

**Universidad Tecnológica Nacional**

**Proyecto Final**

---

**Dispositivo de medición de transferencia térmica en  
materiales**

---

*Autor:*

Sebastián Gastiazoro

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

*en la*

**Facultad Regional Paraná**

Diciembre 2017



## Declaración de autoría:

Yo declaro que el Proyecto Final “Dispositivo de medición de transferencia térmica en materiales” 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:



## Agradecimientos:

A mi familia, gracias a sus consejos y palabras de aliento me han ayudado en este camino, no dejaron que me diera por vencido, y muy especialmente a mis padres que siempre con sacrificio y dedicación me dieron el mejor ejemplo, el de luchar por lo que uno se propone. Este logro es de todos.

A mis profesores que forjan la educación de todos los alumnos de la facultad.

Sebastián



Universidad Tecnológica Nacional

*Abstract*

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

Thermal transfer measurement device in materials

Sebastián Gastiazoro

**Abstract:**

Knowing the thermal characteristics of the materials used in the building, is essential to make appropriate design decisions. This takes more importance when considering the current thermal regulation, and its relationship with the reduction of energy consumption in terms of thermal comfort at the lowest possible cost. Therefore, this work has as main objective the design and manufacture of a device for obtaining thermal conductivity in materials.

The basis of the experiment is based on the generation of a constant thermal flow on a sample of a material, which is in intimate contact with a hot plate, connected to a PID controller, to obtain a temperature gradient in said sample, in function of the electrical power supplied to the hot plate. The heat flow through the sample is dissipated in the cold plate, located on the opposite side.

The temperature that passes through the cold plate is measured by a sensor connected by USB to the computer, which allows to store and plot the data by means of a PC program, it calculates the thermal conductivity constant.

The results obtained by this device are within the values provided by the manufacturers, having calculated an average error of eight percent. Which gives us as a result a useful device for testing materials.

**Keywords:**

Heat transfer, hot box test, thermal conductivity, thermal resistance

**Resumen:**

Conocer las características térmicas de los materiales empleados en la edificación, resulta indispensable para tomar decisiones de diseño adecuadas. Esto toma más importancia al considerar la reglamentación térmica actual, y su relación con la disminución del consumo energético en términos de confort térmico al menor costo posible. Por ello, el presente Trabajo tiene como objetivo principal el diseño y fabricación de un dispositivo para la obtención de la conductividad térmica en materiales.

El fundamento del experimento se basa en la generación de un flujo térmico constante sobre una muestra de un material, la que se encuentran en íntimo contacto con una placa caliente, conectada a un controlador PID, para obtener un gradiente de temperatura en dicha muestra, en función de la potencia eléctrica suministrada a la placa caliente. El flujo térmico a través de la muestra se disipa en la placa fría, ubicada en la cara opuesta.

La temperatura que atraviesa la placa fría es medida por un sensor conectado por USB a la computadora, el cual permite almacenar y graficar los datos por medio de un programa de PC, el mismo calcula la constante de conductividad térmica.

Los resultados obtenidos por este dispositivo se encuentran dentro de los valores provistos por los fabricantes, habiendo calculado un error promedio del ocho por ciento. Lo cual nos da como resultado un dispositivo útil para ensayar materiales.

**Palabras Clave:**

Conductividad térmica, ensayo de caja caliente, resistencia térmica, transferencia de calor.

### *Reconocimientos:*

A la Facultad Tecnológica por la excelente labor que lleva a cabo todos los días al brindar las diferentes carreras que se dictan en la Regional Paraná, al poner a disposición del alumnado las instalaciones, y además de velar siempre por tener el mejor grupo de educadores.

A los profesores por su vocación de servicio educativo, para llevar en cada cátedra los mejores conocimientos que nos forjan a ser mejores profesionales.

¡Gracias!



# Índice:

## Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	1
Capítulo 2. Transferencia de calor.....	5
2.1. Introducción.....	5
2.1.1 Métodos de Transferencia de Calor.....	5
2.1.2 Transmisión de calor por convección.....	5
2.1.3 Transmisión de calor por radiación.....	6
2.1.4 Transmisión de calor por conducción.....	7
2.2 Conductividad térmica.....	8
2.3 Sistemas de Medición.....	9
Capítulo 3. Desarrollo.....	16
3.1 Introducción.....	16
3.2 Horno.....	17
3.2.1 Detector de cruce por cero.....	17
3.2.2 Etapa de potencia.....	18
3.2.3 Sensor de temperatura.....	20
3.2.4 Interfaz usuario.....	21
3.2.5 Controlador PID.....	23
3.2.5.1 Término Proporcional.....	25
3.2.5.2 Término Integral.....	25
3.2.5.3 Término Derivativo.....	26
3.2.5.4 Ecuación del regulador.....	26
3.2.5.5 Ecuación del regulador discreta.....	27
3.2.6 Microcontrolador.....	27
3.3. Dispositivo de adquisición.....	30
3.2.1.5 Sensor de temperatura.....	32
3.4. Software de adquisición.....	34
Capítulo 4: Resultados.....	38
4.1 Ensayo con Retak.....	39
4.2 Ensayo con Aglomerado.....	41
4.3 Ensayo con MDF o Fibrofácil.....	44

4.4 Ensayo con Corcho.....	47
4.5 Calibración .....	49
Capítulo 5: Análisis de Costos .....	50
Capítulo 6: Conclusión.....	52
Capítulo 7: Bibliografía. ....	54
7.1 Libros .....	54
7.2 Páginas web .....	54

## Lista de Figuras:

Figura 1- Transferencia de calor.....	6
Figura 2 - Transferencia por radiación.....	7
Figura 3 - Signos para la transmisión de calor por conducción.....	8
Figura 4 - Sistemas de transmisión de conductividad térmica.....	10
Figura 5 - Niveles de temperatura.....	11
Figura 6 - Placa calentadora.....	12
Figura 7 – Evolución de Temperatura T2 [°C] de enfriamiento de placa.....	13
Figura 8 – Montaje.....	14
Figura 9 – SQ/ST en función de la temperatura.....	15
Figura 10 – Diagrama de bloques del proyecto.....	16
Figura 11 – Funcionalidad del horno.....	17
Figura 12 – Cruce por cero y pulso generados a la salida.....	17
Figura 13 – Esquemático.....	18
Figura 14 – Diagrama de PCB.....	18
Figura 15 – Esquemático.....	19
Figura 16 – Diagrama de PCB.....	19
Figura 17 – Forma de onda .....	20
Figura 18 – Esquemático .....	21
Figura 19 – Diagrama de PCB.....	21
Figura 20 – Interfaz de usuario.....	22
Figura 21 – Diagrama flujo del menú.....	22
Figura 22 – Esquemático.....	23
Figura 23 – Diagrama de PCB.....	23
Figura 24 – Diagrama de bloque regulador PID.....	25
Figura 25 – Diagrama de bloque de regulador PID.....	27
Figura 26 – Diagrama de flujo simplificado.....	28
Figura 27- Diagrama flujo simplificado.....	29
Figura 28 – Imagen frontal horno.....	30
Figura 29 – Imagen lateral horno.....	30
Figura 30 – Imagen interna horno.....	30
Figura 31 – Diagrama de flujo del algoritmo.....	31
Figura 32 – Diagrama esquemático.....	31
Figura 33 - Diagrama de PCB.....	32
Figura 34 – Diagrama esquemático TMP275.....	33

