

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

Panel de control para hornos rotativo de
panadería

Autores:

- Meretz, Diego Federico.

Director:

- Pañoni, Sergio.
- Ramos, Héctor.
- Maggiolini, Lucas.

*Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos
para acceder al título de Ingeniero Electrónico*

en la

Facultad Regional Paraná

Fecha Marzo de 2017

Declaración de autoría:

Yo declaro que el Proyecto Final “Panel de control para hornos rotativo de panadería” y el trabajo realizado son propio. Declaro:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firma:

•

Fecha: marzo de 2017

Agradecimientos:

A mis padres, quienes por sobre todas las cosas han inspirado en mí, valores de esfuerzo, confianza y perseverancia para obtener buenos resultados en los objetivos propuestos a lo largo de mi vida.

A mi esposa e hijo que me dieron las fuerzas necesarias para lograr la culminación de esta etapa, sobre todo en los momentos difíciles al saber que contaba con su apoyo incondicional.

A todos mis familiares y amigos que son un pilar fundamental en mi vida los cuales también me acompañaron e insistieron en que pusiera todo el esfuerzo necesario para culminar esta etapa.

A las empresas y compañeros de trabajo que me ayudaron a corresponder los conocimientos teóricos con la práctica y hacer que nuestro tiempo juntos fuera muy ameno por lo que siempre recordare esos buenos momentos compartidos.

Meretz, Diego.

Abstract

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

Panel de control para hornos rotativos de panadería

Meretz, Diego.

Abstract:

It is an automatic electronic control for rotary bakery ovens, adapting easily to different designs and models; giving the possibility of installing this control to any oven of this type even if the oven is a model that is already discontinued or is in operation and does not have this type of control.

The system is developed on a microcontroller PIC16F887, using LCD and 7-segment displays for the visualization and configuration of the parameters, using a quick and simple configuration of the programs. For temperature reading a thermocouple type J.

It was achieved an automatic digital control of easy handling and high performance in rotary kilns for industrialized use of bakery, easy to configure but very efficient. Adaptable a esthetically and functionally to any oven of this type. It is a robust, reliable control and as a main aggregate it is economically accessible.

Keywords:

- *Vertical heater.*
- *Cooking control.*
- *Control for bakery oven.*
- *Rotary oven for bakery.*

Resumen:

Es un control electrónico automático para hornos rotativos de panadería, adaptándose fácilmente a diferentes diseños y modelos; brindando la posibilidad de instalar este control a cualquier horno de este tipo aun cuando el horno sea un modelo que ya se ha discontinuado o esté en funcionamiento y no cuente con este tipo de control.

El sistema se desarrolla sobre un microcontrolador PIC16F887, utilizando displays LCD y 7-segmentos para la visualización y configuración de los parámetros, empleando una configuración rápida y simple de los programas. Para la lectura de temperatura se emplea un termopar tipo J.

Se logro un control digital automático de fácil manejo y alto desempeño en hornos rotativos para uso industrializado de panificados, de fácil configuración pero muy eficiente. Adaptable estética y funcionalmente a cualquier horno de este tipo. Es un control robusto, confiable y como agregado principal es económicamente accesible.

Palabras Clave:

- *Calefactor vertical.*
- *Control de cocción.*
- *Control para horno de panadería.*
- *Horno rotativo para panadería.*

Reconocimientos:

Me gustaría agradecer al Dr. Spies, Rubén Daniel y al Prof. Canavelli, Juan Carlos. Por su dedicación a que su alumnado entendiera el desarrollo de Fourier y su preponderancia en la rama ingeniería electrónica.

Índice

Introducción.....	1
Desarrollo.....	3
Partes que componen al horno.....	3
Frente.....	3
Dimensiones.....	4
Quemador EQA 91.....	6
Montaje del quemador.....	7
Calefactor.....	8
Vista del calefactor sin turbina.....	8
Vista del calefactor con turbina.....	9
Vista del calefactor con el motor de la turbina y forro exterior.....	9
Vista del montaje general del horno.....	10
Sistema de vapor.....	11
Análisis de partes del control electrónico para horno rotativo.....	14
Termopar.....	14
Linealización.....	15
Compensación de unión fría.....	15
Formato de termopares.....	17
Tipos de termopares.....	17
Precauciones y consideraciones al usar termopares.....	18
Problemas de conexión.....	18
Resistencia del cable.....	19
Desajuste.....	19
Ruido.....	19
Voltaje en modo común.....	19
Ruido en modo serie.....	20
Desviación térmica.....	20
Termistor.....	20
Diseño e implementación.....	22
Circuito implementado para el termopar.....	22
Circuito implementado para el termistor.....	23
Fuente de alimentación.....	24
Manejo de potencia.....	25
Circuito implementado para salida.....	26
Circuito implementado para entrada.....	27
Circuito del microcontrolador.....	29
Circuito para el LCD.....	30
Circuito para el teclado.....	30
Circuito implementado para visualización de parámetros.....	31
PCB.....	33
Manejo del programa.....	35
Resultados.....	37
Análisis de costos.....	39
Discusión y conclusiones.....	41
Bibliografía.....	42

Lista de Figuras

<i>Fig.1. Frente.....</i>	<i>3</i>
<i>Fig.2. Dimensiones.....</i>	<i>4</i>
<i>Fig. 3. Quemador.....</i>	<i>6</i>
<i>Fig. 4. Vistas del quemador.....</i>	<i>6</i>
<i>Fig. 5. Montaje del quemador.....</i>	<i>7</i>
<i>Fig. 6. Calefactor sin turbina.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig. 7. Calefactor con turbina.....</i>	<i>9</i>
<i>Fig. 8. Calefactor con motor y forro exterior.....</i>	<i>9</i>
<i>Fig. 9. Montaje general del calefactor.....</i>	<i>10</i>
<i>Fig. 10. Sistema de vapor.....</i>	<i>11</i>
<i>Fig. 11. Cascada de agua para vapor.....</i>	<i>12</i>
<i>Fig. 12. Cascada de agua con tapa exterior.....</i>	<i>13</i>
<i>Fig. 13. Termopar.....</i>	<i>14</i>
<i>Fig. 14. Compensación de unión fría.....</i>	<i>16</i>
<i>Fig. 15. Circuito para el termopar.....</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 16. Circuito para el termistor.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 17. Fuente de alimentacion.....</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 18. Circuito de salida.....</i>	<i>26</i>
<i>Fig. 19. Circuito implementado para la salida.....</i>	<i>26</i>
<i>Fig. 20. Circuito de entrada.....</i>	<i>27</i>
<i>Fig.21. circuito implementado para la entrada.....</i>	<i>28</i>
<i>Fig. 22. Circuito implementado para el microcontrolador.....</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 23. Circuito implementado para el LCD.....</i>	<i>30</i>
<i>Fig. 24. Circuito implementado para el teclado.....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 25. Circuito implementado para la visualizacion.....</i>	<i>32</i>
<i>Fig. 26. PCB.....</i>	<i>33</i>

Lista de Tablas

Tabla 1. Dimensiones.....	5
Tabla 2. Tabla de medición de temperatura.....	38
Tabla 3. Análisis de costos.....	40

Lista de Abreviaciones

°C	Grados Celsius
cm.	Centímetros
Dr.	Doctor
etc.	Etcétera
Fig.	Figura
GLP	Gas licuado de petróleo
GNC	Gas natural comprimido
h.	Hora
Kcal.	Kilocaloría
Kg.	Kilogramos
Mhz	Megahertz
mV.	Milivoltios
Prof.	Profesor
μV.	Microvoltios
VCA.	Tensión alterna
VCC.	Tensión continua

Lista de ecuaciones

Ec.1.....	15
Ec.2.....	16
Ec.3.....	17
Ec.4.....	17
Ec.5.....	17
Ec. 6.....	21
Ec. 7.....	21
Ec. 8.....	37

Dedicado a:

Mis abuelos que la vida no quiso puedan compartir este logro conmigo, pero siempre estarán en mis recuerdos.

A mis seres queridos que siempre están presentes en los momentos adversos y siempre dispuestos a compartir de esos inolvidables momentos hermosos que nos brinda la vida y en especial a mi padre al que respeto y admiro.

A mi esposa Adriana y mi hijo Máximo a los cuales amo con mi vida.

Introducción

El control electrónico para hornos rotativos es una innovación necesaria para el manejo de este tipo de maquinaria en los tiempos que corren, facilitando el uso del mismo y optimizando los tiempos productivos.

El horno del que estamos hablando es una máquina que produce 130Kg/h utilizando gas para la cocción, con una dimensión de 228x148x229 cm (altoxanchoxprofundidad) con un peso de 1200Kg. Más adelante se detallan las partes y funcionalidad de cada una.

Este no cuenta con ningún dispositivo de seguridad ni aviso de falla en la actualidad, además de que el manejo es totalmente manual por lo que el desarrollo de este nuevo sistema de control electrónico contempla un dispositivo de seguridad en la puerta y aviso de fallo en el quemador, esto hace no solo a la seguridad, sino que también optimiza el tiempo de cocción ya que en caso que se produzca una falla, al instante el usuario lo visualizara y podrá repararla. No solo avisa de la falla del quemador sino que además brinda seguridad ya que detiene el proceso, esperando se solucione el inconveniente para continuarlo.

Al utilizar este sistema, se asegurara que no tendrá mal funcionamiento producido por ruidos eléctricos debido a los mismos contactores que forman parte del circuito de potencia como así también a la activación de la electroválvula del generador de vapor, el cual es causante de muchos conflictos en el uso de determinados dispositivos como pirómetros y temporizadores. También es robusto frente a la descarga producida por la chispa de encendido del quemador.

Este sistema está diseñado para el uso sin inconveniente con generadores eléctricos o grupos electrógenos.

El diseño es concebido para hacer muy sencilla la interpretación y manejo de las funciones, con instrucciones muy sencillas pero claras las cuales el usuario simplemente leyendo el instructivo descrito en el manual estará en condiciones de aprenderlo sin necesidad de conocimientos técnicos o necesidad de contratar personal especializado en el tema para manejar el horno.

Se podrá preguntar ¿se adaptara al horno con el que ya cuento? Claro, el sistema está diseñado para adaptarse a cualquier horno rotativo.

¿Será complicado realizar el reemplazo del sistema actual por este automatizado? Por supuesto que no, es muy sencillo, el sistema es entregado completo, se reemplaza íntegramente o dependiendo del estado de los componentes de potencias que podrán ser evaluados y tal vez se pueden reutilizar sin necesidad de reemplazarlos.

Todos los elementos que forman parte del sistema son de calidad y marcas comerciales reconocidas, esto es importante ya que brinda confianza y trayectoria en el mercado. Lo cual trae aparejado que si en algún momento haya que reemplazar algún componente por algún motivo, no tendrá inconvenientes para conseguir un reemplazo.

Es importante saber que el tablero de control si bien en su diseño básico es concreto y fijo, se puede adaptar a cada usuario de manera particular, es significa que si un usuario quisiera hacer determinadas modificaciones en la funcionalidad se puede hacer y por sobre todo se puede realizar un diseño estético que se adapte al resto del horno, pudiendo cambiar formato, distribución de visualizadores y botones, los colores, tamaño, etc. Permitiendo adaptarse fácilmente a cualquier modelo de horno y logrando que estéticamente quedara acorde al resto del mismo.

Después de analizar en detalle los resultados de un estudio del mercado nacional se pudo observar lo siguiente, hoy en día existe un amplio abanico de posibilidades de controles electrónicos para hornos rotativos para panadería provisto por empresas desarrolladoras

de este tipo de aplicaciones, sin embargo se deben hacer detalles de diseños propios de cada horno en particular y acorde al mercado que se apunte, es justamente por eso que se tomaron todas las decisiones basadas en las preferencias de los usuarios de hornos rotativos de Argentina, pero también se obtuvieron resultados favorables en mercados externos como Brasil y República Dominicana.

En este caso particularmente se diseñó el control para hornos modelo ZU-95 Premium de Industrias ZUNINO SRL de Paraná Entre Ríos Argentina, por lo cual se estudió el mercado particular de esta empresa y en sus años de experiencia. Esto hace que varios detalles sean omitidos en el desarrollo ya que son propios de la empresa y el diseño respeta los requerimientos particulares de este modelo de horno.

Además hoy día se suma como competencia directa el uso de PLC (controlador lógico programable), los cuales se pueden emplear eficientemente en cualquier control automatizado, estos son muy estables en este tipo de aplicaciones, logrando controles confiables. La única alternativa de poder competir frente al empleo de PLC es lograr un control más económico, sin perder de vista un correcto funcionamiento. En referencia al costo de estos paneles de control podemos demostrar que costarán un 50% de lo que cuesta un control por PLC y un 25 o 30% menos que los controles producidos por las empresas consultadas en este estudio de mercado.

Este control tiene la ventaja de utilizar componentes de fácil adquisición en el mercado local y de bajo costo, pudiendo competir económicamente con los controles existentes en el mercado además de tener un exhaustivo análisis y años de experiencia en el funcionamiento de estos equipos bajo diferentes tipos de ruido que interfieren en el correcto funcionamiento, logrando un diseño muy robusto y confiable.

Además al incorporar entradas y salidas directamente sobre la placa de control es menos vulnerable a agentes de interferencia externa, ya que no hay conexión ni cable de enlace, es una conexión directa la cual está optoacoplada tanto en entradas como salidas.

Desarrollo

Comenzare describiendo las partes de un horno rotativo, **modelo ZU-95 Premium** propiedad de Industrias Zunino SRL, y su funcionamiento para luego enfocarme de lleno al desarrollo propio del proyecto.

Para poder visualizar de qué hornos estamos hablando, analizaremos las dimensiones y partes del mismo para poder entender qué maquina estamos controlando.

Partes que componen al horno

Frente

En la Fig. 1 se observa el frente completo del horno al cual para el cual se desarrollo este control.



