (Note1)	Regload	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$ $I_O = 5\text{mA to } 1.5\text{A}$	-	9	100	mV
		$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$	-	9	100	
		$I_O = 250\text{mA to } 750\text{mA}$	-	4	50	
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	5.0	6.0	mA
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$	-	-	0.5	mA
		$V_I = 8\text{V to } 25\text{V}$, $I_O = 500\text{mA}$	-	-	0.8	
		$V_I = 7.5\text{V to } 20\text{V}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	-	0.8	
Output Voltage Drift	$\Delta V/\Delta T$	$I_O = 5\text{mA}$	-	-0.8	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10\text{Hz to } 100\text{KHz}$ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	10	-	$\mu\text{V}/V_O$
Ripple Rejection	RR	$f = 120\text{Hz}$, $I_O = 500\text{mA}$ $V_I = 8\text{V to } 18\text{V}$	-	68	-	dB
Dropout Voltage	V_{Drop}	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2	-	V
Output Resistance	r_O	$f = 1\text{KHz}$	-	17	-	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35\text{V}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	250	-	mA
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2.2	-	A

ANEXO B. Regulador 7905

Electrical Characteristics (KA7805A)

(Refer to the test circuits. $0^{\circ}\text{C} < T_J < +125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 1\text{A}$, $V_I = 10\text{V}$, $C_I = 0.33\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\mu\text{F}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	4.9	5	5.1	V	
		$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 7.5\text{V to } 20\text{V}$	4.8	5	5.2		
Line Regulation (Note1)	Regline	$V_I = 7.5\text{V to } 25\text{V}$ $I_O = 500\text{mA}$	-	5	50	mV	
		$V_I = 8\text{V to } 12\text{V}$	-	3	50		
		$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 7.3\text{V to } 20\text{V}$	-	5		50
			$V_I = 8\text{V to } 12\text{V}$	-	1.5		25
Load Regulation (Note1)	Regload	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$ $I_O = 5\text{mA to } 1.5\text{A}$	-	9	100	mV	
		$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$	-	9	100		
		$I_O = 250\text{mA to } 750\text{mA}$	-	4	50		
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	5.0	6.0	mA	
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$	-	-	0.5	mA	
		$V_I = 8\text{V to } 25\text{V}$, $I_O = 500\text{mA}$	-	-	0.8		
		$V_I = 7.5\text{V to } 20\text{V}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	-	0.8		
Output Voltage Drift	$\Delta V/\Delta T$	$I_O = 5\text{mA}$	-	-0.8	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$	
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10\text{Hz to } 100\text{KHz}$ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	10	-	$\mu\text{V}/V_O$	
Ripple Rejection	RR	$f = 120\text{Hz}$, $I_O = 500\text{mA}$ $V_I = 8\text{V to } 18\text{V}$	-	68	-	dB	
Dropout Voltage	V_{Drop}	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2	-	V	
Output Resistance	r_O	$f = 1\text{KHz}$	-	17	-	m Ω	
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35\text{V}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	250	-	mA	
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2.2	-	A	

ANEXO C. Puente rectificador KBU1010



KBU1000 – KBU1010

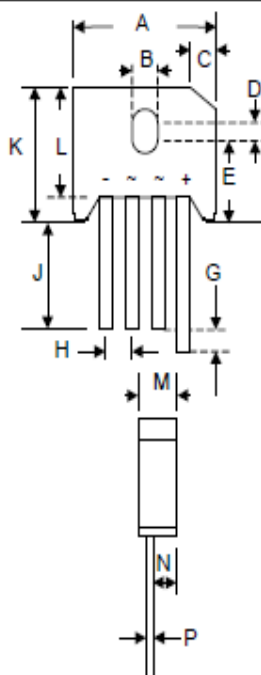
10A BRIDGE RECTIFIER

Features

- Diffused Junction
- Low Forward Voltage Drop
- High Current Capability
- High Reliability
- High Surge Current Capability
- Ideal for Printed Circuit Boards

Mechanical Data

- Case: Molded Plastic
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: As Marked on Body
- Weight: 8.0 grams (approx.)
- Mounting Position: Any
- Marking: Type Number



KBU		
Dim	Min	Max
A	22.70	23.70
B	3.80	4.10
C	4.20	4.70
D	1.70	2.20
E	10.30	11.30
G	4.50	6.80
H	4.60	5.60
J	25.40	—
K	—	19.30
L	16.80	17.80
M	6.60	7.10
N	4.70	5.20
P	1.20	1.30
All Dimensions in mm		

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @T_A=25°C unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.

For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristic	Symbol	KBU 1000	KBU 1001	KBU 1002	KBU 1004	KBU 1006	KBU 1008	KBU 1010	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V _{RRM} V _{RWM} V _R	50	100	200	400	600	800	1000	V
RMS Reverse Voltage	V _{R(RMS)}	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current @T _C = 100°C	I _O	10							A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	I _{FSM}	300							A
Forward Voltage (per element) @I _F = 5.0A	V _{FM}	1.0							V
Peak Reverse Current @T _C = 25°C At Rated DC Blocking Voltage @T _C = 100°C	I _R	10 1.0							μA mA
Rating for Fusing (t < 8.3ms) (Note 1)	I ² t	373							A ² s
Typical Thermal Resistance (Note 2)	R _{θJC}	8.0							K/W
Operating and Storage Temperature Range	T _J , T _{STG}	-65 to +150							°C

Note: 1. Non-repetitive for t > 1ms and < 8.3ms.