Figura 35 – Diagrama PCB TMP 275.....	33
Figura 36 – Sensor de carcasa.....	33
Figura 37 – Interfaz gráfica software.....	34
Figura 38 – Diagrama de flujo del software parte 1.....	36
Figura 39 - Diagrama de flujo del software parte 2.....	36
Figura 40 - Diagrama de flujo del software parte 3.....	37
Figura 41 - Archivo CSV representado en Excel .....	37
Figura 42 - Muestra a ensayar en el horno.....	38

## Lista de Tablas:

Tabla 1- Registro de enfriamiento.....	15
Tabla 2- Cambio de temperatura en el Retak .....	40
Tabla 3- Cambio de temperatura en el aglomerado.....	42
Tabla 4- Cambio de temperatura en el MDF .....	45
Tabla 5- Cambio de temperatura en el corcho .....	48
Tabla 6- Costo de recursos materiales.....	50
Tabla 7- Costo de recursos humanos.....	50

# Lista de Abreviaciones

INTI: Instituto Nacional de Tecnología Industrial

IRAM: Instituto Argentino de Normalización y Certificación

ISO: Organización Internacional de Normalización

ASTM: organización de normas internacionales

HMF: Heat Flow Meter

GHP: Guarded Hot Plate

PWN: Pulse Width Modulation

SPI: Serial Peripheral Interface

PCB: Printed Circuit Board

PID: Proporcional Integral Derivativo

IDE: Integrated Development environment

## Lista de Símbolos

$h$  = Coeficiente de transmisión del calor por convección ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ )

$A$  = Área superficial en contacto con el fluido ( $\text{m}^2$ )

$T_s$  = temperatura de la superficie

$T_f$  = temperatura del fluido más allá de la superficie

$\sigma$  = constante de Stefan – Boltzmann.

$\Lambda$  = coeficiente de conductividad Térmica

**Dedicado a:**

Los profesores de la carrera de Ingeniería Electrónica



## Capítulo 1. Introducción.

Hoy en día la escasa capacidad energética que dispone el país y el hincapié que se ha otorgado a las políticas ambientalistas, nos sitúa en un contexto en el que se busca el desarrollo sustentable y de eficiencia energética, para así poder obtener un ahorro energético y un bajo impacto en el medio ambiente. En la industria de la construcción es preponderante desarrollar características de acondicionamiento térmico de las edificaciones. Dentro de las variables que permiten obtener ahorro energético, se encuentra la aislación térmica, la que se materializa en elementos constructivos de la envolvente térmica tales como; muros perimetrales, complejos de techos y pisos, y en general cualquier elemento que separe dos ambientes con temperaturas distintas. Es así como lo explica un estudio realizado por el INTI en el cual el consumo de energía y contaminación para una casa con o sin aislación térmica. La pérdida de energía anual para mantener condiciones de confort en una casa sita en Río Grande (T.d.F.) a través de 100 m<sup>2</sup> de techos y 100 m<sup>2</sup> de paredes equivalen a 22 y 26 barriles de petróleo crudo, respectivamente, si no cuenta con aislación térmica, y a 3 y 6 barriles de petróleo crudo, respectivamente, si cuenta con unos 7 cm de aislación térmica de espumas rígidas de poliuretano (PUR) en el techo y 3,5 cm en las paredes. Entonces definir los materiales que pueden ser más o menos aislantes ayudara no solo a ser los habitantes más confortables, sino también a disminuir el consumo energías no renovables, lo cual es un tema muy delicado el que tenemos que ponernos a pensar como sociedad en un mundo cada vez más desarrollado y con mayores niveles de consumo. A la hora de construir tenemos que tener en cuenta la caracterización de los materiales que consiste en las propiedades que poseen, siendo los más significativos: la densidad, resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción, menos importantes son la dureza y fragilidad. Dada las características de cada material se puede elegir el más conveniente según la finalidad que se requiera, eso si el costo es un factor determinante al momento de la elección. Ahora existen otras propiedades que definen la colocación de un elemento en

un sector determinado. Una magnitud fundamental para la determinación del acondicionamiento térmico, es la conductividad térmica de los materiales empleados en la envolvente de una edificación, estos valores se ven alterados por diversos factores como son la densidad, la temperatura y el contenido de humedad.

#### Normativa Existente

Se investigaron las normativas y las legislaciones con respecto al diseño de acondicionamiento térmico.

Se analizaron las siguientes normativas

Código de edificación de la ciudad de Rosario

Código de edificación de la ciudad de Buenos Aires Ley 13059

Normas IRAM

Estas legislaciones deben cumplir con las normas IRAM, las cuales fijan parámetros de acondicionamiento térmico. A continuación se enumeraran las principales de uso habitual para las verificaciones más frecuentes realizadas, y su estado de actualización:

IRAM 11601: Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Estado: vigente. Desde el 10/10/2002.

IRAM 1603: Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina. Estado: vigente. Desde el 06/12/1996.

IRAM 11604: Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico “G” de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites. Estado: vigente. Desde el 15/2/2001.

IRAM 11605: Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Estado: vigente. Desde el 06/12/1996.

IRAM 11625: Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Verificación del riesgo de condensación de vapor de agua superficial e intersticial en los paños centrales de muros exteriores, pisos y techos de edificios en general. Estado: vigente. Desde el 07/4/2000.

IRAM 11630: Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Verificación del riesgo de condensación de vapor de agua superficial e

intersticial en puntos singulares de muros exteriores, pisos y techos de edificios en general. Estado: vigente. Desde el 07/4/2000.

IRAM 11658-1: Aislamiento térmico de edificios. Puentes térmicos. Parte 1: Cálculo de flujos de calor en edificios. Método para el desarrollo de modelos. Estado: vigente. Desde el 10/10/2003.

IRAM 11658-2: Aislamiento térmico de edificios. Puentes térmicos. Parte 2: Procedimiento para la validación de los métodos de cálculo de gran exactitud. Estado: vigente. Desde el 10/4/2003.

IRAM 11659-1: Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: Vocabulario, definiciones, tablas y datos para determinar la carga térmica de refrigeración. Estado: vigente, desde el: 29/11/2004, actualmente en modificación.

Las normas que establecen el cálculo de la conductividad se basan en el Método de la caja caliente con guarda entre ellas podemos encontrar:

ISO 8990:1994 - Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties -- Calibrated and guarded hot box

IRAM 11564 - Acondicionamiento térmico de edificios. Determinación de las propiedades de transmisión de calor en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente con guarda, y calibrada (ISO 8990:1994)

ASTM 177:1997 - Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

ASTM C518:1998 – Standard test method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means Of the eat Flow Meter Apparatus

Para le presente trabajo utilizamos la norma ASTM C518 como guía para la construcción del dispositivo electrónico. Antes de detallar la creación del dispositivo según lo

establecido en la norma para determinar la conductividad térmica, daremos una breve explicación en el siguiente capítulo de cómo se transfiere el calor.

## Capítulo 2. Transferencia de calor.

### 2.1. Introducción

Se dará una breve explicación de los diferentes tipos de transferencia de calor a fin de poder tener una base para entender el funcionamiento del proyecto.

#### 2.1.1 Métodos de Transferencia de Calor

Se establece en la Ley de la Termodinámica al calor como energía que se desplaza desde un punto de mayor a menor energía, vale decir, desde un cuerpo con mayor calor a uno más frío hasta que alcanza el equilibrio térmico. Así mismo se establecen tres tipos de transmisión de calor: conducción, radiación y convección. Cuando una pared opaca y homogénea se coloca entre dos ambientes a diferente temperatura, se produce una transferencia de calor de la cara caliente a la fría. Dicha transmisión se produce en varias fases:

- Del aire interior (ambiente más caliente) a la cara interna de la pared.
- A través de la pared.
- De la cara externa de la pared al aire exterior (ambiente más frío).