Fig.1. Frente

Dimensiones

En la Fig. 2 se muestran las cotas del horno terminado listo a instalar. En la tabla 1 se describen las referencias de dichas cotas.

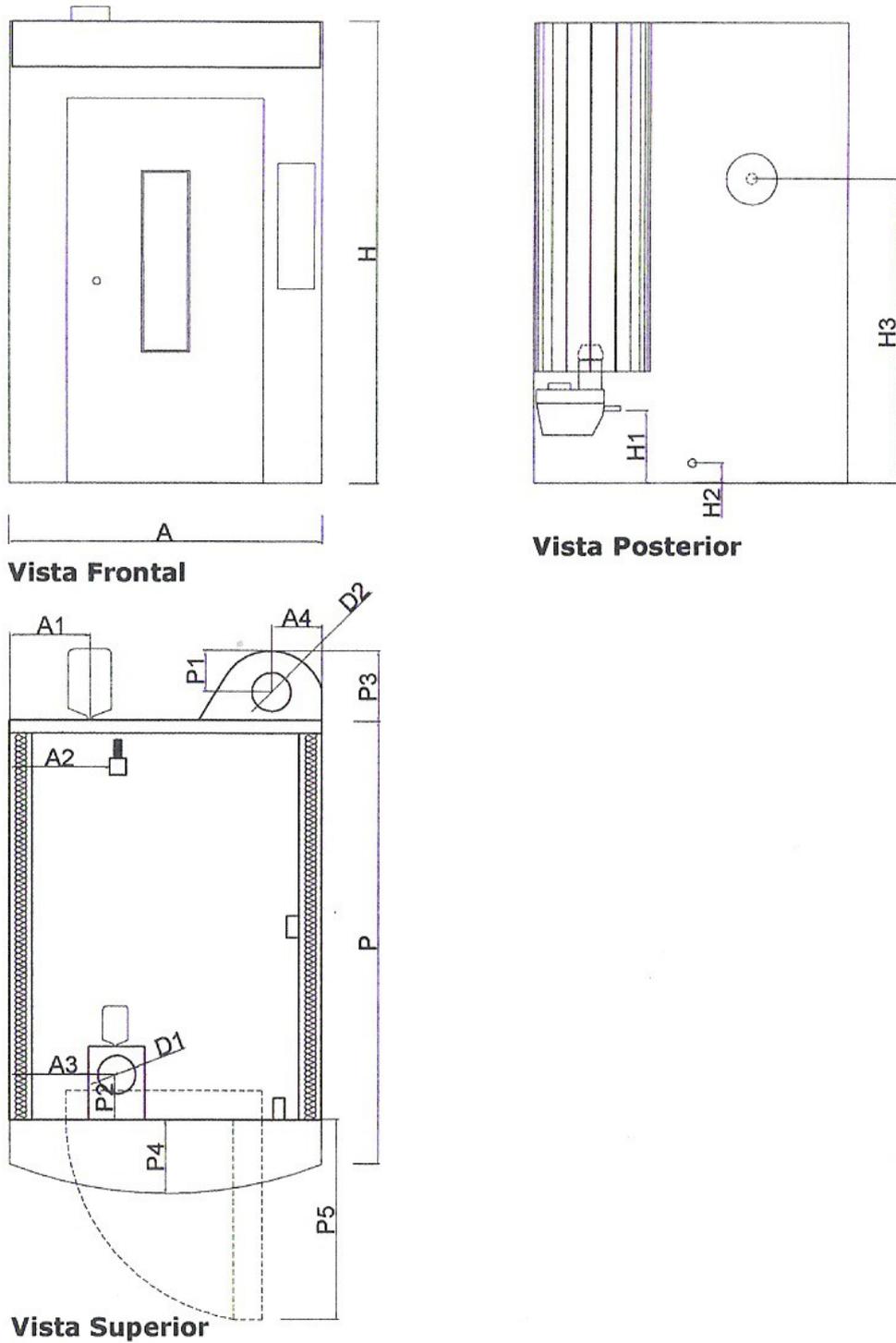


Fig.2. Dimensiones

Referencia	Medida	Nombre
A	1485	Ancho del horno
A1	310	Distancia lateral al eje de la turbina
A2	550	Distancia lateral a la entrada de agua
A3	495	Distancia lateral a centro de escape
A4	310	Distancia lateral a centro de chimenea
D1	150	Diámetro de escape
D2	150	Diámetro de chimenea
H	2250	Altura del horno
H1	340	Altura a la entrada de gas
H2	100	Altura de desagüe
H3	1725	Altura eje turbina
P	1740	Profundidad del horno
P1	350	Distancia centro chimenea
P2	265	Distancia centro salida de vapor
P3	510	Profundidad alojamiento calefactor
P4	310	Profundidad frente de horno
P5	980	Ancho de puerta

Tabla 1. Dimensiones

Las variables a medir y controlar por el control automático son temperatura y tiempo. Para el calor necesario para la cocción se utiliza un quemador que actúa en modo ON/OFF acorde al funcionamiento necesario.

Quemador EQA 91

Usare un quemador de fabricación nacional marca EQA de 20Kcal para gas del cual daré una explicación a continuación y se adjuntan las hojas de datos al final; también se puede usar un quemador de gas-oíl o eléctrico, el proyecto lo admite, ya que dichos quemadores tienen igual funcionamiento desde el punto de vista del proyecto.

En la Fig. 3 se muestra un quemador EQA con la conexión para gas con las válvulas de seguridad ya incluidas como así también la llave de paso que habilita la circulación del gas. En la Fig. 4 se visualiza los laterales del quemador.



Fig. 3. Quemador

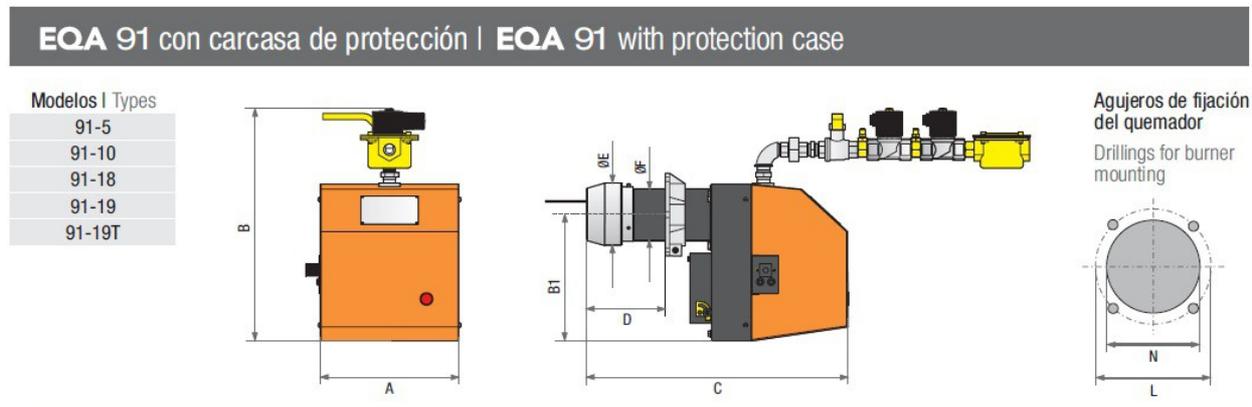


Fig. 4. Vistas del quemador

Quemador EQA: es un dispositivo que genera llama mediante la combustión de gas, el cual puede ser gas licuado de petróleo (GLP) o en la mayoría de las aplicaciones gas natural comprimido (GNC). Esta llama es impulsada por una turbina dentro de un tubo que forma parte de un calefactor el cual calienta el aire que lo rodea y luego los gases resultantes de la combustión son expulsados al exterior no solo del horno sino del edificio mediante cañería adecuada. El aire caliente generado en derredor de la caldera es impulsado por una turbina que lo envía hacia dentro de la cámara de cocción, cabe aclarar que este aire es limpio, es decir no forma parte del resultante de la combustión; de modo que es aire caliente pero limpio el que ingresa a la cámara de cocción. Luego se

describe el funcionamiento del calefactor, para mostrar que el aire que ingresa a la cámara de cocción no es el aire de combustión, sino aire limpio a alta temperatura. Al quemador no le realizo ningún tipo de manejo adicional, sino que lo implemento directamente como viene de fábrica. A este quemador solo se conecta a la alimentación de energía que en nuestro caso es de 220VCA debido a que el mismo cuenta con la electrónica necesaria para su funcionamiento, de la misma electrónica se toma una salida de alarma, la cual se activa en caso de mal funcionamiento y mediante la cual se detendrá el funcionamiento del horno mostrando una señal de alarma en el tablero para que el usuario pueda corregirla antes de continuar con el proceso de horneado. Las fallas del quemador están detalladas en la hoja de dato del mismo, pero las más comunes y sencillas de solucionar son por ejemplo que el quemador no encienda por olvido de abrir la llave de paso del gas, porque el caudal de gas no es el adecuado y el técnico instalador del horno en forma sencilla lo podrá solucionar.

Para poder reactivar el quemador en caso de producirse una falla se debe resetearlo desde el botón de reset propio del quemador, el cual debe presionar un instante y el quemador quedara en condiciones de uso. Siempre y cuando se haya solucionado la falla previamente.

Toda la parte que genera el calor para la cocción se llama calefactor, el cual está formado por el quemador, y una turbina que impulsa el aire caliente generado por el quemador hacia el interior de la cámara de cocción donde se encuentra el producto a coser. En la Fig. 5 se observa como es el montaje del quemador en el calefactor mediante una brida de sujeción.

Montaje del quemador



Fig. 5. Montaje del quemador

Calefactor

Es una parte importante del horno, ya que es el encargado de generar el calor para la cocción.

Estos varían acorde a cada fabricante de horno, yo utilizare el diseño de los hornos marca "Industrias ZUNINO SRL" de la ciudad de Paraná Entre Ríos Argentina.

Como se observa en la Fig. 5 el calefactor lleva fijado en la parte inferior el quemador (EQA) el cual genera la llama dentro del ducto de la caldera, esta llama se extiende por dentro la caldera y sale al exterior en la parte superior hacia el exterior del edificio. Esto se puede observar en la Fig. 10, como es la salida de los gases de combustión en la parte superior o techo del horno. Por en derredor del ducto se forma una cámara para generar el aire caliente (limpio) que será impulsado hacia el interior de la cámara de cocción mediante la turbina. La turbina también es diseño propio de Industrias ZUNINO SRL. En este caso se puede observar que todo el calefactor se alinea en forma vertical, en otros casos puede no ser así, dependiendo de cada fabricante. Pero esto no influye en el funcionamiento del control.

Vista del calefactor sin turbina

En las Fig. 6, Fig. 7 y Fig. 8 se observa la secuencia de montaje de la turbina en el calefactor. En la Fig. 8 se puede observar que ya está el forro exterior del horno colocado, es decir, es así como queda terminado, restando solamente quitar el film que recubre la chapa de acero lo cual se realiza en el destino final para que no se produzcan rayaduras durante el transporte del horno hacia su destino.



Fig. 6. Calefactor sin turbina

Vista del calefactor con turbina



Fig. 7. Calefactor con turbina

Vista del calefactor con el motor de la turbina y forro exterior



Fig. 8. Calefactor con motor y forro exterior

Vista del montaje general del horno

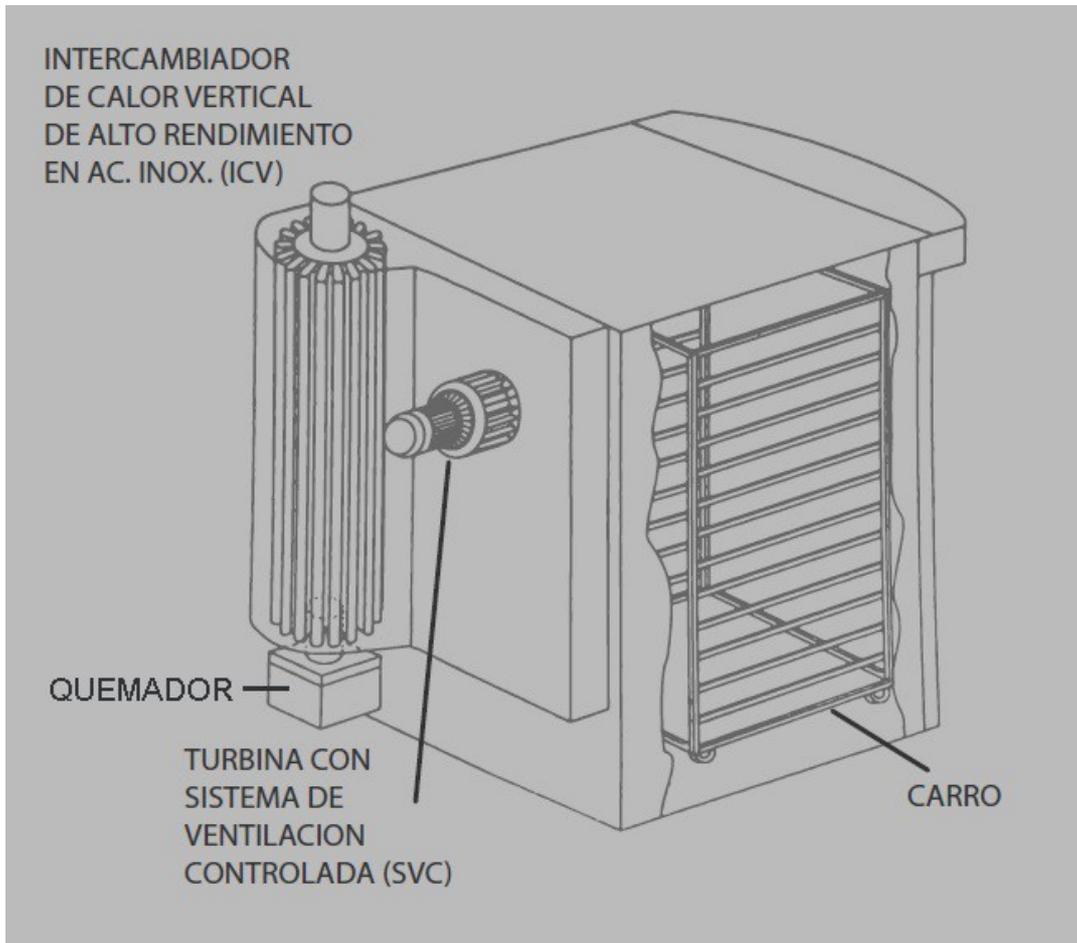


Fig. 9. Montaje general del calefactor

Sistema de vapor

El vapor de agua es muy utilizado en estos hornos, generalmente en todos los tipos de productos. Generalmente se genera vapor al comienzo del ciclo de cocción, aunque en algunos y dependiendo de cada usuario, suelen otorgar vapor un instante antes del fin de la cocción.