2. Thermal resistance junction to case per element mounted on PC board with 13.0x13.0x0.03mm thick land areas.

ANEXO D. Tablas normalizada termocupla tipo K

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.376	8.416	8.456	8.497
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898
220	8.938	8.978	9.018	9.058	9.099	9.139	9.179	9.220	9.260	9.300
230	9.341	9.381	9.421	9.462	9.502	9.543	9.583	9.624	9.664	9.705
240	9.745	9.786	9.826	9.867	9.907	9.948	9.989	10.029	10.070	10.111
250	10.151	10.192	10.233	10.274	10.315	10.355	10.396	10.437	10.478	10.519
260	10.560	10.600	10.641	10.682	10.723	10.764	10.805	10.846	10.887	10.928
270	10.969	11.010	11.051	11.093	11.134	11.175	11.216	11.257	11.298	11.339
280	11.381	11.422	11.463	11.504	11.546	11.587	11.628	11.669	11.711	11.752
290	11.793	11.835	11.876	11.918	11.959	12.000	12.042	12.083	12.125	12.166
300	12.207	12.249	12.290	12.332	12.373	12.415	12.456	12.498	12.539	12.581
310	12.623	12.664	12.706	12.747	12.789	12.831	12.872	12.914	12.955	12.997
320	13.039	13.080	13.122	13.164	13.205	13.247	13.289	13.331	13.372	13.414
330	13.456	13.497	13.539	13.581	13.623	13.665	13.706	13.748	13.790	13.832
340	13.874	13.915	13.957	13.999	14.041	14.083	14.125	14.167	14.208	14.250
350	14.292	14.334	14.376	14.418	14.460	14.502	14.544	14.586	14.628	14.670

360	14.712	14.754	14.796	14.838	14.880	14.922	14.964	15.006	15.048	15.090
370	15.132	15.174	15.216	15.258	15.300	15.342	15.384	15.426	15.468	15.510
380	15.552	15.594	15.636	15.679	15.721	15.763	15.805	15.847	15.889	15.931
390	15.974	16.016	16.058	16.100	16.142	16.184	16.227	16.269	16.311	16.353
400	16.395	16.438	16.480	16.522	16.564	16.607	16.649	16.691	16.733	16.776
410	16.818	16.860	16.902	16.945	16.987	17.029	17.072	17.114	17.156	17.199
420	17.241	17.283	17.326	17.368	17.410	17.453	17.495	17.537	17.580	17.622
430	17.664	17.707	17.749	17.792	17.834	17.876	17.919	17.961	18.004	18.046
440	18.088	18.131	18.173	18.216	18.258	18.301	18.343	18.385	18.428	18.470
450	18.513	18.555	18.598	18.640	18.683	18.725	18.768	18.810	18.853	18.895
460	18.938	18.980	19.023	19.065	19.108	19.150	19.193	19.235	19.278	19.320
470	19.363	19.405	19.448	19.490	19.533	19.576	19.618	19.661	19.703	19.746
480	19.788	19.831	19.873	19.916	19.959	20.001	20.044	20.086	20.129	20.172
490	20.214	20.257	20.299	20.342	20.385	20.427	20.470	20.512	20.555	20.598
500	20.640	20.683	20.725	20.768	20.811	20.853	20.896	20.938	20.981	21.024
510	21.066	21.109	21.152	21.194	21.237	21.280	21.322	21.365	21.407	21.450
520	21.493	21.535	21.578	21.621	21.663	21.706	21.749	21.791	21.834	21.876
530	21.919	21.962	22.004	22.047	22.090	22.132	22.175	22.218	22.260	22.303
540	22.346	22.388	22.431	22.473	22.516	22.559	22.601	22.644	22.687	22.729
550	22.772	22.815	22.857	22.900	22.942	22.985	23.028	23.070	23.113	23.156
560	23.198	23.241	23.284	23.326	23.369	23.411	23.454	23.497	23.539	23.582
570	23.624	23.667	23.710	23.752	23.795	23.837	23.880	23.923	23.965	24.008
580	24.050	24.093	24.136	24.178	24.221	24.263	24.306	24.348	24.391	24.434
590	24.476	24.519	24.561	24.604	24.646	24.689	24.731	24.774	24.817	24.859
600	24.902	24.944	24.987	25.029	25.072	25.114	25.157	25.199	25.242	25.284
610	25.327	25.369	25.412	25.454	25.497	25.539	25.582	25.624	25.666	25.709
620	25.751	25.794	25.836	25.879	25.921	25.964	26.006	26.048	26.091	26.133
630	26.176	26.218	26.260	26.303	26.345	26.387	26.430	26.472	26.515	26.557
640	26.599	26.642	26.684	26.726	26.769	26.811	26.853	26.896	26.938	26.980
650	27.022	27.065	27.107	27.149	27.192	27.234	27.276	27.318	27.361	27.403
660	27.445	27.487	27.529	27.572	27.614	27.656	27.698	27.740	27.783	27.825
670	27.867	27.909	27.951	27.993	28.035	28.078	28.120	28.162	28.204	28.246
680	28.288	28.330	28.372	28.414	28.456	28.498	28.540	28.583	28.625	28.667
690	28.709	28.751	28.793	28.835	28.877	28.919	28.961	29.002	29.044	29.086
700	29.128	29.170	29.212	29.254	29.296	29.338	29.380	29.422	29.464	29.505