#### 2.1.2 Transmisión de calor por convección

Esta forma de propagación es propia de los fluidos (líquidos y gases). Las moléculas en contacto con un cuerpo a una temperatura más alta «A» se calientan, disminuyendo su densidad y desplazándose por gravedad. Si a su vez entran en contacto con un cuerpo más frío «B», ceden calor, aumentando su densidad y desplazándose en sentido contrario, formándose así un ciclo de convección. Al considerar el enfriamiento de un elemento caliente por medio de la circulación de aire frío sobre su superficie (figura 1). El calor es transferido a la capa de aire contigua a la superficie por medio de la conducción, luego el calor es llevado fuera de la superficie por convección.

La determinación de la tasa de conducción de calor por convección se obtiene con la fórmula de la ley de enfriamiento de Newton.

$$Q_c = h \cdot A(T_s - T_F) = \sigma \cdot A \cdot \Delta T \quad 1$$

Dónde:

$h$  = Coeficiente de transmisión del calor por convección ( $w/m^2.K$ )

$A$  = Área superficial en contacto con el fluido ( $m^2$ )

$T_s$  = temperatura de la superficie

$T_{\infty}$  = temperatura del fluido más allá de la superficie

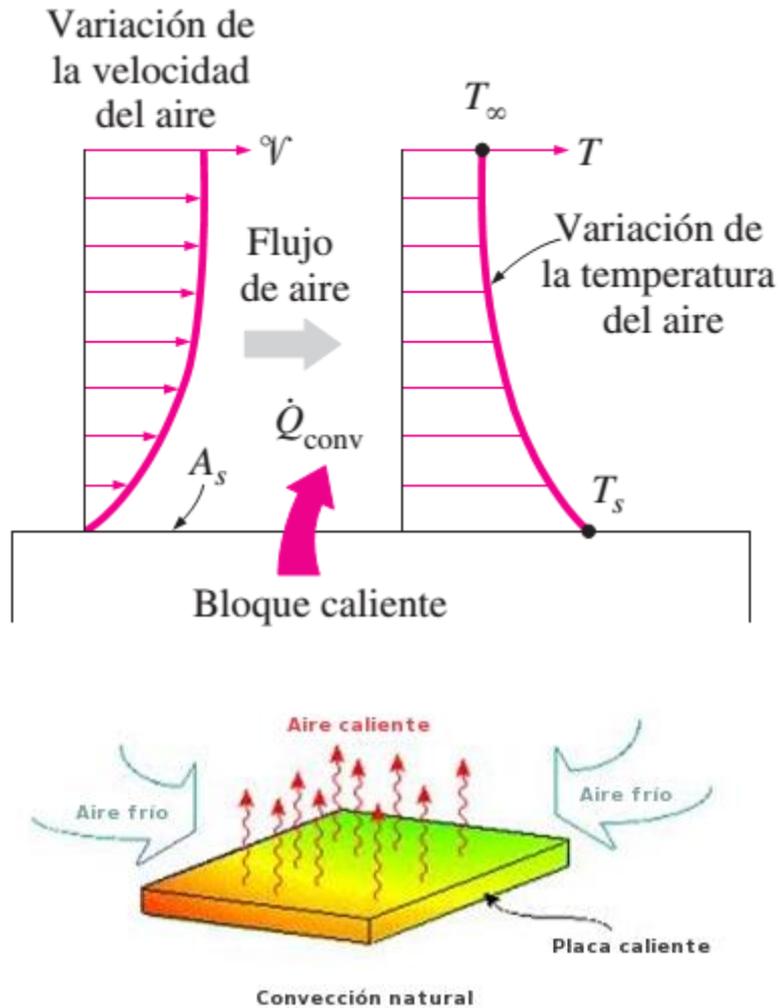


Figura 1 Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección <sup>[1]</sup>

El coeficiente de transmisión de calor por convección es aproximadamente constante para cada fluido. Pero, en realidad, varía con el salto térmico  $\Delta T$  de la convección natural, aumentando  $h$ .

La posición y dimensiones de la placa, también afectan el valor de  $h$ . Para disminuir esta incertidumbre se trabaja con valores  $\Delta T$  parecidos y realizando el flujo de calor hacia el aire desde arriba hacia abajo (disminuye la convección natural).

### 2.1.3 Transmisión de calor por radiación

La radiación está constituida por ondas electromagnéticas de diferentes longitudes. Mientras que la conducción como la convección requiere de un soporte material; la transmisión por radiación se puede realizar en el vacío. Todos los cuerpos, incluso a temperaturas bajas, emiten calor por radiación y la cantidad de calor irradiado aumenta

cuando se eleva la temperatura del cuerpo. Por ello, cuando un cuerpo se encuentra en presencia de otro más caliente, absorbe más energía de la que emite y viceversa, siendo la cantidad transmitida la diferencia entre la emitida por ambos. En la figura 2.3, la transferencia de calor entre la persona y el aire es por convección ya que el aire en la vecindad de la piel se calienta y asciende como resultado de la transferencia térmica del cuerpo y además el cuerpo pierde calor por radiación hacia las superficies circundantes.

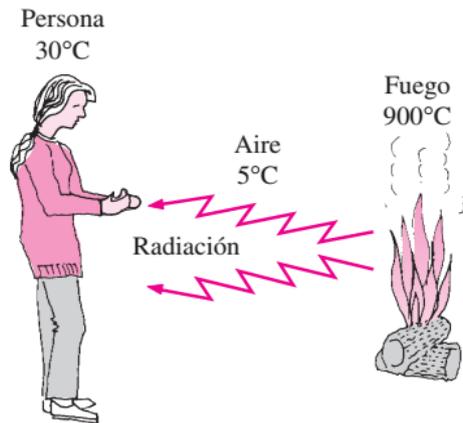


Figura 2. Transferencia por radiacion

La obtención de la tasa de radiación máxima ( $\dot{Q}_{emit,max}$ ) que puede emitirse a una superficie a una temperatura absoluta  $T_S$ , es por medio de la ley de Stefan – Boltzmann:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma \times A \times T_S^4 \quad 2$$

En donde A es el área de la superficie y  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2 \cdot K^4)]$  la constante de Stefan – Boltzmann.

### 2.1.4 Transmisión de calor por conducción

La conducción, es el único mecanismo de transmisión de calor posible en los medios sólidos opacos, cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura. El calor se trasmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, debido al movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones como sucede en los metales.

La ley básica de la conducción del calor (Joseph Fourier), establece: “La tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección”.

$$Q_x = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad , \quad \left[ W \quad , \quad \frac{BTu}{h} \right] \quad 3$$

Dónde:

$Q_x$  = Tasa de flujo de calor a través del área  $A$  en la dirección positiva.

$k$  = Conductividad termica  $\left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} , \frac{BTu}{h \cdot Pie \cdot ^\circ R} \right]$

$A$  = área de sección transversal de la transferencia de calor

$\frac{\partial T}{\partial x}$  = Gradiente de temperatura

El flujo real de calor depende de la conductividad térmica  $k$ , que es una propiedad física del cuerpo

El signo (-) es consecuencia del segundo principio de la termodinámica, según el cual el calor debe fluir hacia la zona de temperatura más baja. El gradiente de temperatura es negativo si la temperatura disminuye para valores crecientes de  $x$ , por lo que el calor transferido de la dirección positiva debe ser una magnitud positiva, por lo tanto, al segundo miembro de la ecuación anterior hay que introducir un signo negativa, esto se puede ver en la figura.