Para generar vapor, se utiliza una cascada metálica con forma de ángulo por donde el agua desciende por gravedad. Para esto se hace una conexión de una fuente o grifo de agua limpia a través de una electroválvula en la parte superior o techo del horno como se observa en la Fig. 10 y desde allí el caudal desciende por la cascada Fig. 11 y como la cámara se encuentra a alta temperatura parte de esa agua es evaporada generando el vapor necesario. A veces existe un remanente de agua, el cual es desalojado mediante un ducto en la parte inferior de la cámara hacia el exterior. Lógicamente en la parte exterior se debe colocar un recipiente para alojar el remanente, además de tener en cuenta que el remanente esta a alta temperatura por lo que el recipiente debe tener las condiciones adecuadas.

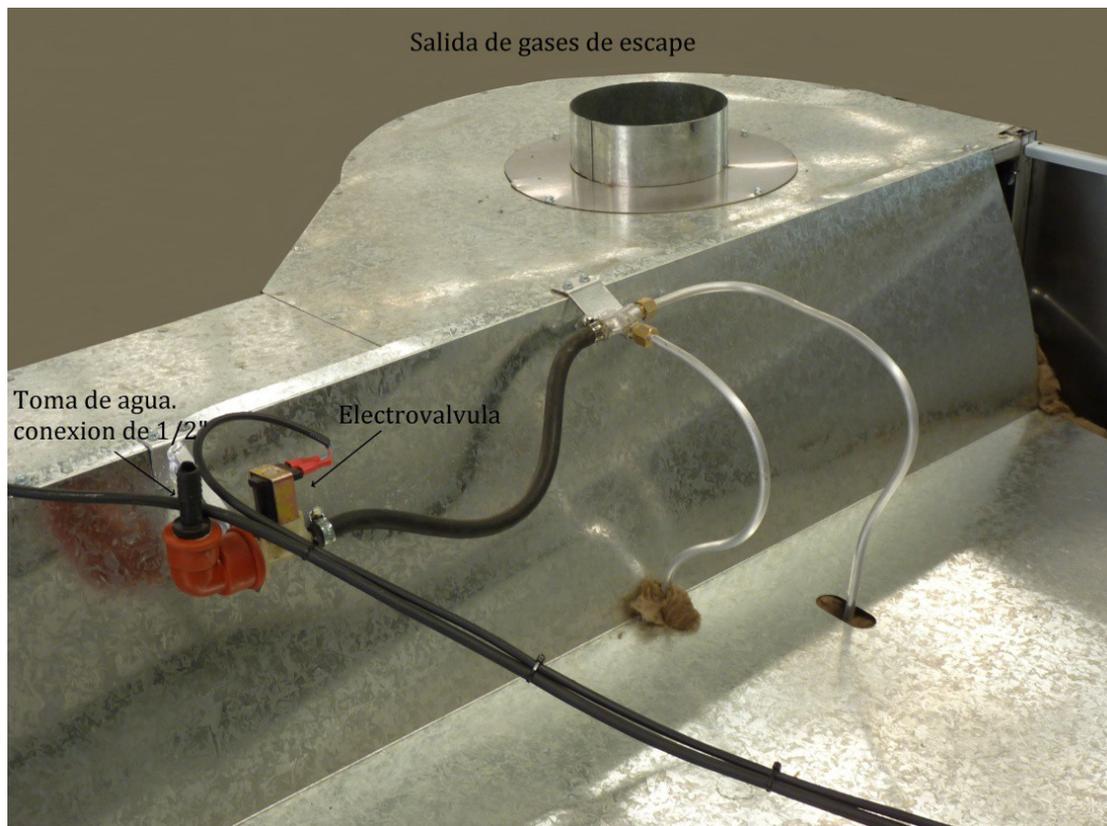


Fig. 10. Sistema de vapor



Fig. 11. Cascada de agua para vapor

En la Fig. 11 se puede notar la presencia de dos caños para la introducción de agua, uno en la parte superior y otro que llega hasta la parte central de la cascada, esto es para que el vapor se produzca en forma homogénea en toda la cámara. La cascada se cubre con una tapa metálica para evitar que se produzcan salpicaduras como se observa en la Fig.12.



Fig. 12. Cascada de agua con tapa exterior

En la parte inferior de la Fig. 12 se observa un recipiente de chapa y el desagote metálico del remanente de agua.

Además se puede observar en la imagen el enganche superior que es donde se coloca el carro. El enganche tiene la forma adecuada para producir un levantamiento del carro permitiendo que este gire libremente durante la cocción sin rozar el piso del horno, luego para retirarlo simplemente se debe ejercer una pequeña presión hacia el exterior.

Obsérvese también en el lateral derecho superior la presencia de un alojamiento metálico, este es una protección detrás el cual se encuentra la termocúpla, que es la encargada de tomar la temperatura de la cámara de cocción.

Análisis de partes del control electrónico para horno rotativo

El control electrónico utiliza un microcontrolador Pic16F887 y para la lectura de temperatura un termopar tipo j.

Para el correcto funcionamiento del control de temperatura se debe tener en cuenta varios factores propios y delicados respecto a los termopares, por lo que se desarrollan estos aspectos más adelante en forma detallada. Varios de los componentes utilizados en el desarrollo son elegidos por ser de fácil adquisición en el mercado sobre todo en el caso de que se necesite un reemplazo.

Para el control de potencia siguiendo normas internacionales, se manejan todos los comandos con baja tensión. Además de colocar una parada de emergencia en la parte frontal del tablero, la cual desconecta la energía de todo el control.

En caso de producirse un mal funcionamiento en el quemador, como norma de seguridad el sistema desactiva todo el comando y muestra en el LCD una leyenda "FALLA DE QUEMADOR" y en los demás displays "999". Para poder continuar trabajando se debe restablecer la falla. Generalmente las fallas se producen por no encendido de llama, esto se soluciona presionando un pulsador que se encuentra en la parte inferior del quemador. Para ver funcionamiento completo del quemador, se adjunta su manual al final.

Como el termopar es una parte importante del funcionamiento me detendré un poco en ello para analizarlo más profundamente.

Termopar

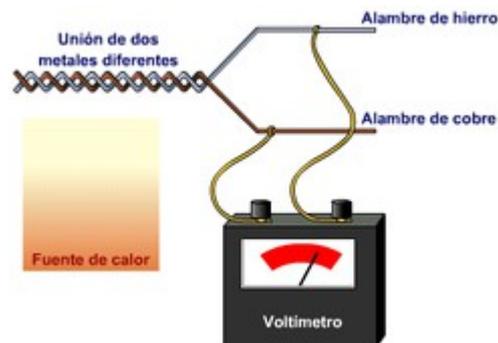


Fig. 13. Termopar

Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los mV) que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto caliente o unión caliente o de medida y el otro llamado punto frío o unión fría o de referencia (efecto Seebeck).

Normalmente los termopares industriales están compuestos por un tubo de acero inoxidable u otro material. En un extremo del tubo está la unión, y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal) o salen directamente los cables.

En instrumentación industrial, los termopares son usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación está en la exactitud, pues es fácil obtener errores del sistema cuando se trabaja con precisiones inferiores a un grado Celsius.

En la Fig. 13 se observa como varía el potencial de un termopar al aplicarle una fuente de calor.

Linealización

Además de lidiar con la compensación de unión fría y el problema de exactitud, para la correcta medición debe además enfrentar el hecho de que la energía generada por un termopar no es una función lineal de la temperatura. Esta dependencia se puede aproximar por un polinomio complejo (de grado 5 a 9, dependiendo del tipo de termopar). Los métodos analógicos de linealización son usados en medidores de termopares de bajo costo y con buenos resultados. Por lo cual utilizo un sistema analógico basado en un diodo con un amplificador operacional LM358. En este caso buscamos linealizar de forma precisa para un rango de temperatura entre 100 y 300 grados que es el rango de operación de los hornos.

Compensación de unión fría

El mecanismo de compensación de unión de metales homogéneos es una técnica utilizada en circuitos de medición de temperatura, principalmente basados en termopares, para compensar la dependencia con la temperatura ambiente inherente en la realización de la medida. Dicha compensación permite la realización de una medida absoluta de la temperatura de un cuerpo o fluido. Para compensar esta unión utilizo un termistor como sensor de la temperatura relativa de lectura y la de ambiente donde se unen los conductores.

Dado al amplio uso de termopares, a continuación daré una descripción del proceso de compensación para el circuito utilizado.

El principio de funcionamiento de un termopar se basa en el hecho de que, si un metal tiene diferentes temperaturas en sus extremos, sobre este existirá un flujo de energía desde la zona de más temperatura a la de menos, con el fin de equilibrar energéticamente el sistema. Este flujo provocará una diferencia de potencial entre los extremos que será la magnitud que se mida, para que mediante una relación directa se logre conocer la temperatura censada. La respuesta del termopar ante la diferencia de temperaturas, dependerá fundamentalmente del tipo de metales usados y su tecnología de fabricación. Comúnmente los termopares constan de dos metales con un punto en común de unión, denominado unión caliente, al ser este punto el que está en contacto con aquello del cual se desee conocer su temperatura. Los otros dos extremos se encuentran abiertos y son sobre los que se mide la diferencia de potencial o tensión. Estos extremos pertenece a la denominada unión fría, debido a que se encuentran a temperatura ambiente, por lo general menor que la temperatura a medir.

Particularmente, la tensión entre extremos del termopar, se puede aproximar según la siguiente expresión:

$$V_{\text{termopar}} = \alpha * (T^a - T_0) = \alpha * T^a - \alpha * T_0$$

Ec.1

Donde α es un parámetro dependiente de los tipos de metales usados y representa la sensibilidad de la tensión de salida frente a cambios de temperatura (normalmente $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), (T_0) es la temperatura ambiente y (T^a) la temperatura a medir.

Para poder medir tensiones en un extremo, ha de existir pues una diferencia de temperatura que vendrá dada por la que deseamos medir, y por la temperatura ambiente a la que se encuentre el termopar. Por lo tanto, vemos que la tensión depende de la

temperatura ambiente, cosa que no es nada recomendable. Pensemos por ejemplo que la tensión de salida de un objeto que está a 45 °C con una temperatura ambiente de 30 °C, será diferente de la obtenida con el mismo objeto a 45 °C y temperatura ambiente de -10 °C. El objetivo de la compensación de la unión fría es pues, eliminar el efecto que produce la temperatura ambiente. La manera más inmediata, es la de sumarle un término αT_0 a la expresión comentada anteriormente. Para ello, se crea un circuito auxiliar que dependa de la misma temperatura ambiente T_0 , y que entregue una tensión capaz de anular el término $-\alpha T_0$ de la tensión.

En la Fig. 14, se presenta un circuito muy simple capaz de realizar esta compensación de una manera sencilla.

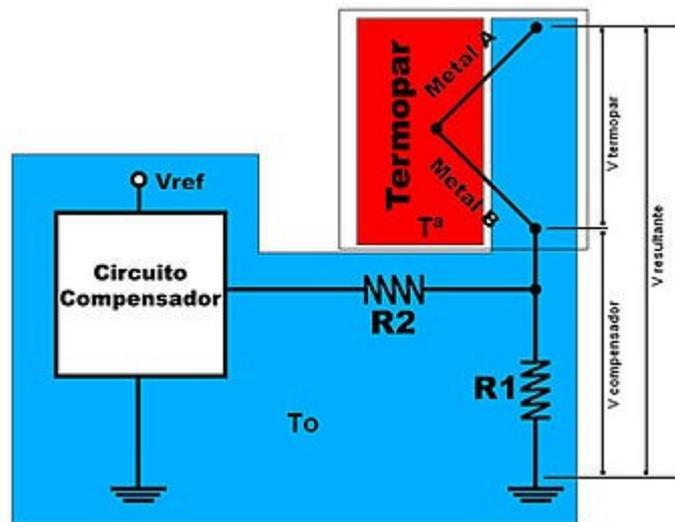


Fig. 14. Compensación de unión fría

Diseño básico para la compensación de unión fría de un termopar:

En éste se hace uso de un circuito compensador, comúnmente un termistor de los muchos que se puedan encontrar en el mercado a temperatura ambiente T_0 junto con la unión fría. La respuesta de dicho circuito, es una tensión de salida fijada por el fabricante según la temperatura a la que encuentre, y normalmente se considera la respuesta de éste lineal de la forma:

$V_{termopar} = \beta T_0$, donde β representa la sensibilidad que posea el circuito integrado aportada por el fabricante (normalmente en $mV/^\circ C$).