710	29.547	29.589	29.631	29.673	29.715	29.756	29.798	29.840	29.882	29.924
720	29.965	30.007	30.049	30.091	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341
730	30.383	30.424	30.466	30.508	30.549	30.591	30.632	30.674	30.716	30.757
740	30.799	30.840	30.882	30.924	30.965	31.007	31.048	31.090	31.131	31.173
750	31.214	31.256	31.297	31.339	31.380	31.422	31.463	31.504	31.546	31.587
760	31.629	31.670	31.712	31.753	31.794	31.836	31.877	31.918	31.960	32.001
770	32.042	32.084	32.125	32.166	32.207	32.249	32.290	32.331	32.372	32.414
780	32.455	32.496	32.537	32.578	32.619	32.661	32.702	32.743	32.784	32.825
790	32.866	32.907	32.948	32.990	33.031	33.072	33.113	33.154	33.195	33.236
800	33.277	33.318	33.359	33.400	33.441	33.482	33.523	33.564	33.604	33.645
810	33.686	33.727	33.768	33.809	33.850	33.891	33.931	33.972	34.013	34.054
820	34.095	34.136	34.176	34.217	34.258	34.299	34.339	34.380	34.421	34.461
830	34.502	34.543	34.583	34.624	34.665	34.705	34.746	34.787	34.827	34.868
840	34.909	34.949	34.990	35.030	35.071	35.111	35.152	35.192	35.233	35.273
850	35.314	35.354	35.395	35.435	35.476	35.516	35.557	35.597	35.637	35.678
860	35.718	35.758	35.799	35.839	35.880	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.483
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.684	36.724	36.764	36.804	36.844	36.885
890	36.925	36.965	37.005	37.045	37.085	37.125	37.165	37.205	37.245	37.285
900	37.325	37.365	37.405	37.445	37.484	37.524	37.564	37.604	37.644	37.684
910	37.724	37.764	37.803	37.843	37.883	37.923	37.963	38.002	38.042	38.082
920	38.122	38.162	38.201	38.241	38.281	38.320	38.360	38.400	38.439	38.479
930	38.519	38.558	38.598	38.638	38.677	38.717	38.756	38.796	38.836	38.875
940	38.915	38.954	38.994	39.033	39.073	39.112	39.152	39.191	39.231	39.270
950	39.310	39.349	39.388	39.428	39.467	39.507	39.546	39.585	39.625	39.664
960	39.703	39.743	39.782	39.821	39.861	39.900	39.939	39.979	40.018	40.057
970	40.096	40.136	40.175	40.214	40.253	40.292	40.332	40.371	40.410	40.449
980	40.488	40.527	40.566	40.605	40.645	40.684	40.723	40.762	40.801	40.840
990	40.879	40.918	40.957	40.996	41.035	41.074	41.113	41.152	41.191	41.230
1000	41.269	41.308	41.347	41.385	41.424	41.463	41.502	41.541	41.580	41.619
1010	41.657	41.696	41.735	41.774	41.813	41.851	41.890	41.929	41.968	42.006
1020	42.045	42.084	42.123	42.161	42.200	42.239	42.277	42.316	42.355	42.393
1030	42.432	42.470	42.509	42.548	42.586	42.625	42.663	42.702	42.740	42.779
1040	42.817	42.856	42.894	42.933	42.971	43.010	43.048	43.087	43.125	43.164
1050	43.202	43.240	43.279	43.317	43.356	43.394	43.432	43.471	43.509	43.547