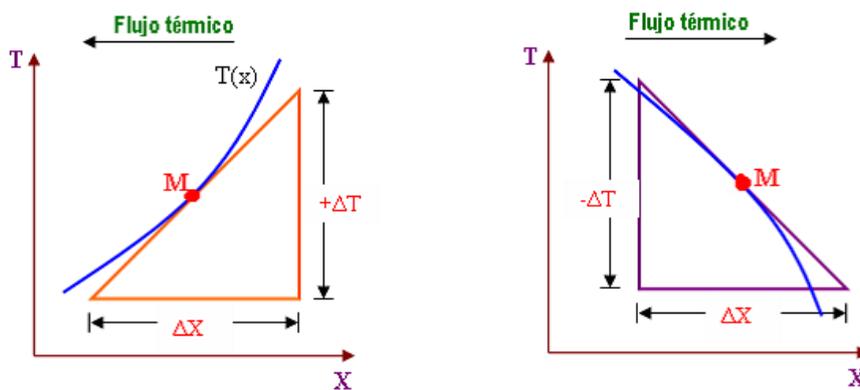


Fig.3. Signos para la transmisión de calor por conducción

### 2.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado de conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante. Se expresa en  $W / (m^2 \cdot K)$ .

El valor de conductividad térmica está asociado principalmente a la densidad del material, su temperatura y su contenido de humedad, y en menor medida de la anisotropía, color y presión atmosférica a la cual se encuentra. La densidad del material está asociada a la cantidad de poros que puede tener un material. El aire estanco es uno de los elementos de más baja conductividad, por lo tanto, al aumentar la cantidad de

poros la densidad disminuye generando una disminución de la conductividad, pero existe un límite en cierto valor de densidad (densidad óptima), donde la conductividad aumenta debido a que en los poros que son de gran tamaño hay convección del aire en su interior.

La Humedad en el material aumenta considerablemente la conductividad térmica ya que el agua es aproximadamente 20 veces más conductor térmico que el aire, por ello si un material absorbe humedad empeora su capacidad de aislación.

La temperatura influye disminuyendo o aumentando la efectividad del traspaso de calor, dado que cuanto más alta es, mayor es la conductividad por el aumento de los choques de moléculas al aumentar la energía cinética y viceversa al bajar la temperatura.

### 2.3 Sistemas de Medición

Existen diversos sistemas desarrollados para alcanzar este objetivo. Algunos de ellos son de carácter comercial, otros están instalados en organismos públicos capaces de certificar sus mediciones y otros son de carácter experimental desarrollados en ámbitos universitarios y/o por grupos de investigación y/o transferencia de tecnologías.

Básicamente responden a dos métodos de medición en estado estacionario. Uno, denominado Heat Flow Meter (HMF, medidor de flujo de calor), consiste en ubicar el elemento a probar entre una fuente caliente y una fuente fría y medir el flujo de calor que pasa a través de él. En el otro denominado Guarded Hot Plate (GHP, placa de guarda caliente), la probeta se coloca en el medio de dos placas frías y estas tres juntas entre dos placas calientes, todas aisladas perimetralmente

Esquema de síntesis de los métodos involucrados en los sistemas de medición de transmitancia térmica de materiales: (a) Heat Flow Meter (HMF, medidor de flujo de calor) y (b) Guarded Hot Plate (GHP, placa de guarda caliente).

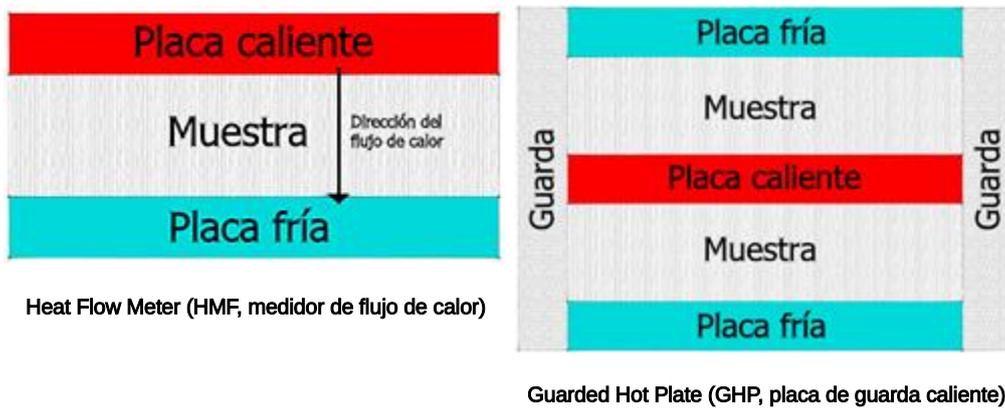


Fig. 4. Sistemas de transmisión de conductividad térmica

El área Construcciones, del Instituto Nacional de Tecnologías Industriales (INTI) de Argentina, tiene dos equipos para realizar las evaluaciones de transmitancia térmica, que funcionan mediante los dos métodos mencionados. El GHP lo utiliza para los valores absolutos de conductividad térmica, y el HFM para mediciones comparativas. El criterio de diseño del aparato GHP se especifica en las normas ASTM C177 o ISO 8302 y del aparato HFM se especifica en las normas del sector ASTM C518 e ISO 8301, como guía para la construcción del dispositivo electrónico. Ambos tienen el beneficio de permitir a los desarrolladores de sistemas constructivos del país, tanto empresas como privados, obtener una medición certificada de sus productos para asegurar sus características térmicas.

Como primer paso se buscó un método que permita la obtención del coeficiente de trasmisión de conductividad térmica ( $\lambda$ ), en condiciones de laboratorio y contrastarlo con valores conocidos, basándonos en el método de Less y Chorlton

El procedimiento se basa en determinar primeramente la rapidez de transmisión del calor a través de una placa de aluminio que se encuentra a una Temperatura  $T_1$ ,

$$H = \frac{\delta Q}{\delta t} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Está dado por la expresión:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta d}$$

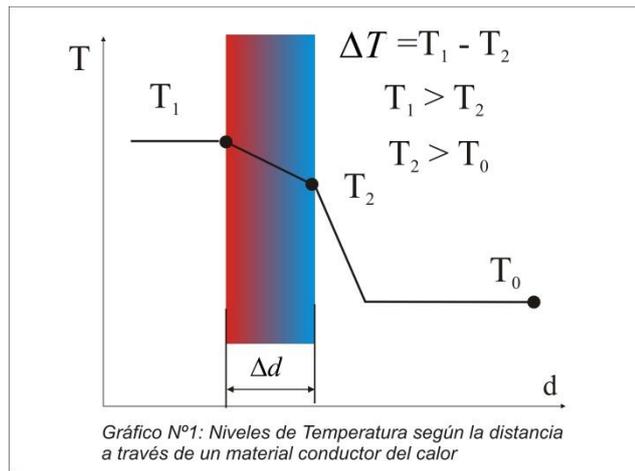


Fig. 5. Niveles de temperatura

Por otra parte, el flujo de calor por convección perdido desde la superficie inferior de la placa de aluminio hacia el medio que se encuentra a una temperatura  $T_0$  se expresa por:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \alpha \cdot A \cdot (T_2 - T_0)$$

4

Siendo  $\alpha$  el coeficiente de conducción por convección natural (la cual es aproximadamente constante para cada fluido, pero varía con el salto térmico entre la superficie de la placa y el seno del fluido). Un aumento en el  $\Delta T$  produce un aumento de  $\alpha$ , favoreciendo la convección natural.