Seguidamente se intercala una etapa para acondicionar el valor de su salida a uno que sea αT_0 con el fin de conseguir el propósito antes comentado. En el caso de la Figura 1, se hace uso de un simple divisor de tensión. Por lo tanto siguiendo la nomenclatura de la imagen, la tensión de toda la sección compensadora se puede expresar como:

$$V_{compensador} = V * R_1 = V_{termopar} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \beta * T_0 * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Ec.2

Si queremos anular el efecto del término $-\alpha T_0$ en la tensión del termopar ($V_{termopar}$), deberemos conseguir con $V_{compensador}$ una tensión de esta magnitud y sumársela, para

así obtener como tensión resultante de la suma de ambas, $V_{resultante}$, una medida que no depende de la temperatura ambiente.

$$V_{resultante} = V_{termopar} + V_{compensador}$$

Ec.3

$$V_{resultante} = \alpha * T^a - \alpha * T_0 + \beta * T_0 * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Ec.4

Por lo tanto, la condición a cumplir es que el término $\beta * T_0 * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ sea igual a $\alpha * T_0$, quedando finalmente la condición de compensación de la unión fría como:

$$\beta * \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \alpha$$

Ec.5

Jugando con los valores de R1 y R2 se consigue compensar adecuadamente la dependencia respecto a la temperatura ambiente en el circuito de medida.

Formato de termopares

Los termopares están disponibles en diferentes formatos, como sondas. Estas últimas son ideales para variadas aplicaciones de medición, por ejemplo, en la investigación médica, sensores de temperatura para los alimentos, en la industria y en otras ramas de la ciencia, etc.

A la hora de seleccionar una sonda de este tipo debe tenerse en consideración el tipo de conector. Los dos tipos son el modelo estándar, con pines redondos y el modelo miniatura, con pines chatos, siendo estos últimos (contradictoriamente al nombre de los primeros) los más populares.

Otro punto importante en la selección es el tipo de termopar, el aislamiento y la construcción de la sonda. Todos estos factores tienen un efecto en el rango de temperatura a medir, precisión y fiabilidad en las lecturas.

Tipos de termopares

Tipo K (cromel/alumel): con una amplia variedad aplicaciones, está disponible a un bajo costo y en una variedad de sondas. El cromel es una aleación de Ni-Cr, y el alumel es una aleación de Ni-Al. Tienen un rango de temperatura de -200 °C a $+1372$ °C y una sensibilidad 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ aproximadamente. Posee buena resistencia a la oxidación.

Tipo E (cromel/constantán [aleación de Cu-Ni]): no son magnéticos y gracias a su sensibilidad, son ideales para el uso en bajas temperaturas, en el ámbito criogénico. Tienen una sensibilidad de 68 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Tipo J (hierro/constantán): su rango de utilización es de $-270/+1200$ °C. Debido a sus características se recomienda su uso en atmósferas inertes, reductoras o en vacío, su uso continuado a 800 °C no presenta problemas, su principal inconveniente es la rápida

oxidación que sufre el hierro por encima de 550 °C; y por debajo de 0 °C es necesario tomar precauciones a causa de la condensación de vapor de agua sobre el hierro.

Tipo T (cobre/constantán): ideales para mediciones entre -200 y 260 °C. Resisten atmósferas húmedas, reductoras y oxidantes y son aplicables en criogenia. El tipo termopar de T tiene una sensibilidad de cerca de 43 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Tipo N (nicrosil [Ni-Cr-Si]/nasil [Ni-Si]): es adecuado para mediciones de alta temperatura gracias a su elevada estabilidad y resistencia a la oxidación de altas temperaturas, y no necesita del platino utilizado en los tipos B, R y S, que son más caros.

Por otro lado, los termopares tipo B, R y S son los más estables, pero debido a su baja sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ aprox.) generalmente son usados para medir altas temperaturas (superiores a 300 °C).

Tipo B (Pt-Rh): son adecuados para la medición de altas temperaturas superiores a 1800 °C. Los tipo B presentan el mismo resultado a 0 °C y 42 °C debido a su curva de temperatura/voltaje, limitando así su uso a temperaturas por encima de 50 °C.

Tipo R (Pt-Rh): adecuados para la medición de temperaturas de hasta 1300 °C. Su baja sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) y su elevado precio quitan su atractivo.

Tipo S (Pt/Rh): ideales para mediciones de altas temperaturas hasta los 1300 °C, pero su baja sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) y su elevado precio lo convierten en un instrumento no adecuado para el uso general. Debido a su elevada estabilidad, el tipo S es utilizado para la calibración universal del punto de fusión del oro (1064,43 °C).

Los termopares con una baja sensibilidad, como en el caso de los tipos B, R y S, tienen además una resolución menor. La selección de termopares es importante para asegurarse que cubren el rango de temperaturas a determinar.

Precauciones y consideraciones al usar termopares

La mayor parte de los problemas de medición y errores con los termopares se deben a la falta de conocimientos del funcionamiento de los termopares. A continuación, un breve listado de los problemas más comunes que deben tenerse en cuenta.

Problemas de conexión

La mayoría de los errores de medición son causados por uniones no intencionales del termopar. Se debe tener en cuenta que cualquier contacto entre dos metales distintos creará una unión. Si lo que se desea es aumentar la longitud de las guías, se debe usar el tipo correcto del cable de extensión. Así por ejemplo, el tipo K corresponde al termopar K. Al usar otro tipo se introducirá una unión termopar. Cualquiera que sea el conector empleado debe estar hecho del material termopar correcto y su polaridad debe ser la adecuada. Lo más correcto es emplear conectores comerciales del mismo tipo que el termopar para evitar problemas.

Resistencia del cable

Para minimizar la desviación térmica y mejorar los tiempos de respuesta, los termopares están integrados con delgados cables. Esto puede causar que los termopares tengan una

alta resistencia, la cual puede hacer que sea sensible al ruido y también puede causar errores debidos a la resistencia del instrumento de medición. Una unión termopar típica expuesta con 0,25 mm tendrá una resistencia de cerca de 15 ohmios por metro. Si se necesitan termopares con delgadas guías o largos cables, conviene mantener las guías cortas y entonces usar el cable de extensión, el cual es más grueso (lo que significa una menor resistencia) ubicado entre el termopar y el instrumento de medición. Se recomienda medir la resistencia del termopar antes de utilizarlo. En nuestro caso esto no genera mayores inconvenientes ya que la los termopares tienen la conexión directa de los cables los cuales tienen la el diámetro correcto para no presentar resistencia además de la longitud justa para no presentar pérdidas.

Desajuste

El desajuste es el proceso de alterar accidentalmente la conformación del cable del termopar. La causa más común es la difusión de partículas atmosféricas en el metal a los extremos de la temperatura de operación. Otras causas son las impurezas y los químicos del aislante difundándose en el cable del termopar. Si se opera a elevadas temperaturas, se deben revisar las especificaciones del aislante de la sonda. Tenga en cuenta que uno de los criterios para calibrar un instrumento de medición, es que el patrón debe ser por lo menos 10 veces más preciso que el instrumento a calibrar. En nuestro caso el desajuste no se evidencia ya que los termopares están aislados.

Ruido

La salida de un termopar es una pequeña señal, así que es susceptible de error por ruido eléctrico. La mayoría de los instrumentos de medición rechazan cualquier modo de ruido (señales que están en el mismo cable o en ambos) así que el ruido puede ser minimizado al retorcer los cables para asegurarse que ambos recogen la misma señal de ruido. Si se opera en un ambiente extremadamente ruidoso (por ejemplo cerca de un gran motor), es necesario considerar usar un cable de extensión protegido. Si se sospecha de la recepción de ruido, primero se deben apagar todos los equipos sospechosos y comprobar si las lecturas cambian. Sin embargo, la solución más lógica es diseñar un filtro pasabajos (resistencia y condensador en serie) ya que es probable que la frecuencia del ruido (por ejemplo de un motor) sea mucho mayor a la frecuencia con que oscila la temperatura. O ponerle un repetidor después del termopar para que la señal en el cable sea mayor y que el equipo receptor este compensado para poder acoplar ese repetidor. En nuestro caso los ruidos no interfieren en forma considerable ya que los termopares usados cuentan con una malla metálica y aislada en toda la longitud del cable que lo protege de ruidos e interferencias del entorno.

Voltaje en modo común

Estos voltajes pueden ser causados tanto por una recepción inductiva (un problema cuando se mide la temperatura de partes del motor y transformadores) o por las uniones a conexiones terrestres. Un ejemplo típico de uniones a tierra sería la medición de un tubo

de agua caliente con un termopar sin aislamiento. Si existe alguna conexión terrestre pueden existir algunos voltios entre el tubo y la tierra del instrumento de medición. Estas señales están una vez más en el modo común (las mismas en ambos cables del termopar) así que no causarán ningún problema con la mayoría de los instrumentos siempre y cuando no sean demasiado grandes. Los voltajes del modo común pueden ser minimizados al usar los mismos recaudos del cableado establecidos para el ruido, y también al usar termopares aislados.

Ruido en modo serie

Si el sensor está expuesto a cables de alta tensión se puede presentar un voltaje que aparece en solo una de las líneas de este, este ruido se puede disminuir transmitiendo la señal en corriente.

Desviación térmica

Al calentar la masa de los termopares se extrae energía que afectará a la temperatura que se trata determinar. Considérese por ejemplo, medir la temperatura de un líquido en un tubo de ensayo: existen dos problemas potenciales. El primero es que la energía del calor viajará hasta el cable del termopar y se disipará hacia la atmósfera reduciendo así la temperatura del líquido alrededor de los cables. Un problema similar puede ocurrir si un termopar no está suficientemente inmerso en el líquido, debido a un ambiente de temperatura de aire más frío en los cables, la conducción térmica puede causar que la unión del termopar esté a una temperatura diferente del líquido mismo. En este ejemplo, un termopar con cables más delgados puede ser útil, ya que causará un gradiente de temperatura más pronunciado a lo largo del cable del termopar en la unión entre el líquido y el aire del ambiente. Si se emplean termopares con cables delgados, se debe prestar atención a la resistencia de la guía. El uso de un termopar con cables delgados conectados a un termopar de extensión mucho más gruesa a menudo ofrece el mejor resultado.

Termistor

Un termistor es un sensor de temperatura por resistencia. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. El término termistor proviene de Thermally Sensitive Resistor.

Existen dos tipos de termistor:

NTC (Negative Temperature Coefficient) – coeficiente de temperatura negativo.

PTC (Positive Temperature Coefficient) – coeficiente de temperatura positivo (también llamado posistor).

Cuando la temperatura aumenta, los tipo PTC aumentan su resistencia y los NTC la disminuyen.

El funcionamiento se basa en la variación de la resistencia del semiconductor debido al cambio de la temperatura ambiente, creando una variación en la concentración de portadores. Para los termistores NTC, al aumentar la temperatura, aumentará también la concentración de portadores, por lo que la resistencia será menor, de ahí que el coeficiente sea negativo. Para los termistores PTC, en el caso de un semiconductor con un dopado muy intenso, éste adquirirá propiedades metálicas, tomando un coeficiente positivo en un margen de temperatura limitado. Usualmente, los termistores se fabrican a

partir de óxidos semiconductores, tales como el óxido férrico, el óxido de níquel, o el óxido de cobalto.

Sin embargo, a diferencia de los sensores RTD, la variación de la resistencia con la temperatura no es lineal. Para un termistor NTC, la característica es hiperbólica. Para pequeños incrementos de temperatura, se darán grandes incrementos de resistencia. Por ejemplo, el siguiente modelo caracteriza la relación entre la temperatura y la resistencia mediante dos parámetros:

$$R_t = A * e^{\frac{B}{T}}$$

Ec. 6

$$A = R_0 * e^{-\frac{B}{T_0}}$$

Donde:

- R_t es la resistencia del termistor NTC a la temperatura T[K]
- R_0 es la resistencia del termistor NTC a la temperatura de referencia T_0 [K]
- B es la temperatura característica del material, entre 2000 K y 5000 K.

Por analogía a los sensores RTD, podría definirse un coeficiente de temperatura equivalente α , que para el modelo de dos parámetros quedaría:

$$\alpha = \frac{1}{R_t} * \frac{dR_t}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

Ec. 7

Puede observarse como el valor de este coeficiente varía con la temperatura. Por ejemplo, para un termistor NTC con $B = 4000 \text{ K}$ y $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, se tendrá un coeficiente equivalente $\alpha = -0.045 \text{ K}^{-1}$, que será diez veces superior a la sensibilidad de un sensor Pt100 con $\alpha = 0.00385 \text{ K}^{-1}$

Diseño e implementación.

Circuito implementado para el termopar.

Después de del análisis de los diferentes tipos de termopares, el análisis de costos y sobretodo la disponibilidad en el mercado. Se determino el uso de termopares tipo J aislados.

Estos presentan una ventaja de mucha importancia en nuestra aplicación que está dada por el hecho de ser aislada. Esto hace a que sea menos vulnerable a los distintos tipos de ruidos presentes en el chasis de los hornos. Además se determino el uso de un termopar que presenta una cubierta de acero de 8mm de diámetro y 100mm de longitud y con cables mallados de 2 metros de longitud, esto es importante en varios aspectos:

- Es una medida estándar y en caso de necesitar un reemplazo es de fácil adquisición.
- Es de acero inoxidable, el cual no se oxida a pesar de los vapores presentes dentro la cámara de cocción donde se la debe colocar para censar la temperatura.
- Posee cable mallado aislado, esto es muy importante para evitar interferencias en la lectura y tener valores erróneos, ya que desde el punto de censado hasta la electrónica tiene una extensión de 2 metros.

Uno de los inconvenientes más importantes del uso de termopares es que se debe utilizar circuitos amplificadores precisos ya que el termopar a fondo de escala presenta unos pocos milivoltios de salida. Este es de 40[mV], lo que hace necesario tener mucho cuidado en el diseño del mismo o de lo contrario los valores obtenidos serán erróneos. La linealización se acentuó en el rango de funcionamiento del horno, es decir para valores de 100-300 [°C]. Este valor está limitado para no sobre exigir la estructura metálica de los hornos. En la Fig. 15. Se observa el circuito implementado.