1060	43.585	43.624	43.662	43.700	43.739	43.777	43.815	43.853	43.891	43.930
1070	43.968	44.006	44.044	44.082	44.121	44.159	44.197	44.235	44.273	44.311
1080	44.349	44.387	44.425	44.463	44.501	44.539	44.577	44.615	44.653	44.691
1090	44.729	44.767	44.805	44.843	44.881	44.919	44.957	44.995	45.033	45.070
1100	45.108	45.146	45.184	45.222	45.260	45.297	45.335	45.373	45.411	45.448
1110	45.486	45.524	45.561	45.599	45.637	45.675	45.712	45.750	45.787	45.825
1120	45.863	45.900	45.938	45.975	46.013	46.050	46.088	46.126	46.163	46.201
1130	46.238	46.275	46.313	46.350	46.388	46.425	46.463	46.500	46.537	46.575
1140	46.612	46.649	46.687	46.724	46.761	46.799	46.836	46.873	46.910	46.948
1150	46.985	47.022	47.059	47.096	47.134	47.171	47.208	47.245	47.282	47.319
1160	47.356	47.393	47.430	47.468	47.505	47.542	47.579	47.616	47.652	47.689
1170	47.726	47.763	47.800	47.837	47.874	47.911	47.948	47.985	48.021	48.058
1180	48.095	48.132	48.169	48.205	48.242	48.279	48.316	48.352	48.389	48.426
1190	48.462	48.499	48.536	48.572	48.609	48.645	48.682	48.718	48.755	48.792
1200	48.828	48.864	48.901	48.937	48.974	49.010	49.047	49.083	49.120	49.156
1210	49.192	49.229	49.265	49.301	49.338	49.374	49.410	49.446	49.483	49.519
1220	49.555	49.591	49.627	49.663	49.700	49.736	49.772	49.808	49.844	49.880
1230	49.916	49.952	49.988	50.024	50.060	50.096	50.132	50.168	50.204	50.240
1240	50.276	50.311	50.347	50.383	50.419	50.455	50.491	50.526	50.562	50.598
1250	50.633	50.669	50.705	50.741	50.776	50.812	50.847	50.883	50.919	50.954
1260	50.990	51.025	51.061	51.096	51.132	51.167	51.203	51.238	51.274	51.309
1270	51.344	51.380	51.415	51.450	51.486	51.521	51.556	51.592	51.627	51.662
1280	51.697	51.733	51.768	51.803	51.838	51.873	51.908	51.943	51.979	52.014
1290	52.049	52.084	52.119	52.154	52.189	52.224	52.259	52.294	52.329	52.364
1300	52.398	52.433	52.468	52.503	52.538	52.573	52.608	52.642	52.677	52.712
1310	52.747	52.781	52.816	52.851	52.886	52.920	52.955	52.989	53.024	53.059
1320	53.093	53.128	53.162	53.197	53.232	53.266	53.301	53.335	53.370	53.404
1330	53.439	53.473	53.507	53.542	53.576	53.611	53.645	53.679	53.714	53.748
1340	53.782	53.817	53.851	53.885	53.920	53.954	53.988	54.022	54.057	54.091
1350	54.125	54.159	54.193	54.228	54.262	54.296	54.330	54.364	54.398	54.432
1360	54.466	54.500	54.535	54.569	54.603	54.637	54.671	54.705	54.739	54.773
1370	54.807	54.841	54.875							

ANEXO E. Sensor de temperatura LM35

Electrical Characteristics (Note 1) (Note 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.2	± 0.5		± 0.2	± 0.5	± 1.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.3			± 0.3		± 1.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0	± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4		± 1.5	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	+ 10.0	+ 9.9, + 10.1		+ 10.0		+ 9.9, + 10.1	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5		± 3.0	± 0.5		± 3.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.05		± 0.01	± 0.05		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_S = +5\text{V}$	105		131	91		114	μA
	$V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		μA
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		133	91.5		116	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		μA
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.5		2.0	0.5		2.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+ 0.39		+ 0.5	+ 0.39		+ 0.5	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1</i> , $I_L = 0$	+ 1.5		+ 2.0	+ 1.5		+ 2.0	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