Como se resume en el gráfico N°1, para establecer el valor del Gradiente, a los efectos del experimento, se deben mantener constante los valores de las temperaturas  $T_1$  y  $T_0$  (fuente caliente, y la fuente fría), y así se logra establecer el valor del flujo de calor en régimen estacionario.

En régimen estacionario este flujo que transcurre por conducción es igual a la cantidad de calor que la placa de aluminio que se encuentra a temperatura  $T_2$ , cede por convección al aire del ambiente que se encuentra a  $T_0$ , a través de la superficie inferior. Por lo tanto:

$$-\lambda.A.\frac{\Delta T}{\Delta d} = \alpha.A.(T_2 - T_0)$$

Escrito de otra manera:

$$\lambda.A.\frac{T_1 - T_2}{d} = \alpha.A.(T_2 - T_0)$$

Se puede ver en esta igualdad que para  $T_1 = T_2$  ambos flujos son iguales, es cuando se encuentran en régimen estacionario y la cantidad de calor que recibe la placa inferior la va cediendo al medio ambiente (se supone aquí que la temperatura del ambiente permanece constante).

La norma ASTM C518 recomienda para la construcción de las placas de superficie de intercambio, cuando se trabaja con temperaturas modestas, el uso de materiales de alta conductividad térmica como el cobre o el aluminio, en tanto para temperaturas mayores se usan otros materiales.

Para el experimento se utilizó una placa de aluminio, material que tiene un valor de conductividad térmica  $\lambda$  de 209,3[W/m.K], que es un valor alto si lo comparamos con el material utilizado para la aislación (espuma de poliestireno, conocido en nuestro país como Telgopor, cuyo valor de conductividad térmica oscila entre 0.041 y 0.029 [W/m.K], dependiendo del tipo de producto y del fabricante.)

Se adquirió una placa de aluminio comercial, de un espesor  $\Delta d = 8\text{mm}$ . Una vez fijada el Área (A) y conocido el espesor, se pudo avanzar en la construcción del primer dispositivo de ensayo completo.

Se procedió a construir un dispositivo que permite al calor producido por una fuente de temperatura constante fluir en un solo sentido, mediante un circuito “serie” de transmisión del calor por conducción.

Para ello se determinó arbitrariamente el tamaño de una superficie de 15cm x 15cm = 225cm<sup>2</sup> = 0,0225 m<sup>2</sup>; conveniente de realizar por ser un tamaño manejable en escala de Laboratorio y coincidir con las proporciones de la resistencia calefactora disponible.

Para el procedimiento de determinar el calor perdido por CONVECCION por la placa inferior, en primer lugar se calienta la placa inferior con el horno, a temperatura superior a la que alcanza en el estado estacionario  $T_2$  y luego se lo cubre con un aislante (poliestireno expandido con una capa de corcho), y se deja enfriar a temperatura

ambiente, mientras se registran tiempos y valores de temperatura de la placa, a medida que se enfría para ello se utilizó un sensor digital con un programa de PC, el desarrollo del mismo será explicado en el siguiente capítulo.

Se dispuso el montaje siguiente:

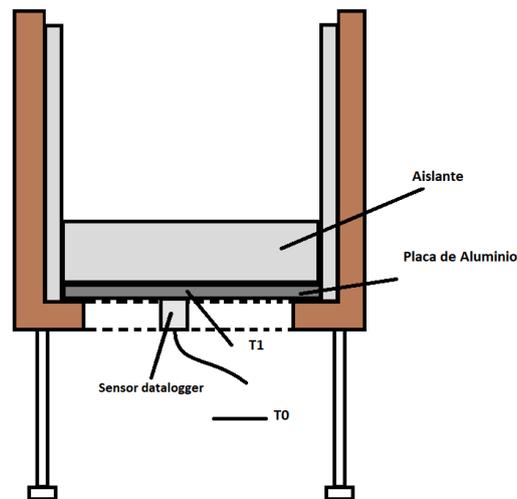


Fig. 6. Placa calentada

En régimen estacionario, con una configuración horizontal de la placa fría inferior (Fig. 6), el flujo de calor tiene lugar por convección desde la superficie inferior de la placa de aluminio al aire circundante a temperatura  $T_0$ , pero en régimen variable, el calor acumulado en la placa tendrá una velocidad de enfriamiento según la siguiente expresión:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = C \cdot m \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$$

C= Calor específico del metal de la placa inferior de aluminio

m= masa de la placa

$\frac{\delta T}{\delta t}$  = velocidad de enfriamiento

Duración[seg]	At[seg]	Temperatura[°C]	AT [°C]	AT/At	Duración[seg]	At[seg]	Temperatura[°C]	AT [°C]	AT/At
2		77	0.5		4732	141	47	0.5	0.003546
42	40	76.5	0.5	0.0125	4853	121	46.5	0.5	0.004132
123	81	76	0.5	0.006173	5014	161	46	0.5	0.003106

183	60	75.5	0.5	0.008333	5155	141	45.5	0.5	0.003546
244	61	75	0.5	0.008197	5296	141	45	0.5	0.003546
304	60	74.5	0.5	0.008333	5436	140	44.5	0.5	0.003571
365	61	74	0.5	0.008197	5597	161	44	0.5	0.003106
425	60	73.5	0.5	0.008333	5779	182	43.5	0.5	0.002747
485	60	73	0.5	0.008333	5940	161	43	0.5	0.003106
546	61	72.5	0.5	0.008197	6101	161	42.5	0.5	0.003106
606	60	72	0.5	0.008333	6241	140	42	0.5	0.003571
667	61	71.5	0.5	0.008197	6403	162	41.5	0.5	0.003086
727	60	71	0.5	0.008333	6584	181	41	0.5	0.002762
787	60	70.5	0.5	0.008333	6765	181	40.5	0.5	0.002762
848	61	70	0.5	0.008197	6966	201	40	0.5	0.002488
908	60	69.5	0.5	0.008333	7167	201	39.5	0.5	0.002488
968	60	69	0.5	0.008333	7389	222	39	0.5	0.002252
1029	61	68.5	0.5	0.008197	7610	221	38.5	0.5	0.002262
1089	60	68	0.5	0.008333	7852	242	38	0.5	0.002066
1150	61	67.5	0.5	0.008197	8094	242	37.5	0.5	0.002066
1210	60	67	0.5	0.008333	8356	262	37	0.5	0.001908
1270	60	66.5	0.5	0.008333	8638	282	36.5	0.5	0.001773
1331	61	66	0.5	0.008197	8920	282	36	0.5	0.001773
1391	60	65.5	0.5	0.008333	9182	262	35.5	0.5	0.001908
1451	60	65	0.5	0.008333	9504	322	35	0.5	0.001553
1512	61	64.5	0.5	0.008197	9826	322	34.5	0.5	0.001553
1592	80	64	0.5	0.00625	10189	363	34	0.5	0.001377
1653	61	63.5	0.5	0.008197	10531	342	33.5	0.5	0.001462
1713	60	63	0.5	0.008333	10894	363	33	0.5	0.001377
1773	60	62.5	0.5	0.008333	11316	422	32.5	0.5	0.001185
1854	81	62	0.5	0.006173	11779	463	32	0.5	0.00108
1914	60	61.5	0.5	0.008333	12223	444	31.5	0.5	0.001126
1995	81	61	0.5	0.006173	12726	503	31	0.5	0.000994
2055	60	60.5	0.5	0.008333	13290	564	30.5	0.5	0.000887
2136	81	60	0.5	0.006173	13894	604	30	0.5	0.000828
2216	80	59.5	0.5	0.00625	14620	726	29.5	0.5	0.000689
2297	81	59	0.5	0.006173	15385	765	29	0.5	0.000654
2377	80	58.5	0.5	0.00625	16252	867	28.5	0.5	0.000577
2458	81	58	0.5	0.006173	17279	1027	28	0.5	0.000487
2518	60	57.5	0.5	0.008333	18529	1250	27.5	0.5	0.0004
2619	101	57	0.5	0.00495	19959	1430	27	0.5	0.00035
2699	80	56.5	0.5	0.00625	21873	1914	26.5	0.5	0.000261
2780	81	56	0.5	0.006173	24008	2135	26	26	0.012178
2880	100	55.5	0.5	0.005	12726	503	31	0.5	0.000994
2961	81	55	0.5	0.006173	13290	564	30.5	0.5	0.000887
3041	80	54.5	0.5	0.00625	13894	604	30	0.5	0.000828
3142	101	54	0.5	0.00495	14620	726	29.5	0.5	0.000689
3223	81	53.5	0.5	0.006173	15385	765	29	0.5	0.000654