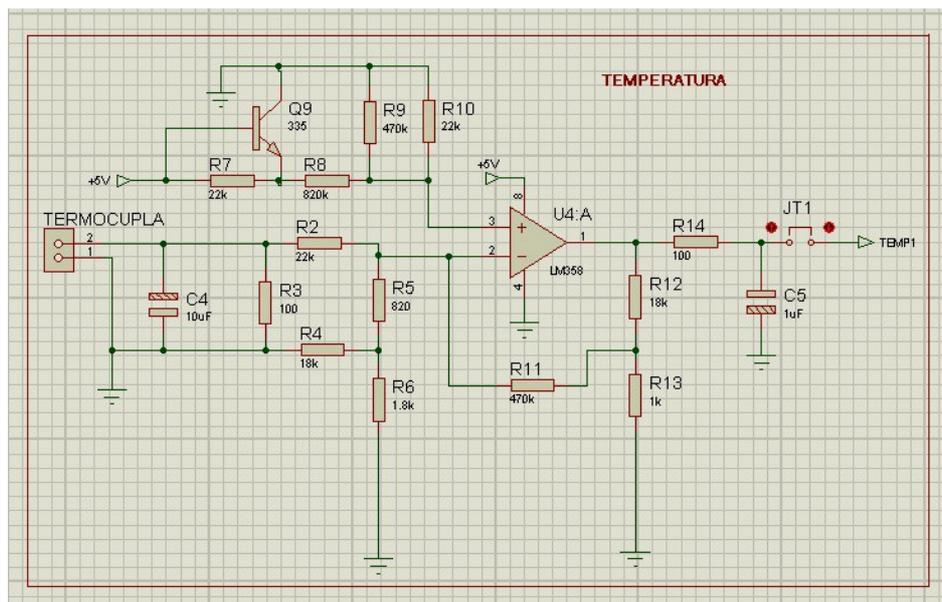


Fig. 15. Circuito para el termopar

Circuito implementado para el termistor

Para mejorar la lectura se emplea compensación de unión fría. Esto es llevado a cabo mediante la utilización de un termistor.

La lectura que realiza el termistor es llevada a cabo justo al lado de la bornera de conexión de la termocúpla a la placa electrónica. Esto se debe hacer ya que en este punto la temperatura generalmente es mayor que la ambiente, es decir si no se tuviera en cuenta este valor, a medida que la cámara aumente su temperatura, la temperatura mostrada en el Display tendría un error de signo negativo. Por este motivo se realiza una medición constante en el punto de conexión y se agrega como otra entrada al microcontrolador para evitar estos errores de compensación.

El circuito implementado se muestra en la Fig. 16.

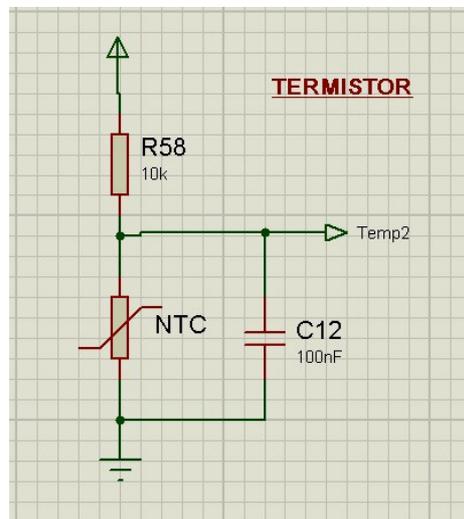


Fig. 16. Circuito para el termistor

El sistema utilizado para la generación de calor es del tipo ON/OFF con histéresis. Es decir cuando el sistema logra la temperatura desconecta el generador de calor, por lo tanto esta irá disminuyendo, luego que la temperatura pase por debajo del nivel de histéresis configurado (en nuestro caso 4 °C) el sistema activa el generador de calor nuevamente.

Cabe aclarar que se pueden utilizar diferentes sistemas de control para este tipo de aplicaciones como por ejemplo P, PI, PID pero son más sofisticados y costosos y en nuestra aplicación no tendría relevancia ya que la inercia térmica de estos hornos es grande y un control más exhaustivo no surtiría efecto.

De modo que aplicando simplemente un sistema ON/OFF con histéresis el sistema funciona de manera adecuada. La histéresis se programa directamente en el microcontrolador dado a que el valor configurado sale del análisis previo de años de experiencia.

Fuente de alimentación

Se utiliza una fuente lineal, para ello se hace uso de un transformador de 220VCA a 12VCA con una salida de 1A. Esta tensión es rectificada mediante un puente de diodos, rectificación de onda completa y luego filtrada con un capacitor para minimizar el rizado, luego con reguladores lineales como LM7812 y LM7805 obtengo las tensiones estabilizadas para trabajar. En la Fig. 17. Se observa el circuito implementado, excepto el transformador el cual se ubica fuera de la placa de control y es conectado a la misma mediante una bornera de conexión.

Una parte importante de la fuente de alimentación es el filtrado de EMI (interferencias electro magnéticas), para lo cual después de un análisis previo a prueba/error se opto por utilizar un filtro RC acompañado de varistores, esto fue analizado en otras aplicaciones en los mismos hornos como son temporizadores y pirómetros digitales. El estudio del filtrado es muy complejo y depende exclusivamente de cada aplicación, por lo cual se analizo en prácticas previas durante un tiempo considerable los distintos tipos y componentes para realizar el filtrado adecuado para esta aplicación.

También cuenta con un Poliswitch para protección en caso de producirse un cortocircuito dentro la placa, evitando así daños a componentes. El Poliswitch es un dispositivo electrónico que se comporta como un fusible, el cual en caso de producirse un cortocircuito, se abre liberando la energía de entrada evitando dañar algún componente interno a la placa y cuando se restablece el cortocircuito, este se cierra automáticamente dejando en funcionamiento normal el resto del circuito.

En caso de no utilizar el correcto acondicionamiento de la señal de alimentación lo que suele ocurrir es que el microcontrolador se resetea volviendo al estado de reposo, lo cual no es aceptable bajo ninguna circunstancia. O puede darse el caso de malas lecturas de temperatura, titileo de los displays, y en el peor de los casos activar alguna salida sin ser debido.

Parte importante para el correcto funcionamiento del sistema es la utilización de opto acopladores de aislamiento para entradas y salidas. Con esto más un desarrollo adecuado en el filtrado de alimentación se logra un sistema estable y robusto frente a la mayoría de agentes externos maliciosos que perturban el correcto funcionamiento del sistema.

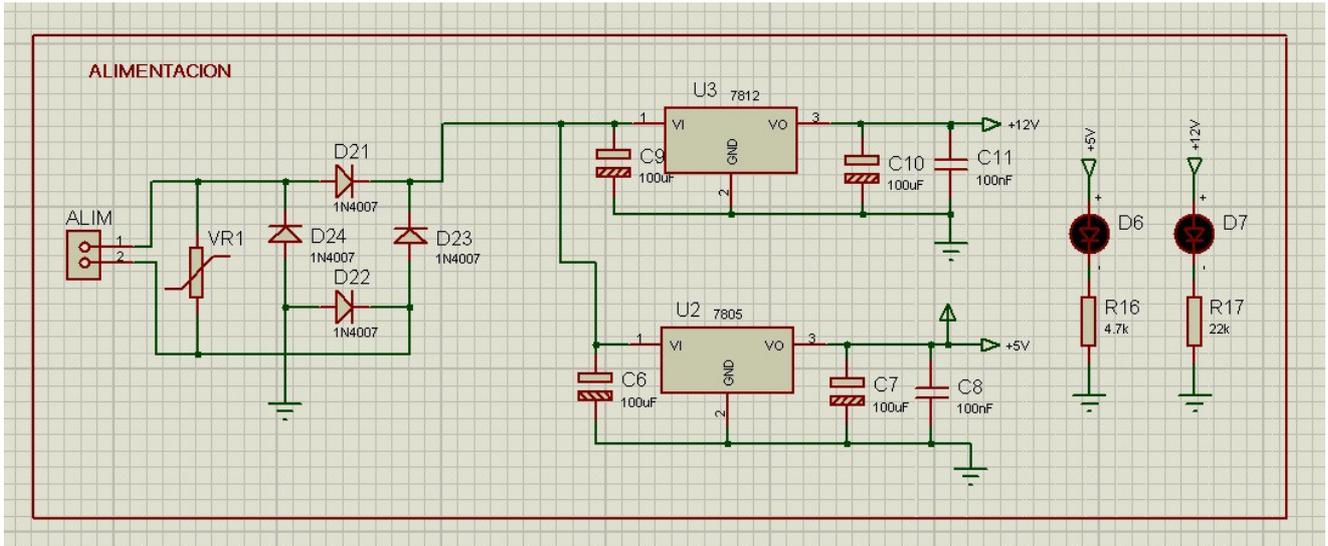


Fig. 17. Fuente de alimentación

Manejo de potencia

El manejo de potencia se lleva a cabo mediante contactores los cuales son activos con salidas optoacopladas para evitar cualquier tipo de interferencia que ocasionan mal funcionamiento en la parte de control.

El uso del optoacoplador es indispensable ya que separa ópticamente a los circuitos de control y de potencia. De esta forma se logra que las corrientes parasitas que se generan en la bobina del contactor (denominada generalmente chispa) no se propaguen al circuito. Esto también se observa en el accionamiento de la electroválvula para generar vapor. De la misma forma se acopla ópticamente las entradas para de esta manera dejar descartado el ingreso de señales indeseables que puedan perturbar el buen funcionamiento del sistema.

A continuación desarrollo un circuito con las partes operantes, y al final se adjuntan las hojas de datos de cada uno.

Hay varios tipos de opto acopladores, los cuales difieren en su etapa de salida, los hay con salida a transistor, Darlington, FET, SCR, TRIAC, Schmitt trigger, etc. Yo usare el modelo CNY 74-4 el cual cuenta con 4 canales independientes con salida a transistor.

Circuito de testeo (Hoja de datos)

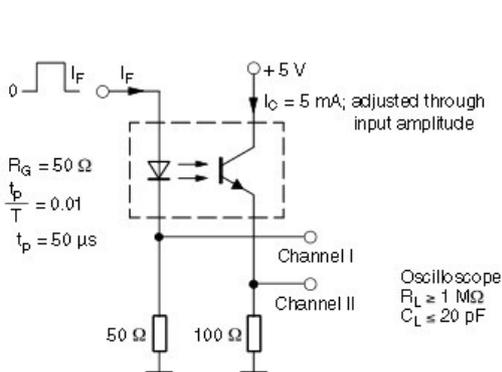


Fig. 3 - Test Circuit, Non-Saturated Operation

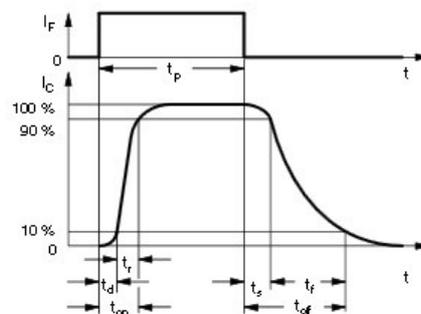


Fig. 5 - Switching Times

Circuito implementado para salida

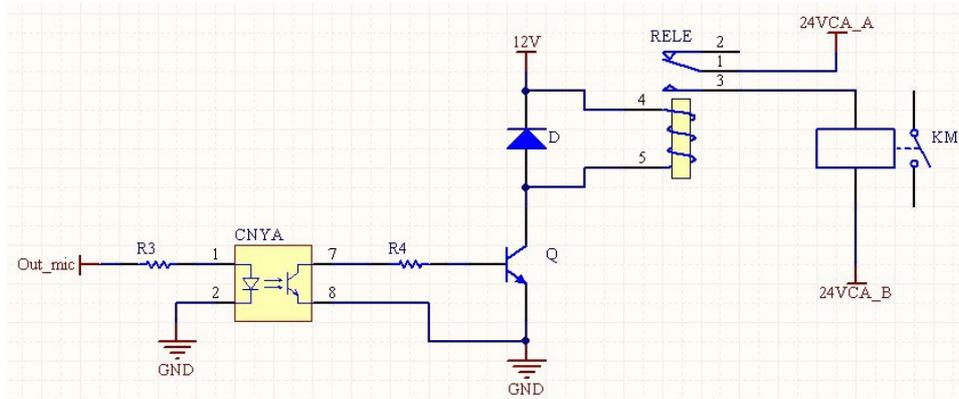


Fig. 18. Circuito de salida

En este circuito la activación la da la salida del microcontrolador la cual tiene una resistencia R3 para la correcta polarización del opto-diodo del optoacoplador (Fig. 18). A la salida de este conectamos un transistor NPN el cual sin excitación en la base está cortado y no conduce por lo que el RELE está en estado de reposo y por lo tanto el contactor con bobina KM también lo estará. Si se excita la base del transistor con una corriente suficiente (para ello está la resistencia “R4”) el transistor conducirá activando el RELE por lo que cerrara el circuito del contactor también. En el circuito se puede observar que las tensiones de trabajo de cada componente. El diodo “D” esta en anti paralelo a la bobina del RELE para desenganchar correctamente la bobina del mismo al quitar la excitación del transistor. El circuito implementado para todas las salidas se observa en la Fig. 19.