ANEXO F. Amplificador operacional LM358

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

Characteristic	Symbol	LM258			LM358			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ to 30 V (26 V for LM2904, V), $V_{IO} = 0\text{ V}$ to $V_{CC} - 1.7\text{ V}$, $V_O = 1.4\text{ V}$, $R_S = 0\ \Omega$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{high}$ (Note 6) $T_A = T_{low}$ (Note 6)	V_{IO}	–	2.0	5.0	–	2.0	7.0	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $T_A = T_{high}$ to T_{low} (Note 6)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	–	7.0	–	–	7.0	–	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current $T_A = T_{high}$ to T_{low} (Note 6)	I_{IO}	–	3.0	30	–	5.0	50	nA
Input Bias Current $T_A = T_{high}$ to T_{low} (Note 6)	I_B	–	–45	–150	–	–45	–250	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current $T_A = T_{high}$ to T_{low} (Note 6)	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	–	10	–	–	10	–	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Common Mode Voltage Range (Note 7), $V_{CC} = 30\text{ V}$ (26 V for LM2904, V) $V_{CC} = 30\text{ V}$ (26 V for LM2904, V), $T_A = T_{high}$ to T_{low}	V_{ICR}	0	–	28.3	0	–	28.3	V
Differential Input Voltage Range	V_{IDR}	–	–	V_{CC}	–	–	V_{CC}	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 15\text{ V}$, For Large V_O Swing, $T_A = T_{high}$ to T_{low} (Note 6)	A_{VOL}	50 25	100 –	– –	25 15	100 –	– –	V/mV
Channel Separation 1.0 kHz $\leq f \leq 20$ kHz, Input Referenced	CS	–	–120	–	–	–120	–	dB
Common Mode Rejection $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	CMR	70	85	–	65	70	–	dB
Power Supply Rejection	PSR	65	100	–	65	100	–	dB
Output Voltage—High Limit $T_A = T_{high}$ to T_{low} (Note 6) $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ (26 V for LM2904, V), $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ (26 V for LM2904, V), $R_L = 10\text{ k}\Omega$	V_{OH}	3.3 26 27	3.5 – 28	– – –	3.3 26 27	3.5 – 28	– – –	V
Output Voltage—Low Limit $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$, $T_A = T_{high}$ to T_{low} (Note 6)	V_{OL}	–	5.0	20	–	5.0	20	mV
Output Source Current $V_{ID} = +1.0\text{ V}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$	I_{O+}	20	40	–	20	40	–	mA
Output Sink Current $V_{ID} = -1.0\text{ V}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$ $V_{ID} = -1.0\text{ V}$, $V_O = 200\text{ mV}$	I_{O-}	10 12	20 50	– –	10 12	20 50	– –	mA μA
Output Short Circuit to Ground (Note 8)	I_{SC}	–	40	60	–	40	60	mA
Power Supply Current (Total Device) $T_A = T_{high}$ to T_{low} (Note 6) $V_{CC} = 30\text{ V}$ (26 V for LM2904, V), $V_O = 0\text{ V}$, $R_L = \infty$ $V_{CC} = 5\text{ V}$, $V_O = 0\text{ V}$, $R_L = \infty$	I_{CC}	– –	1.5 0.7	3.0 1.2	– –	1.5 0.7	3.0 1.2	mA

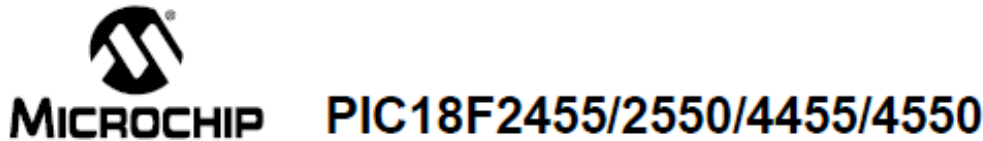
ANEXO G. Amplificador de instrumentación INA128

SPECIFICATIONS

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 10\text{k}\Omega$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA128P, U			INA128PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{MIN}}$ to T_{MAX} $V_S = \pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$		$\pm 10 \pm 100/\text{G}$	$\pm 50 \pm 500/\text{G}$		$\pm 25 \pm 100/\text{G}$	$\pm 125 \pm 1000/\text{G}$	μV