3323	100	53	0.5	0.005	16252	867	28.5	0.5	0.000577
3444	121	52.5	0.5	0.004132	17279	1027	28	0.5	0.000487
3545	101	52	0.5	0.00495	18529	1250	27.5	0.5	0.0004
3645	100	51.5	0.5	0.005	19959	1430	27	0.5	0.00035
3746	101	51	0.5	0.00495	21873	1914	26.5	0.5	0.000261
3867	121	50.5	0.5	0.004132	24008	2135	26	26	0.012178
4350	141	48.5	0.5	0.003546	21873	1914	26.5	0.5	0.000261
4470	120	48	0.5	0.004167	24008	2135	26	26	0.012178
4591	121	47.5	0.5	0.004132	24008	2135	26	26	0.012178

Tabla Nº 1: Registro de enfriamiento de placa (por convección natural)

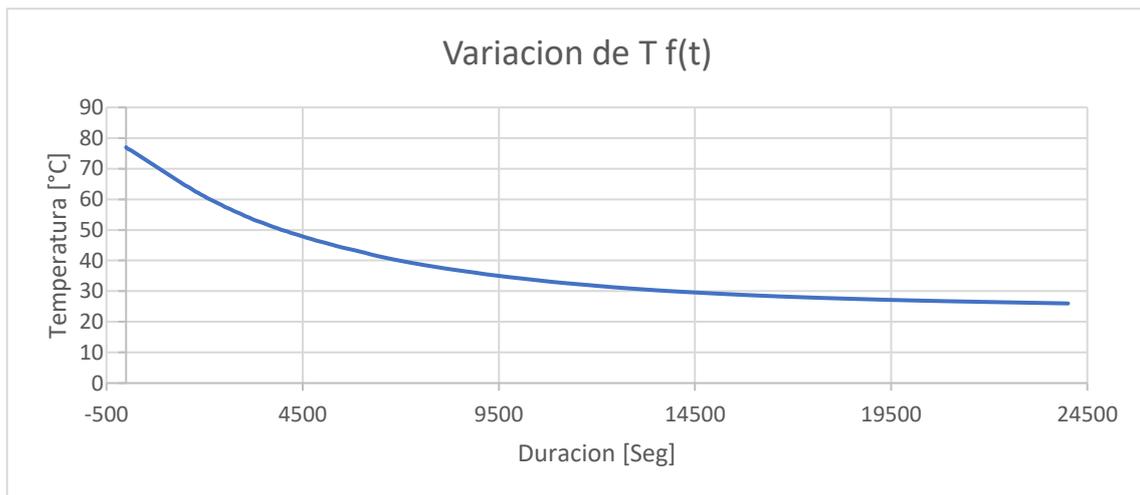


Fig. 7- Evolución de Temperatura T2 [°C] de enfriamiento de placa en función del tiempo indicado en segundos.

El montaje del conjunto final con dos placas de aluminio (superior e inferior), se puede ver en figura siguiente:

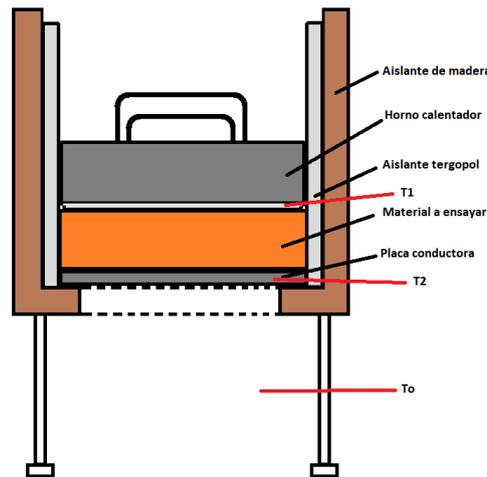


Fig. 8. Montaje del conjunto de placas y muestra

Remitiendo a la figura anterior, cuando el salto de temperatura  $T-T_0$  (de enfriamiento de placa en régimen variable) se igual con el salto  $T_2-T_0$  de la misma placa en régimen estacionario de un ensayo (Figura 8), entonces el flujo por convección es igual para ambos casos, y de la cual podemos obtener el coeficiente de conductividad Térmica ( $\lambda$ ).

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = C.m. \frac{\delta T}{\delta t} \quad 5$$

$$\lambda.A. \frac{T_1 - T_2}{d} = C.m. \frac{\delta T}{\delta t}$$

Donde  $\frac{\delta T}{\delta t}$  es la velocidad de enfriamiento y su valor se puede obtener gráficamente cuando  $T = T_2$ ; la determinación de la misma se puede hacer por cociente incremental en el entorno de  $T_2$ ; en el entorno  $T_2 + 10^\circ\text{C}$  a  $T_2 - 10^\circ\text{C}$ , la gráfica es aproximadamente lineal

A los efectos del experimento se debe considerar la misma temperatura ambiente, esto presupone realizar experimentos en simultáneo, o en los mismos horarios en ambientes de baja variación térmica, ya que, si se produce variación durante el día, se introducen errores.