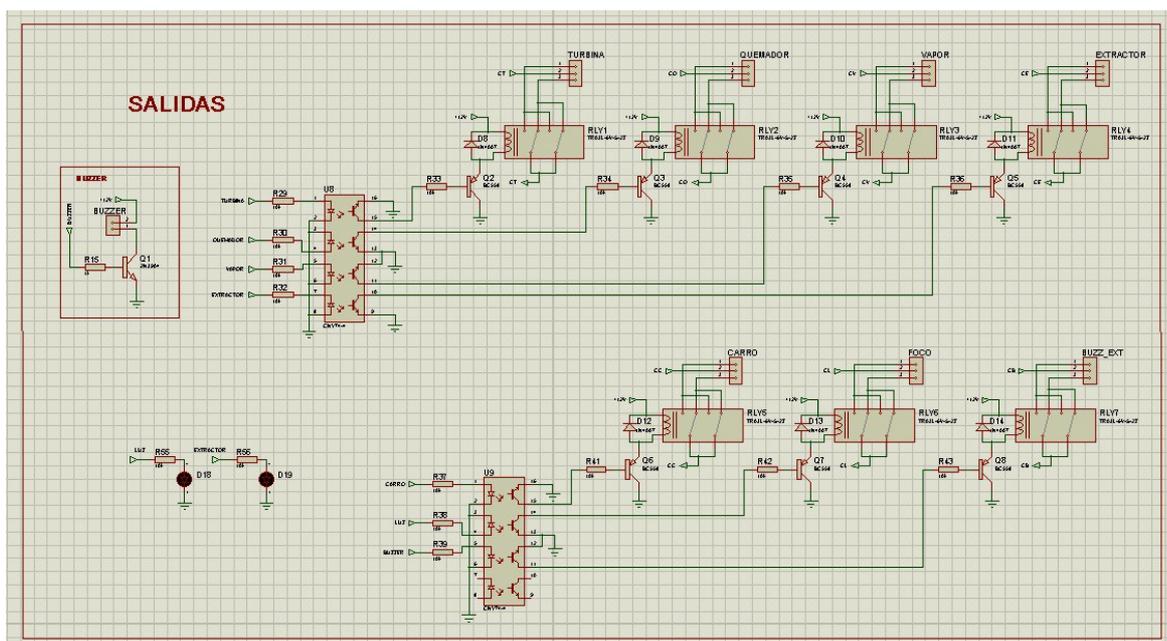


Fig. 19. Circuito implementado para la salida

Los contactores utilizados poseen bobinas de 24VCA haciéndolos adecuados para normas de seguridad exigentes. De este modo todos los componentes del sistema de control son comandados por baja tensión. Aumentando así la seguridad para los usuarios. En la implementación se opta por adicionar tanto al contactor de la turbina como al del carro un relé térmico, esto es para asegurar que en caso de por desgaste mecánico, por alguna circunstancia se trabase alguno de ellos, el motor sea protegido por este relé y no se quemara.

Relé térmico

Se determina utilizar una marca conocida a nivel mundial para evitar inconvenientes con los reemplazos. Se utiliza relevos y contactores de la misma marca comercial “SIEMENS” modelo 3RU1116 del se adjunta la hoja de datos al final. Un relevo térmico es un dispositivo de protección el cual en estado normal mantiene cerrado sus contactos dejando circular corriente, esta corriente es graduada y a va acorde al dispositivo protegido. En caso que dicha corriente es superada, el relevo abre sus contactos desacoplando la entrada de la salida de modo que el dispositivo no se queme por exceso de corriente. En caso que el relevo sea activo se pueden configurar dos alternativas para restablecer el funcionamiento normal:

1. Configurar el relevo en forma manual, situación en la cual para el usuario debe pulsar una tecla en el mismo relevo para que este se reactive, siempre y cuando se solucione previamente la anomalía.
2. Modo automático, en este el relevo se restablece automáticamente si pasado cierto tiempo se restablece la anomalía. En este caso se debe tener en cuenta que si el dispositivo es un motor como nuestro caso el mismo se activara, de manera que se debe tener especial cuidado en el manejo cuando se utilice este modo.

Circuito implementado para entrada

De igual manera al método empleado para conectar las salidas, se emplean optoacopladores para las entradas. De esta manera también se minimizan las posibilidades de que ocurran interferencias y mal funcionamiento del sistema. Esquema de acoplamiento utilizando un optoacoplador con salida a transistor como lo es el CNY74-4 de la Fig. 20.

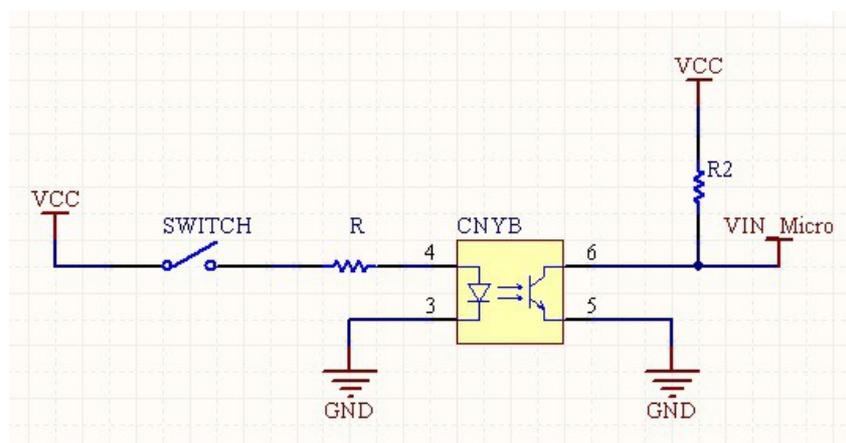


Fig. 20. Circuito de entrada

Las entradas también son causantes de mal funcionamiento si no están correctamente aisladas. Por lo cual el diseño también lo tiene en cuenta y al utilizar acople óptico se asegura que no abra interferencia y mal funcionamiento en el control.

El circuito implementado es el mostrado en la Fig. 21. En este V_{cc} es de 12VCC y mediante la resistencia R se regula una corriente de 50mA para la correcta polarización del opto-diodo y la salida está configurada para lógica negada la cual presenta en ausencia de excitación este en un valor “alto” y en conducción tenga un calor lógico de “cero”, que es la entrada al microcontrolador.

De esta manera se logra desligar eléctricamente las partes de contacto mecánico-electrico con la placa de control.

Cabe aclarar que tanto las entradas como salidas están montadas sobre la misma placa de control, de este modo también minimizamos posibilidades de que se introduzca algún tipo de interferencia por algún cable de conexión. De modo que el sistema es concebido con los mayores recaudos frente a las posibilidades de mal funcionamiento, haciéndolo muy robusto para la aplicación en cualquier horno rotativo del mercado.

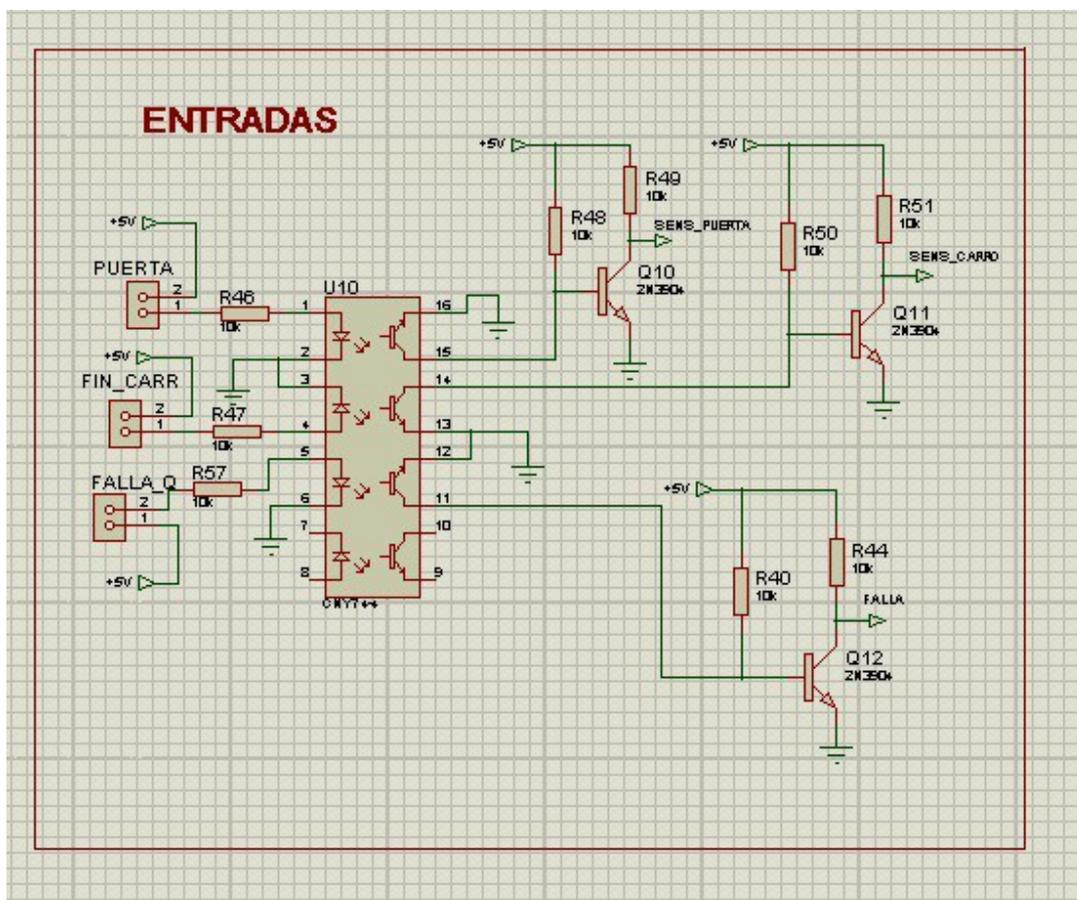


Fig.21. circuito implementado para la entrada

Circuito del microcontrolador

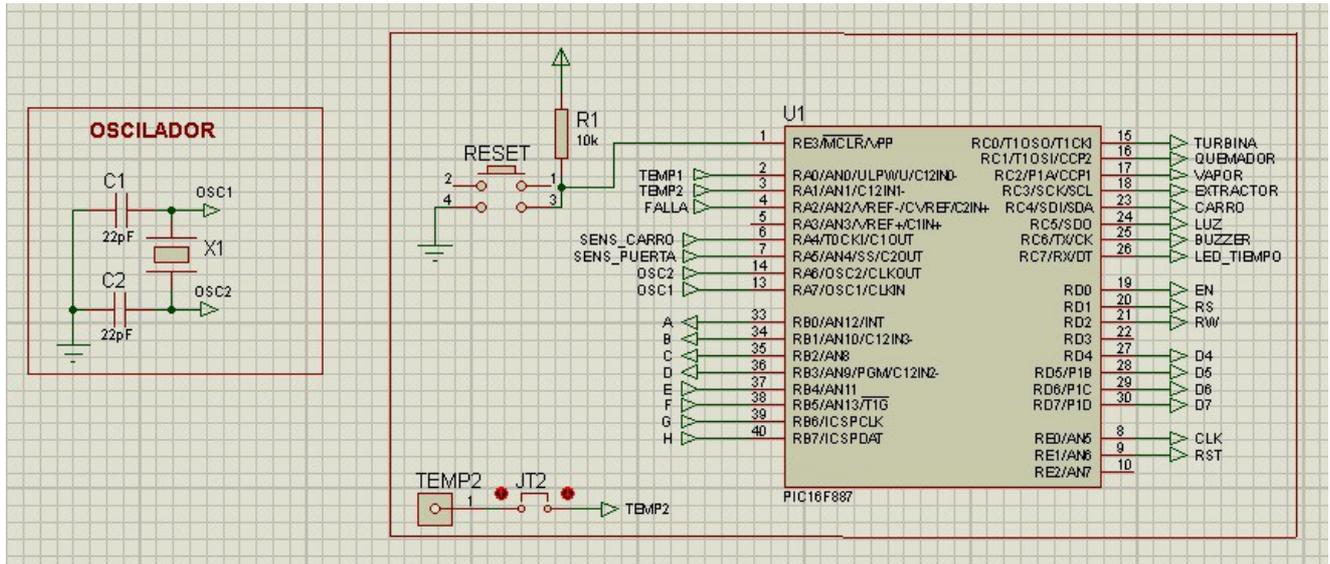


Fig. 22. Circuito implementado para el microcontrolador

Como se declaro anteriormente se utiliza el microcontrolador PIC16F887 de Microchip el cual es de 8 bits que se adapta correctamente a este control. Se utiliza un oscilador a cristal de 20[Mhz] con la configuración como se observa en la Fig. 22. También se deja un switch de reset para el micro, este en modo normal de funcionamiento no será utilizado, pero puede ser utilizado en la etapa de configuración inicial al momento de puesta en marcha del horno. La visualización para el Display LCD se configura como se detalla en la Fig. 23 donde se muestra una conexión directa entre este y el microcontrolador el cual es el que lo comanda.

Circuito para el LCD

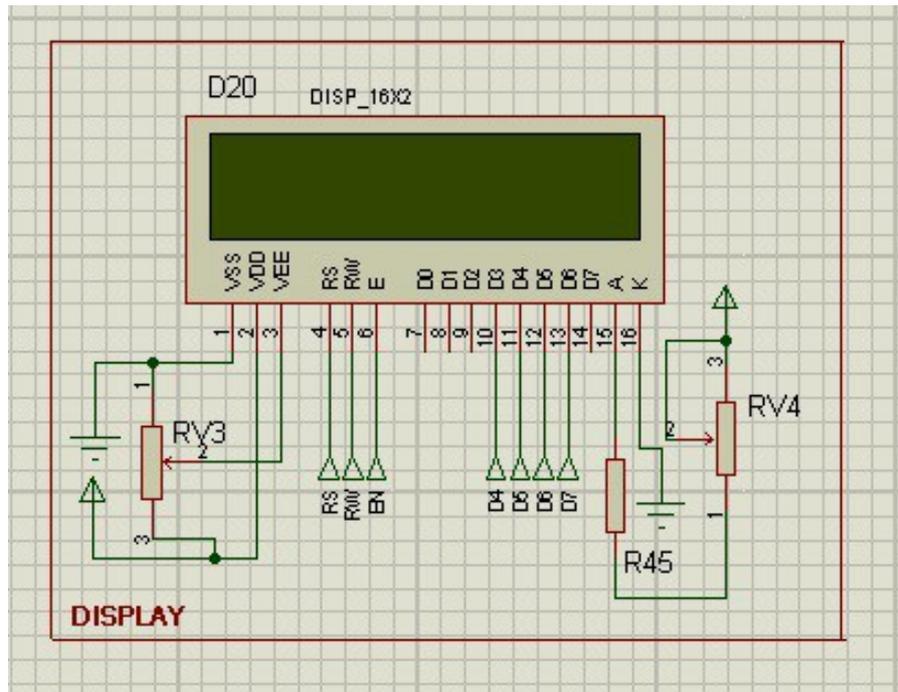


Fig. 23. Circuito implementado para el LCD

Se observa en la Fig. 23 el conexionado directo del Display LCD al Microcontrolador, mediante una rutina de programa se logra visualizar los parámetros deseados en el Display sin necesidad de agregar circuitería adicional.