Initial vs Temperature			$\pm 0.2 \pm 2/\text{G}$	$\pm 0.5 \pm 20/\text{G}$		$\pm 0.2 \pm 5/\text{G}$	$\pm 1 \pm 20/\text{G}$	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
vs Power Supply			$\pm 0.2 \pm 20/\text{G}$	$\pm 1 \pm 100/\text{G}$		*	$\pm 2 \pm 200/\text{G}$	$\mu\text{V}/\text{V}$
Long-Term Stability				$\pm 0.1 \pm 3/\text{G}$		*		$\mu\text{V}/\text{mo}$
Impedance, Differential			$10^{10} \parallel 2$				$\Omega \parallel \text{pF}$	
Common-Mode			$10^{11} \parallel 9$				$\Omega \parallel \text{pF}$	
Common-Mode Voltage Range ⁽¹⁾	$V_O = 0\text{V}$	(V+) - 2 (V-) + 2	(V+) - 1.4 (V-) + 1.7		*	*	V	
Safe Input Voltage				± 40	*	*	V	
Common-Mode Rejection	$V_{\text{CM}} = \pm 13\text{V}$, $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$					*	V	
	G=1	80	86		73	*	dB	
	G=10	100	106		93	*	dB	
	G=100	120	125		110	*	dB	
	G=1000	120	130		110	*	dB	
BIAS CURRENT			± 2	± 5		*	± 10	nA
vs Temperature			± 30			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Offset Current			± 1	± 5		*	± 10	nA
vs Temperature			± 30			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
NOISE VOLTAGE, RTI	$G = 1000$, $R_S = 0\Omega$					*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 10Hz			10			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 100Hz			8			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 1kHz			8			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			0.2			*		$\mu\text{Vp-p}$
Noise Current						*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 10Hz			0.9			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 1kHz			0.3			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			30			*		pAp-p
GAIN						*		V/V
Gain Equation, INA128			$1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$			*		V/V
INA129			$1 + (49.4\text{k}\Omega/R_G)$			*		V/V
Range of Gain		1		10000	*		*	V/V
Gain Error	G=1		± 0.01	± 0.024		*	± 0.1	%
	G=10		± 0.02	± 0.4		*	± 0.5	%
	G=100		± 0.05	± 0.5		*	± 0.7	%
	G=1000		± 0.5	± 1		*	± 2	%
Gain vs Temperature ⁽²⁾	G=1		± 1	± 10		*	*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
50k Ω (or 49.4k Ω) Resistance ^(2,3)			± 25	± 100		*	*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Nonlinearity	$V_O = \pm 13.6\text{V}$, G=1		± 0.0001	± 0.001		*	± 0.002	% of FSR
	G=10		± 0.0003	± 0.002		*	± 0.004	% of FSR
	G=100		± 0.0005	± 0.002		*	± 0.004	% of FSR
	G=1000		± 0.001	(Note 4)		*	*	% of FSR
OUTPUT						*		V
Voltage: Positive	$R_L = 10\text{k}\Omega$	(V+) - 1.4	(V+) - 0.9		*	*		V
Negative	$R_L = 10\text{k}\Omega$	(V-) + 1.4	(V-) + 0.8		*	*		V
Load Capacitance Stability			1000			*		pF
Short-Circuit Current			+6/-15			*		mA
FREQUENCY RESPONSE						*		
Bandwidth, -3dB	G=1		1.3			*		MHz
	G=10		700			*		kHz
	G=100		200			*		kHz
	G=1000		20			*		kHz
Slew Rate	$V_O = \pm 10\text{V}$, G=10		4			*		V/ μs
Setting Time, 0.01%	G=1		7			*		μs
	G=10		7			*		μs
	G=100		9			*		μs
	G=1000		80			*		μs
Overload Recovery	50% Overdrive		4			*		μs
POWER SUPPLY						*		V
Voltage Range		± 2.25	± 15	± 18	*	*	*	V
Current, Total	$V_{\text{IN}} = 0\text{V}$		± 700	± 750	*	*	*	μA
TEMPERATURE RANGE						*		$^\circ\text{C}$
Specification		-40		85	*		*	$^\circ\text{C}$
Operating		-40		125	*		*	$^\circ\text{C}$
θ_{JA}	8-Pin Dip		80			*		$^\circ\text{C}/\text{W}$
	SO-8 SOIC		150			*		$^\circ\text{C}/\text{W}$