Graficando T de enfriamiento de la placa inferior (cuando pierde calor por convección natural) y el cociente incremental en abscisas.

$$\lambda = \frac{C.m.d}{A.(T_1 - T_2)} \cdot \frac{\delta T}{\delta t} \quad 6$$

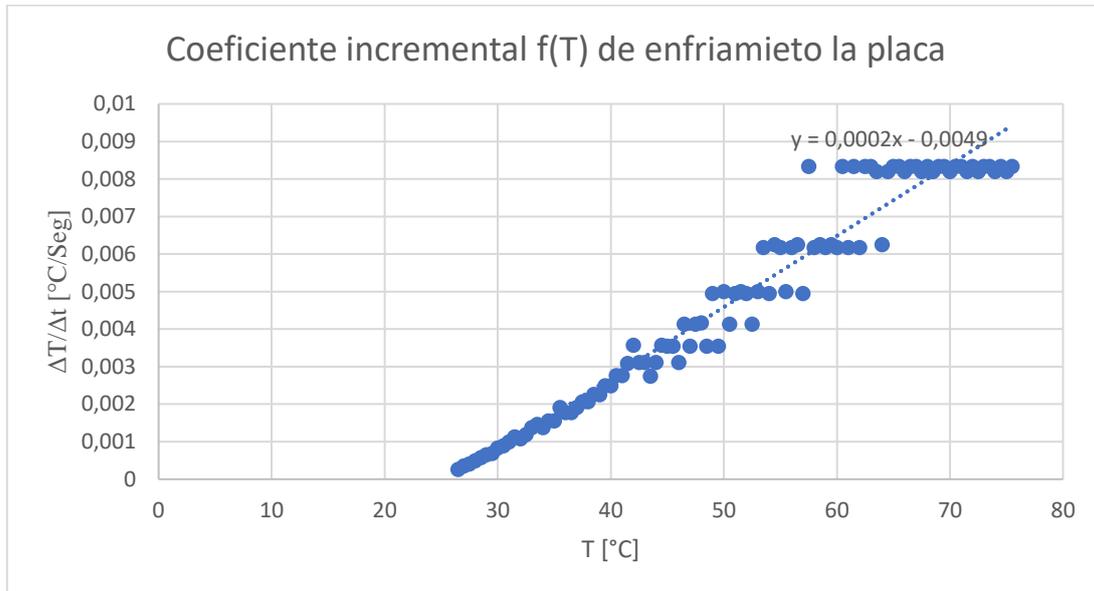


Fig. 9:  $\frac{\delta Q}{\delta t}$  en función de la temperatura (a partir de la Tabla N.º 1)

Se utiliza la curva de aproximación  $y=0.0002x-0.0049$  para realizar los cálculos de la constante de conductividad térmica  $\lambda$ . Las pruebas se verán en el capítulo 4, en el siguiente capítulo se explicará el funcionamiento y de los dispositivos desarrollados para la obtención de la constante.

## Capítulo 3. Desarrollo.

### 3.1 Introducción

Como se explicó en el capítulo anterior para la realización de este proyecto necesitamos calentar una de las caras de la muestra, pero no podemos hacerlo a una temperatura que oscile a lo largo del tiempo debido a que sería muy difícil establecer el estado de equilibrio final. Para esto se desarrolló un horno que permita calentar esta superficie con una temperatura elegida y la mantenga constante a lo largo de la prueba, se utilizó un algoritmo de control PID que permite controlar la potencia entregada al calefactor, el mismo se desarrolla más adelante. También debemos medir la variación de temperatura en la cara de la placa fría para poder calcular la constante de conductividad térmica. Se desarrolló un datalogger que permite conectarse por USB a la PC y mediante un software almacenar y graficar los valores de temperatura, así como también calcular la constante antes mencionada. En la siguiente figura se muestra un diagrama general del proyecto y cada una de sus partes serán detalladas en los siguientes apartados.

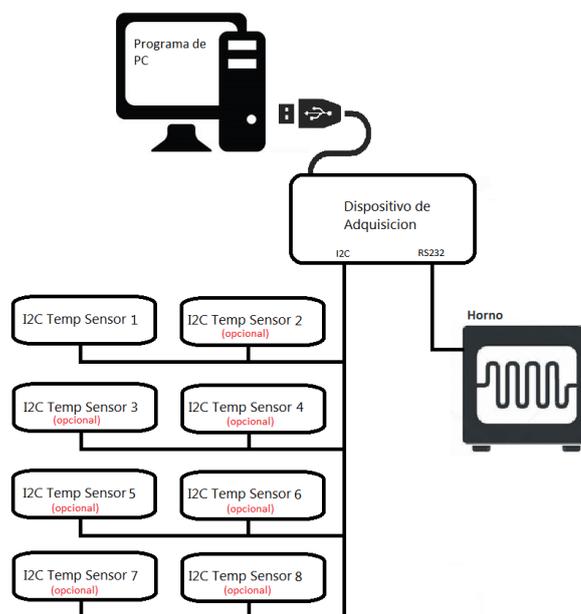


Figura 10: Diagrama de bloques del proyecto.

### 3.2 Horno

Para poder mantener constante la temperatura distintos módulos entran en juego para realimentar el sistema de control PID, se muestra un diagrama funcional del horno a fin de que sirva como guía para detallar cada uno de ellos:

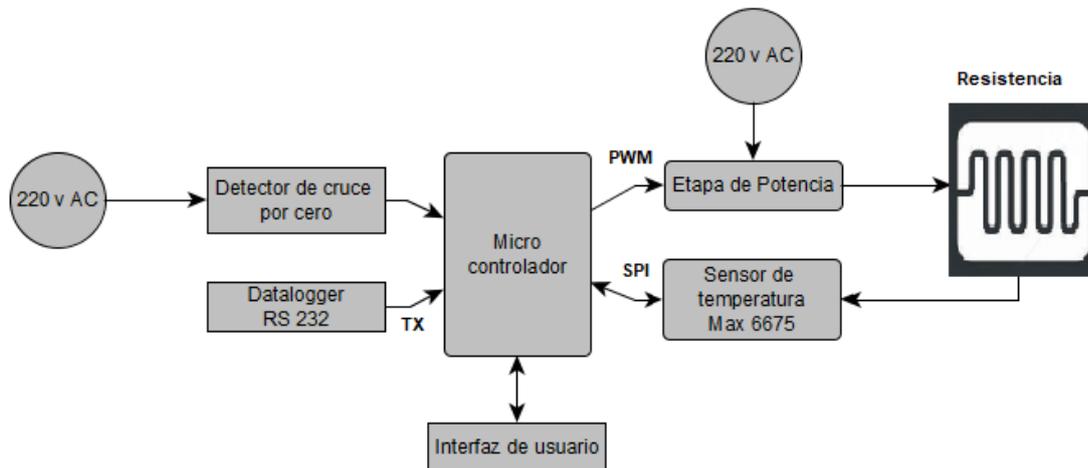


Figura 11: Diagrama funcional del horno.

#### 3.2.1 Detector de cruce por cero

Se construyó este circuito para poder detectar en que momento la señal de corriente alterna de 220v cruza por cero a fin conocer el momento correcto para poder encender la etapa de potencia para que circule corriente por la carga. Este detector genera un pulso positivo de 5v de amplitud el cual está conectado al puerto de interrupción por cambio de estado del microcontrolador. En la siguiente imagen se puede apreciar una simulación de la tensión de entrada en 220v en color amarillo y el pulso generado a la salida del circuito en color azul, seguidas por el esquemático y la placa el circuito

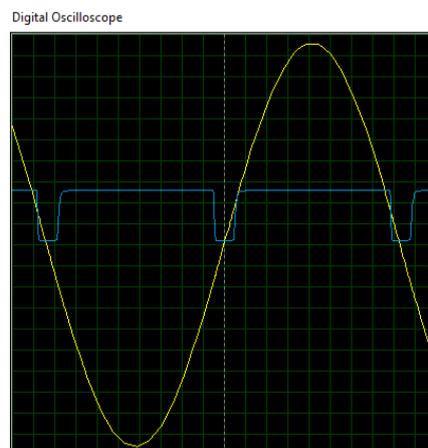


Figura 12: Cruce por cero y pulso generado a la salida.