Circuito para el teclado

En la Fig. 24 se visualiza el conexionado de los switch para modificar cada parámetro, este forma en conjunto forma un teclado matricial, donde se multiplexan datos de modo de ahorrar entradas/salidas del microcontrolador, de lo contrario se necesitaría uno con mayor cantidad de pines de conexión lo cual no es necesario y una inversión en microcontroladores de mayor costo.

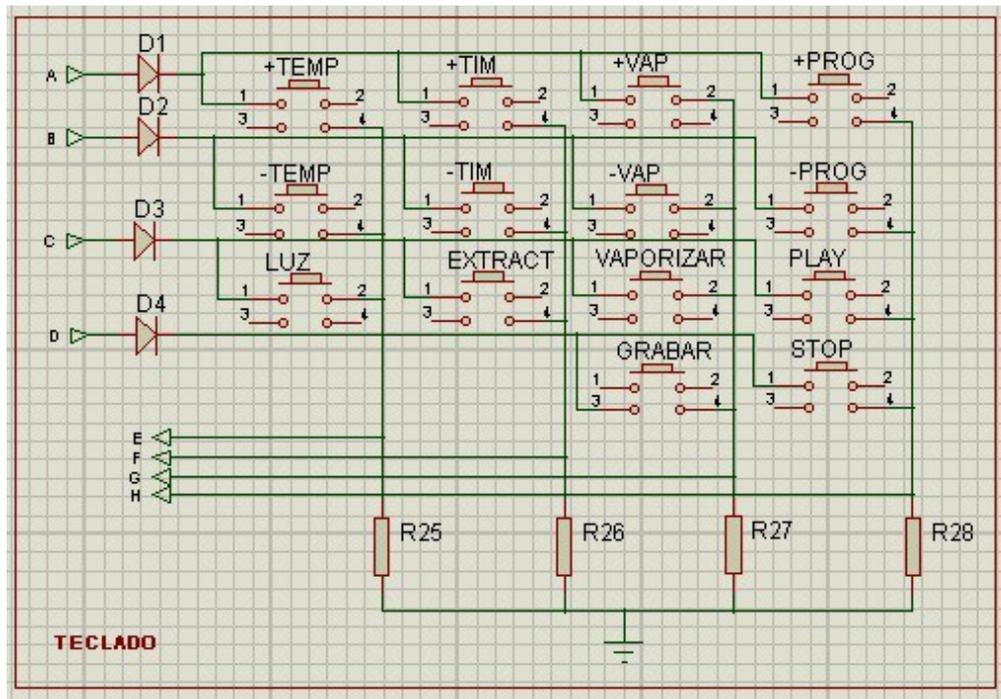


Fig. 24. Circuito implementado para el teclado

Circuito implementado para visualización de parámetros

De igual manera de multiplexado de datos utilizado para el teclado se procede para la visualización de datos en los Display 7-segmentos correspondientes a la temperatura, tiempo y tiempo de vapor respectivamente. Para esto se emplea un dispositivo conversor BCD a 7 segmentos como lo es el CD4511 y además se agrega un driver como lo es el ULN2803 para aumentar la corriente de manera de no sobre exigir al microcontrolador ya que son varios los displays conectados.

En este caso los displays 7-segmentos utilizados son cátodo común de .56" de color rojo de alto brillo para que se visualice en forma clara en espacios grandes como ser una panadería.

El circuito completo se puede observar en la Fig. 25.

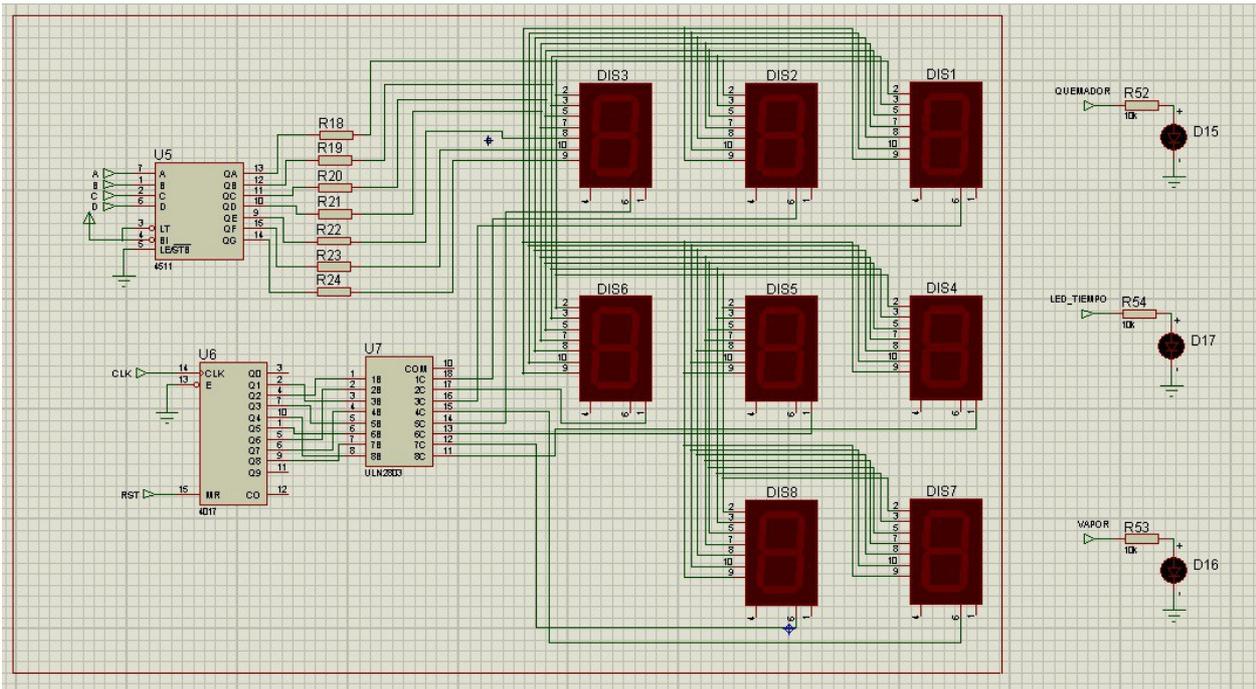


Fig. 25. Circuito implementado para la visualización

PCB

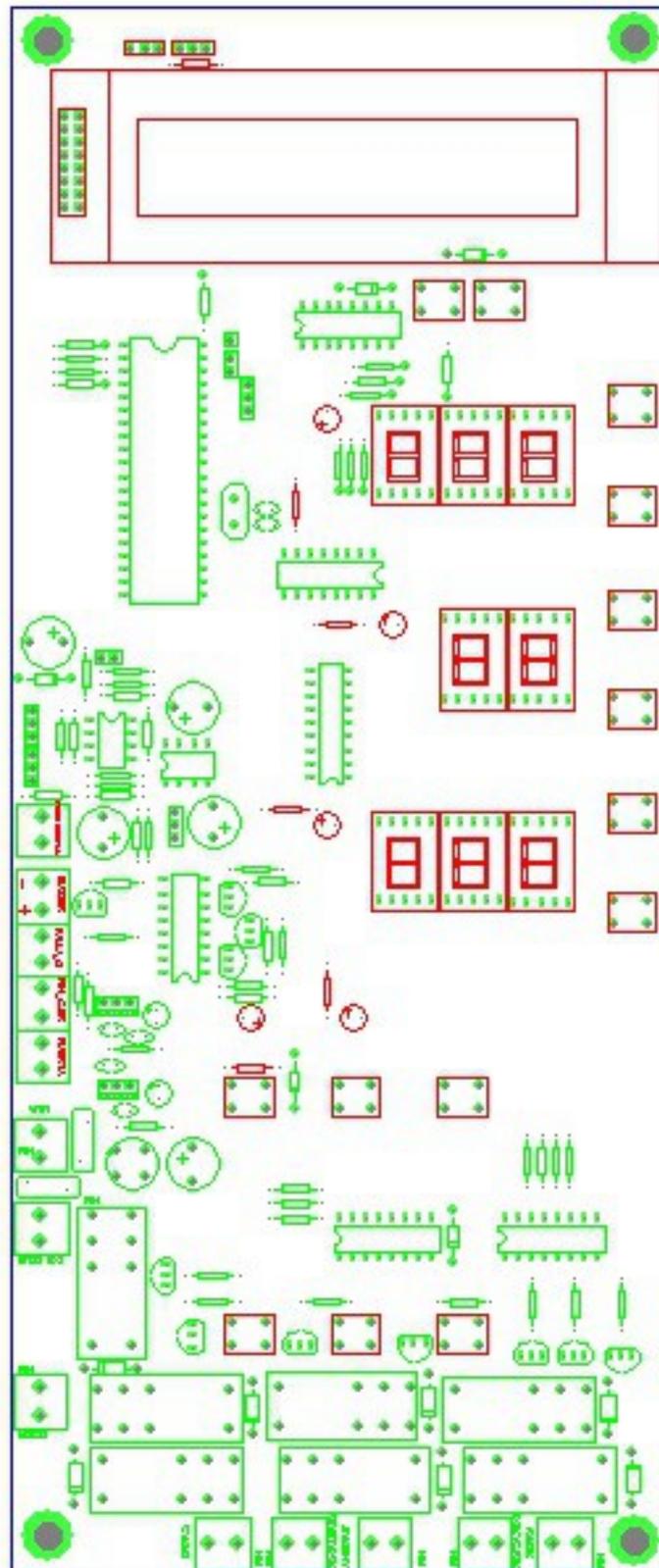


Fig. 26. PCB

En la Fig. 26 se observa el PCB, este es el diseño de la plaqueta del control. Esto se realiza mediante computadora y luego se imprime sobre una placa de fibra de vidrio o material epoxi el cual contiene una película de cobre que servirá luego de conductor. En este caso la fabricación de la plaqueta es totalmente industrializada, realizada en la ciudad de Buenos Aires por una compañía con muchos años de experiencia en el rubro. La cual es elegida por años de trayectoria y calidad del producto terminado. La placa es elaborada en material Epoxi, de doble Faz. Cuenta con through hole, este un sistema de metalizado de agujeros para que ambas caras de la plaqueta se unan en todos los agujeros, de esta forma se puede realizar la soldadura en ambas caras sin inconvenientes. También la plaqueta posee impresión de los componentes para fácil ubicación y montaje de cada uno como así también se le realizó una terminación de mascara, esto es para evitar desplazamiento de material de soldadura a lugares no deseados, y también de esta forma se evita oxidación del cobre conductor. Para el desarrollo del circuito y placa se utilizo el programa "PROTEUS".

Manejo del programa

Se adjunta al final el diagrama de flujo.

Primeramente se debe energizar el tablero mediante una llave seccionadora. La primera vez que se lo hace se visualizara en los displays temperatura “333”, en los de vapor “22” y en los displays de tiempo “111” y luego pasara al estado normal de funcionamiento.

Al inicializar el sistema muestra:

- LCD: Ultimo programa utilizado.
- Display temperatura: Por 5 segundos muestra el último valor configurado, el cual corresponde al programa actual. Y luego muestra la temperatura actual de la cámara de cocción.
- Display Tiempo de vapor: muestra el último valor guardado, el cual corresponde al programa actual.
- Display Tiempo: muestra el último valor guardado que corresponde al programa actual.

En el primer encendido todos los valores serán ceros. Una vez que se hayan modificado estos serán guardados en memoria de cada Programas, el cual una vez configurado simplemente con una tecla “PLAY” será ejecutado.

Una vez inicializado el sistema se puede pasar de un programa a otro mediante los pulsadores para este fin, se puede avanzar o retroceder hasta encontrar el programa deseado, el sistema cuenta con diez programas genéricos (programa1, programa2...) y seguidamente continúan programas prenombrados, pan francés, pan flauta...

Una vez seleccionado el programa, se le debe determinar la temperatura de cocción, tiempo de vapor y tiempo de cocción. Para guardar los valores se debe pulsar la tecla “Guardar”.

Una vez guardado los valores para cada programa no se borran si se quita la energía, es decir quedan guardados permanentemente (en memoria no volátil) y se puede ejecutar dicho programa en cualquier momento simplemente pulsando la tecla “PLAY”

De esta manera el usuario puede tener varios programas preestablecidos y los puede ejecutar en cualquier momento simplemente pulsando una tecla.

Una vez que el usuario energiza el sistema, el sistema automáticamente llevara el horno a la temperatura que este seleccionada es decir, la que corresponda al programa actual. Esto solamente ocurrirá si la puerta se encuentra cerrada. De lo contrario no se ejecutara ninguna acción.

Cuando el usuario haya seleccionado el programa a ejecutar, debe cerrar la puerta y pulsar la tecla “PLAY”. En ese momento se ejecutara el programa de la siguiente manera:

- Comenzara a descontar el tiempo de programa, el cual se configura en minutos y luego de pasar por debajo de 1 minuto, comenzara a mostrar los segundos restantes. Para saber si está corriendo el tiempo se podrá visualizar en un led parpadeante que se encuentra en la parte izquierda de los displays.
- Al mismo momento que comienza a contar el tiempo de programa, se activa el sistema de vapor de acuerdo al tiempo configurado en “Tiempo de vapor”, a la vez desactiva la turbina y el quemador, esto es para que el aire a presión no influya sobre el vapor y este pueda cumplir su función. Luego de cumplido el tiempo se desactiva la salida de electroválvula de vapor y mantendrá desactiva la turbina y quemador por un tiempo (pre configurado en fabrica, de 12/15 segundos) “tiempo de stand-by”. El tiempo de vapor se verá en forma decreciente en los displays, a la vez se mostrara un led encendido para indicar la activación de la electroválvula. También al inicializar se activa el sistema de giro del carro.