ANEXO H. Microcontrolador PIC18f4550



28/40/44-Pin High-Performance, Enhanced Flash USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant SIE
- Low-speed (1.5 Mb/s) and full-speed (12 Mb/s)
- Supports control, interrupt, isochronous and bulk transfers
- Supports up to 32 endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte dual access RAM for USB
- On-board USB transceiver with on-chip voltage regulator
- Interface for off-chip USB transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

Power Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep current down to 0.1 μ A typical
- Timer1 oscillator: 1.1 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 μ A typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Five Crystal modes, including High-Precision PLL for USB
- Two External RC modes, up to 4 MHz
- Two External Clock modes, up to 40 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - User tunable to compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor
 - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

- High current sink/source: 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns ($T_{CV}/16$)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (T_{CV})
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
 - Multiple output modes
 - Selectable polarity
 - Programmable dead-time
 - Auto-Shutdown and Auto-Restart
- Addressable USART module:
 - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI™ (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channels Analog-to-Digital Converter module (A/D) with programmable acquisition time
- Dual analog comparators with input multiplexing

Special Microcontroller Features:

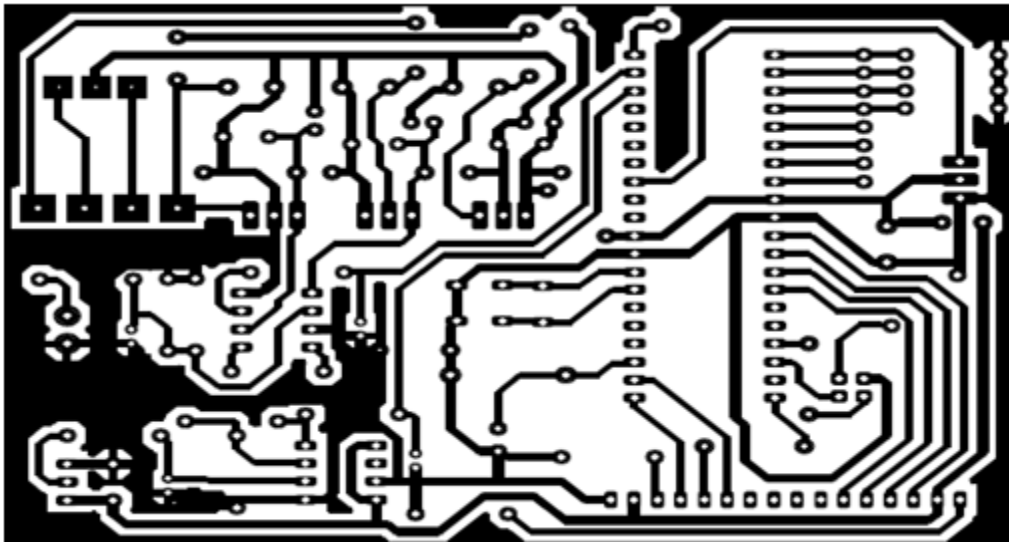
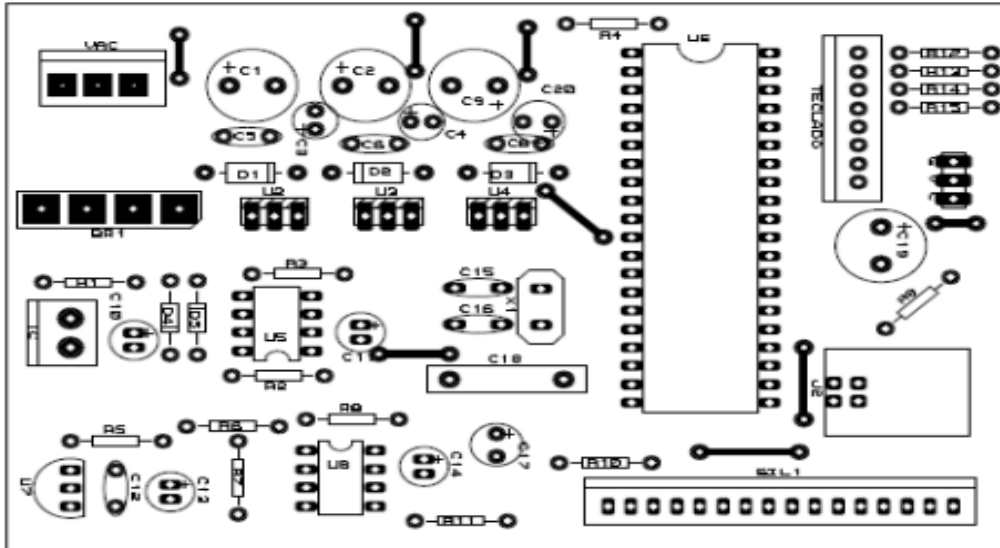
- C compiler optimized architecture with optional extended instruction set
- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle data EEPROM memory typical
- Flash/data EEPROM retention: > 40 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EA/USART	Comparators	Timers 8/16-bit
	FLASH (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I ² C			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

TABLE 1-1: DEVICE FEATURES

Features	PIC18F2455	PIC18F2550	PIC18F4455	PIC18F4550
Operating Frequency	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz
Program Memory (Bytes)	24576	32768	24576	32768
Program Memory (Instructions)	12288	16384	12288	16384
Data Memory (Bytes)	2048	2048	2048	2048
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	1	1
Enhanced Capture/ Compare/PWM Modules	0	0	1	1
Serial Communications	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART
Universal Serial Bus (USB) Module	1	1	1	1
Streaming Parallel Port (SPP)	No	No	Yes	Yes
10-Bit Analog-to-Digital Module	10 Input Channels	10 Input Channels	13 Input Channels	13 Input Channels
Comparators	2	2	2	2
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC	28-pin PDIP 28-pin SOIC	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

ANEXO I. Circuito impreso dispositivo final



ANEXO D. Código fuente programa final

```
#include <18F4550.h>
#device adc=10
#fuses
XTPLL,NOMCLR,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL1,CPUDIV1,VREGEN,NOPBADE
N
#use delay(clock=48000000)
#include <lcd.c>
#include <math.h>
#include ".\include2\usb_cdc.h"
int mostrarTemp=0;
int32 termo,compen;
float voltaje0, volter, temter, voltaje1, volcom, temcom, volmv, temperatura;
#use fast_io(A)
#use fast_io(B)
#use fast_io(C)
#use fast_io(D)
#use fast_io(E)
#BYTE PORTA = 0xF80
#BYTE PORTB = 0xF81
#BYTE PORTC = 0xF82
#BYTE PORTD = 0xF83
#BYTE PORTE = 0xF84
void txusb(void);
#include "kbd2.c"
int16 retardo=2195;
int16
anchos[]={2195,1600,1580,1560,1540,1520,1500,1480,1460,1440,1420,1400,1380,1360,1340,132
0,1300,1280,1260};
int32 contador20ms=0;

float SumaT=0.0,temperaturaTempo=0.0;
int contadorADC=0;
int contadorTimer=0;
#int_TIMER1
void TIMER1_isr(void)
{ //Genera el PWM para el servo
  set_timer1(5536); bit_set(PORTE,0); delay_us(retardo); bit_clear(PORTE,0);

  if(contador20ms>0){contador20ms=contador20ms-1;}
```

```

set_adc_channel(0);
delay_us(5);
termo = read_adc();
volter=termo*0.06410406866;
temter=((5.912* pow(10,-8))*( pow(volter,6)))-((1.053*pow(10,-
5))*pow(volter,5))+0.0007209*pow(volter,4)-
(0.02188*pow(volter,3))+0.2635*pow(volter,2))+23.41*volter)+1.134;
set_adc_channel(1);
delay_us(5);
compen = read_adc();
temcom=compen*0.08228258473;
temperaturaTempo=temter+temcom;
SumaT=SumaT+temperaturaTempo;
++contadorTimer;
if(contadorTimer==20)
{ SumaT=SumaT/20.0;
  temperatura=SumaT;
  SumaT=0.0;
  contadorTimer=0;
}
}