- Luego se activa la turbina.
- El quemador es comandado por la temperatura leída por la termocúpla constantemente en el interior de la cámara de cocción, en caso que esta sea menor que la programada, el quemador será activo hasta alcanzar dicho valor luego se desactiva. Cuando la temperatura de la cámara disminuya 4 grados por debajo de la configurada arrancará nuevamente. El quemador arrancará solamente cuando la turbina este en funcionamiento. La activación del quemador se verá en un led dispuesto al costado izquierdo de los displays de temperatura.
- En caso que se proceda abrir la puerta en cualquier momento, se producen dos acciones, por un lado se desactiva la turbina y quemador y por otro se enciende la luz interior de cámara y el extractor (ambos serán visibles en el tablero mediante leds). El extractor es un dispositivo que está diseñado para extraer el vapor a alta temperatura que es expulsado al abrir la puerta. En este tiempo que la puerta este abierta, el tiempo de programa seguirá corriendo normalmente.
- Cuando se cierra la puerta el programa vuelve a su ejecución normal, es decir apaga el extractor, pero no la luz, esta se debe desactivar mediante el pulsador “LUZ” y se activa la turbina y el quemador nuevamente será comandado por la termocúpla.
- Si el usuario desea proveer nuevamente vapor en cualquier momento de ejecución de programa, lo puede hacer desde el pulsador “VAPOR” el cual presionando una vez activa la electroválvula y pulsando nuevamente la desactiva. Siempre que se active el vapor se desactiva la turbina, esto es porque sino todo el vapor generado será impulsado al exterior por la corriente de aire del interior de la cámara. Cuando se termine de ejecutar el vapor, el sistema dará el tiempo de stand-by necesario antes de volver a la ejecución del programa. Tampoco se modifica el tiempo de ejecución de programa.
- Una vez cumplido el tiempo de programa, se activa un buzzer para informar que se ha cumplido el programa, también se activa en forma intermitente la luz de la cámara de cocción.
- Para desactivar el aviso y confirmar el cumplimiento de programa se debe pulsar la tecla “STOP”. Esto lo único que hace es desactivar el buzzer y la luz de cámara. Pero la temperatura será mantenida para ejecutar nuevamente el programa.
- Para retirar el producto terminado se procede a abrir la puerta, teniendo el cuidado necesario para que el vapor excedente produzca alguna quemadura. Al abrir la puerta se desactiva la turbina y el quemador, también se encenderá el extractor y la luz de cámara.
- Se debe esperar un instante para que el carro se detenga en la posición de salida, de otra manera no se podrá retirarlo. Para esto el sistema cuenta con un sensor de posicionamiento.
- Una vez retirada la mercadería el horno está en condiciones de producir otra vez la misma receta o cambiarla y ejecutar otra que el usuario desee.

De esta manera se puede observar que el manejo del sistema es muy sencillo, de fácil interpretación y configuración. Así el sistema puede ser utilizado por el operario que usa cualquier otro horno de características similares sin más que leer el instructivo y una capacitación simple adjunta con el manual de uso del horno.

Resultados

Se desarrollo el proyecto completo, se implemento y se lo puso a prueba obteniendo resultados satisfactorios para diversos usuarios. Se implemento sin el frente dado a que este será diseñado acorde a cada usuario al momento de la colocación acorde al modelo requerido.

El funcionamiento de prueba permitió determinar el correcto funcionamiento del sistema bajo las condiciones analizadas durante la etapa de investigación.

El funcionamiento de la programación y ejecución de los programas funcionan correctamente y son de fácil interpretación y utilización por parte de los operarios del horno.

El sistema es inmune a los ruidos externos, demostrando que la elección de opto acoplar entradas y salidas fue la correcta y que el circuito de lectura de temperatura fue el correcto, haciéndolo robusto y confiable.

La lectura de la temperatura es correcta y presenta una desviación menor de 2% respecto al instrumento patrón utilizado para la medición, siendo esta medida lo suficientemente correcta para nuestra aplicación.

El instrumento utilizado para realizar la medición de temperatura patrón es un DT-6830 marca Sinometer.

A continuación se muestra la tabla de valores de lectura de temperatura leída por el instrumento patrón y nuestro proyecto.

$$e_{\text{relativo}} = \frac{\text{valor medido} - \text{valor patrón}}{\text{valor patrón}}$$

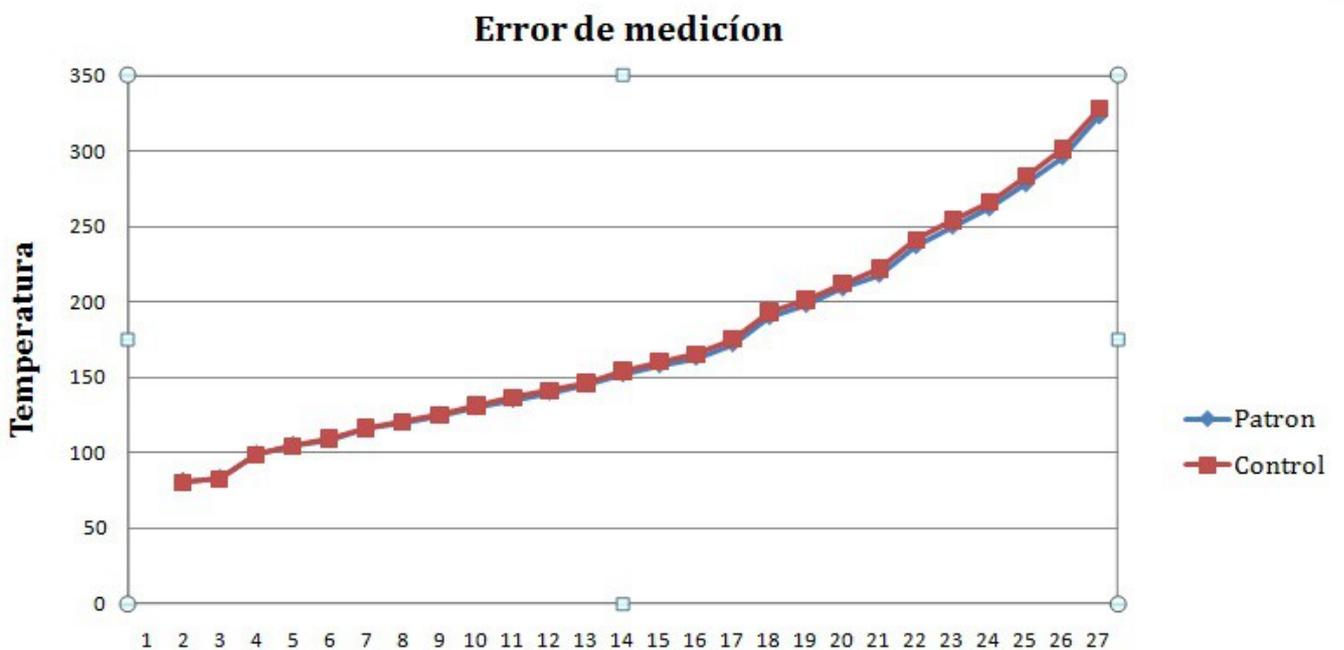
Ec. 8

Tabla de valores para la temperatura

Instrumento patrón	Control	Error relativo [%]
345	350	1.43
323	328	1.52
296	301	1.66
278	283	1.76
262	266	1.5
250	254	1.57
237	241	1.66
218	222	1.8
209	212	1.41
198	201	1.49
190	193	1.55
172	175	1.71
163	165	1.21

158	160	1.3
152	154	1.3
145	146	0.68
140	141	0.8
135	136	0.73
130	131	0.76
125	125	0
120	120	0
116	116	0
109	109	0
105	104	-0.96
99	98	-1.02
83	82	-1.22
81	80	-1.25

Tabla 2. Tabla de medición de temperatura



Análisis de costos

Cantidad	Descripción	Costos unidad	Total U\$S
55	Resistencia ¼ [W]	0.008	0.448
2	Capacitor cerámico 22[pF]	0.017	0.034
4	Capacitor cerámico 100[nF]	0.020	0.08
1	Capacitor 1000[uFx35V]	0.12	0.12
2	Capacitor 100[uFx35V]	0.12	0.24
1	Capacitor 10[uFx35V]	0.12	0.12
1	Capacitor 1[uFx35V]	0.12	0.12
7	Diodo rectificador 1N4007	0.18	1.26
5	Diodo rápido 1N4148	0.18	0.9
7	Diodo led	0.044	0.308
4	Transistor 2N3904	0.04	0.16
7	Transistor BC558	0.03	0.21
1	Driver arreglo Darlington ULN2803	0.55	0.55
1	CD4511 conversor BCD-7 Segmentos	0.34	0.34
1	CD4017 contador/divisor	0.29	0.29
8	Display 7 segmentos 0.56" rojo súper brillo	0.48	3.84
1	Display LCD 2x20 caracteres	10.70	10.70
1	Microcontrolador PIC16F887	3.73	3.73
15	Tact switch 6x6x12.5mm	0.062	0.93
1	LM7805 regulador 5 voltios	0.30	0.30
1	LM7812 regulador 12 voltios	0.30	0.30
1	W10M Puente de diodo	0.19	0.19
6	Bornera de 2 polos	0.33	1.98
7	Bornera de 3 polos	0.49	3.43
7	Relé doble inversor bobina 12V 5A/250V	1.95	13.65
4	Zócalo 2x8	0.05	0.2
1	Zócalo 2x20	0.17	0.17
1	Varistor oxido metálico	0.12	0.12
1	Cristal resonador 20Mhz	0.22	0.22
2	Trimpot 1K	0.98	1.96

2	Trimpot 10K	0.98	1.96
3	Optoacoplador CNY74-4	1.35	4.05
1	Amplificador operacional LM358	0.30	0.30
1	Plaqueta	34	34
1	Transformador 220-12-24	36	36
1	Termocúpla tipo J de 2m de longitud de cable	28.3	28.3
1	Frente autoadhesivo con hasta 4 colores	28	28
290	Hora hombre para el diseño e implementación	16.2	4698
		TOTAL	4871.32

Tabla 3. Análisis de costos

El precio es unitario para la realización de un control, valor expresado en dólar americano.

Pero la estrategia de venta es realizar la producción de 20/50 controles, en los cuales el costo de las horas hombre será amortizado sobre el total de la compra. Ej. Al realizar 50 controles cada uno costaría U\$S267.28. siendo este valor aproximadamente 95% menor al de un control importado y un 300% menor que producirlo con un PLC.

En cada caso se debe evaluar características particulares de cada aplicación pudiendo variar el precio acorde a detalles de adecuación a cada modelo y rediseño de partes, por sobre todo el frente que es característico de cada empresa. De modo que lo que será entregado por este valor es la plaqueta de control propiamente la cual ya contiene la interface de potencia y el frente autoadhesivo que será diseñado acorde al modelo elegido.

No está contemplado en el costo gastos de envío ni impuestos. Obviamente es producto terminado y probado en laboratorio.

En caso que se solicite puesta en marcha en planta se cotizara por separado los costos y viáticos para cada caso en particular.

Discusión y conclusiones

Se logro un sistema de control automático para hornos rotativos para uso en serie de alta eficiencia, logrando altos rindes de producción. Pudiendo optimizar los tiempos de los operarios reubicándolos a realizar otras tareas mientras el horno realiza la cocción en tiempo y forma sin la intervención de ellos.

Se encuestó a distintos usuarios respecto al manejo del sistema obteniendo resultados más que satisfactorios. En todos los casos determinan que el manejo es sencillo, de fácil interpretación y configuración de los parámetros.

De modo que la gerencia de la empresa está conforme y acepta el desafío de innovar los tableros de control de sus hornos.

Como mejora se propuso el análisis y posible reemplazo de los contactores para el manejo de potencia por un dispositivo electrónico de alta eficiencia como lo es un TRIAC. Implementando un circuito llamado “conmutador de estado sólido” estos tienen la ventaja de no utilizar contactos mecánicos para habilitar o no el paso de la corriente, evitando así el desgaste en los contactos.

También se realizó una comparación del control desarrollado frente a otro similar del cual se obtuvo una muestra para poder analizarla, esta fue adquirida por la empresa Industrias Zunino SRL para el montaje en la misma línea de hornos y se pudieron obtener resultados más que satisfactorios. Por un lado el diseño adoptado hizo a este control más robusto, con menor cantidad de fallas, tanto las producidas por ruido electromagnético como así también minimizar fallas producidas al emplear un frente con teclado incluido, este tiene el inconveniente que después de un tiempo de uso los contactos de las teclas se ponen en corto. Además se noto una importante mejora y facilidad en la conexión de las partes, haciendo más sencillo el conexionado en general logrando además mejorar considerablemente los tiempos de ensamblado.

Por otro lado al mejorar los tiempo de producción y utilizando menor cantidad de componentes para la elaboración de la circuitería, se logra competir económicamente sin ningún problema. El control automático realizado es robusto, adaptable y además es más económico. Condiciones más que suficientes para competir con cualquier control del mercado actual, nada más es necesario tomar la decisión y probarlo.

Bibliografía

- Katsuhiko Ogata. Ingeniería de control moderna. Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Antonio Creus Sole. Control de procesos industriales. S.A. Marcombo.
- Carlos A. Smith – Armando B. Corripio. Control automático de procesos. Noriega-Limusa
- www.industriaszunino.com
- <http://www.siemens.com/ar/es/home.html>
- <http://www.alldatasheet.es>
- <http://eqa.com.ar>