```

```

void delay_segundos(int16 cuantos)
{ int16 contadorSeg=0;
  for (contadorSeg=0;contadorSeg<cuantos;contadorSeg++)
  { delay_ms(1000);
  }
}

```

```

int cual=0;
int teclado=0;
int teclado1=0;
void main()
{ enable_interrupts(INT_TIMER1);
  enable_interrupts(GLOBAL);
  set_tris_a(0xff);
  set_tris_b(0xff);
  set_tris_c(0xff);
  set_tris_d(0xff);
  set_tris_e(0b11111110);
}

```

```

PORTE=0;
lcd_init();
usb_cdc_init();
usb_init();
setup_adc_ports(AN0_TO_AN1|VSS_VDD);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL );
setup_psp(PSP_DISABLED);
setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_1);
setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_4);
setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
setup_vref(FALSE);
lcd_putc("\fCargando...\n ");
delay_ms(500);
lcd_putc("\fTESIS ALEX \nTECNOPARQUE" );
delay_ms(500); //...inicial
do
{
retardo=anchos[0];
do
{
lcd_gotoxy(1,1); lcd_putc("\fSELEC. OPERACION");
lcd_gotoxy(1,2); lcd_putc( "1:4)QUEM 5)MANU");
teclado=kbd_getc2();
if(!isamong(teclado,"12345"))
{
lcd_gotoxy(1,1); lcd_putc("\f SELECCIONE ");
lcd_gotoxy(1,2); lcd_putc( " OPCION VALIDA ");
}
delay_ms(2000);
}while(!isamong(teclado,"12345"));

switch(teclado)
{
case '1':
retardo=anchos[4];
lcd_putc("\fCICLO 1 PASO 1/4");
contador20ms=50*60; do{escribir_temperatura(); txxusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
retardo=anchos[8];
lcd_putc("\fCICLO 1 PASO 2/4");
contador20ms=50*60; do{escribir_temperatura(); txxusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
retardo=anchos[12];

```

```

        lcd_putc("\fCICLO 1 PASO 3/4");
        contador20ms=50*60; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[16];
        lcd_putc("\fCICLO 1 PASO 4/4");
        do
        { escribir_temperatura();
          txusb();
          delay_ms(1000);
        }while(temperatura<975.0);
        retardo=anchos[0];
    break;

    case '2':
        retardo=anchos[2];
        lcd_putc("\fCICLO 2 PASO 1/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[4];
        lcd_putc("\fCICLO 2 PASO 2/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[8];
        lcd_putc("\fCICLO 2 PASO 3/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[16];
        lcd_putc("\fCICLO 2 PASO 4/4");
        contador20ms=50*60*60; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[0];
    break;

    case '3':
        retardo=anchos[1];
        lcd_putc("\fCICLO 3 PASO 1/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[5];
        lcd_putc("\fCICLO 3 PASO 2/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);

```



```

        retardo=anchos[9];
        lcd_putc("\fCICLO 3 PASO 3/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[12];
        lcd_putc("\fCICLO 3 PvASO 4/4");
        contador20ms=50*60*60; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[0];
        break;

    case '4':
        retardo=anchos[4];
        lcd_putc("\fCICLO 4 PASO 1/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[8];
        lcd_putc("\fCICLO 4 PASO 2/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[12];
        lcd_putc("\fCICLO 4 PASO 3/4");
        contador20ms=50*60*20; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[16];
        lcd_putc("\fCICLO 4 PvASO 4/4");
        contador20ms=50*60*60; do{escribir_temperatura(); txusb();
delay_ms(1000);}while(contador20ms>0);
        retardo=anchos[0];
        break;

    case '5':
        do
        { lcd_gotoxy(1,1); lcd_putc("\fSELEC APERTURA 1");
          lcd_gotoxy(1,2); lcd_putc( "(0:9,*) T:  ");
          mostrarTemp=1; teclado=kbd_getc3(); mostrarTemp=0;
          delay_ms(100);
          if(isamong(teclado,"0123456789")){retardo=anchos[teclado-'0'];}
          delay_ms(100);
          if(isamong(teclado,"*"))
          { lcd_gotoxy(1,1); lcd_putc("\fSELEC APERTURA 2");
            lcd_gotoxy(1,2); lcd_putc( "(0:9,*) T:  ");

```

```

        delay_ms(2000);
        mostrarTemp=1; teclado=kbd_getc3(); mostrarTemp=0;
        if(isamong(teclado,"123456789")){retardo=anchos[teclado-'0'+9];}
        if(isamong(teclado,"0")){retardo=anchos[0];}
        delay_ms(2000);
    }
    }while(isamong(teclado,"123456789*#"));
break;
}

}while(true);
}

```

```

void txxusb(void)
{ if(usb_cdc_connected()) {
  usb_task();
  if (usb_enumerated()) {
    printf(usb_cdc_putc, "%0.0f ",temperatura );
    printf(usb_cdc_putc, "\n");
  }
}
}
}

```