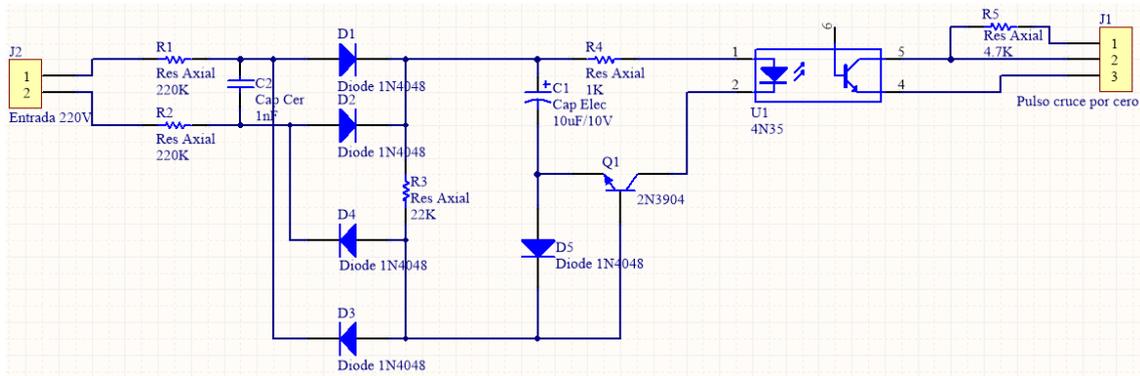


Figura 13: Esquemático.

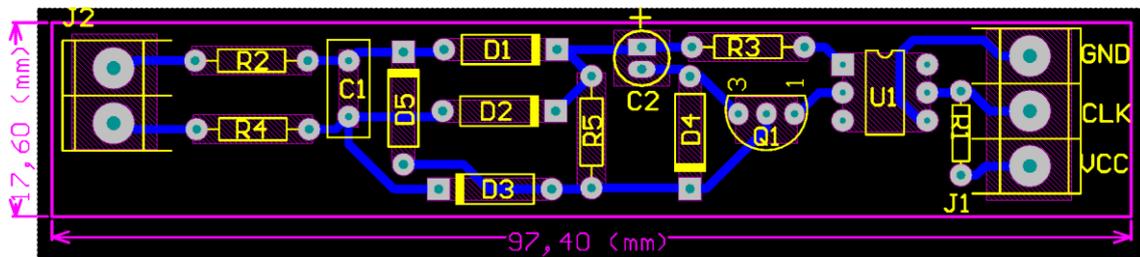


Figura 14: Diagrama de PCB.

El microcontrolador es interrumpido por este pulso en 2 tiempos cuando pasa de bajo a alto y cuando pasa de alto a bajo. En el primer caso se prende el módulo PWM para que la etapa de potencia conduzca corriente y en el segundo se apaga. Esto se explica en detalles en el siguiente apartado.

### 3.2.2 Etapa de potencia

Se diseñó una etapa de potencia que se conecta directamente a la tensión de red 220V, esta es rectificada por un puente de diodos y se conecta a la carga. Se utiliza un Mosfet IRF840A entre la carga y tensión rectificada para controlar el paso de la corriente. La activación y desactivación el mismo es controlada por un pulso de modulación PWM generado por un módulo en el microcontrolador.

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

7

D es el ciclo de trabajo

$\tau$  es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)

T es el período de la función

En las siguientes imágenes podemos ver el esquemático del circuito y su placa final en PCB:

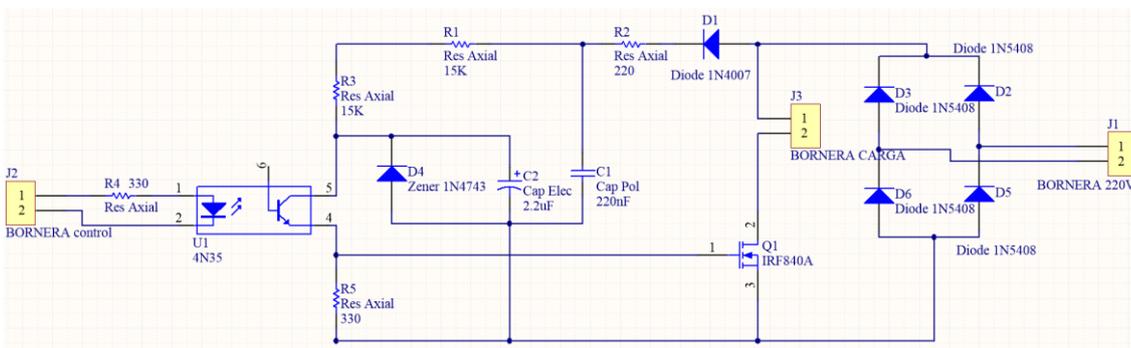


Figura 15: Esquemático.

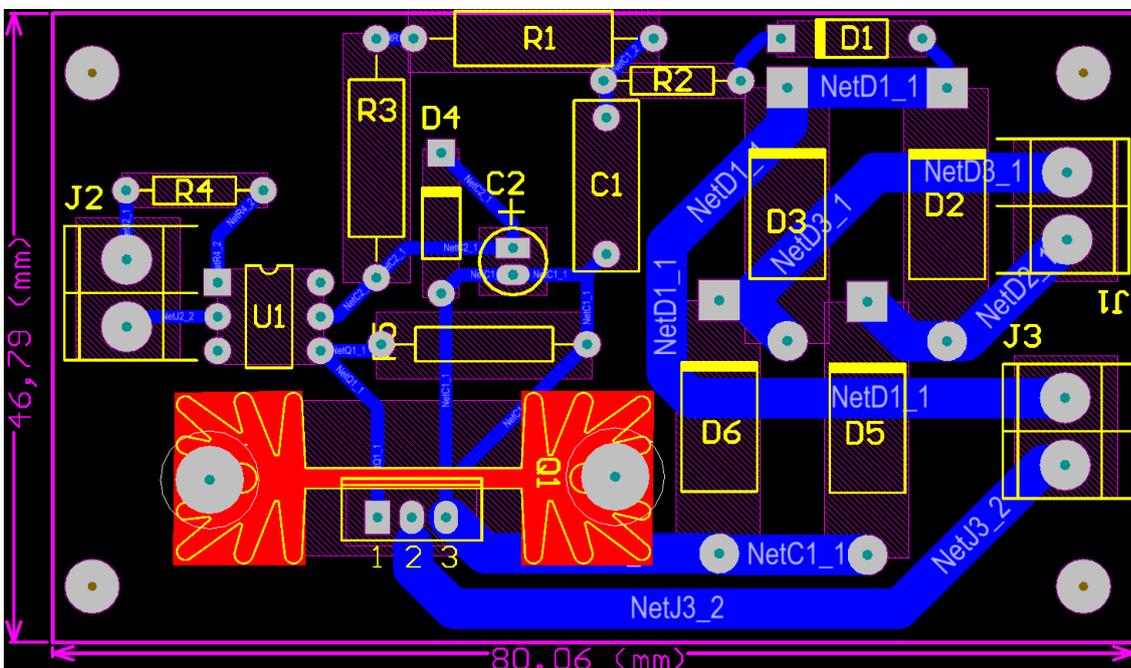


Figura 16: Diagrama de PCB.

Este circuito se encuentra aislado eléctricamente de la red a través del Opto acoplador 4N35 que se aprecia en la primera figura a fin de proteger el microcontrolador ante

cualquier eventualidad. En las siguientes imágenes mostramos un gráfico de la forma de onda entregada a la resistencia calefactora:

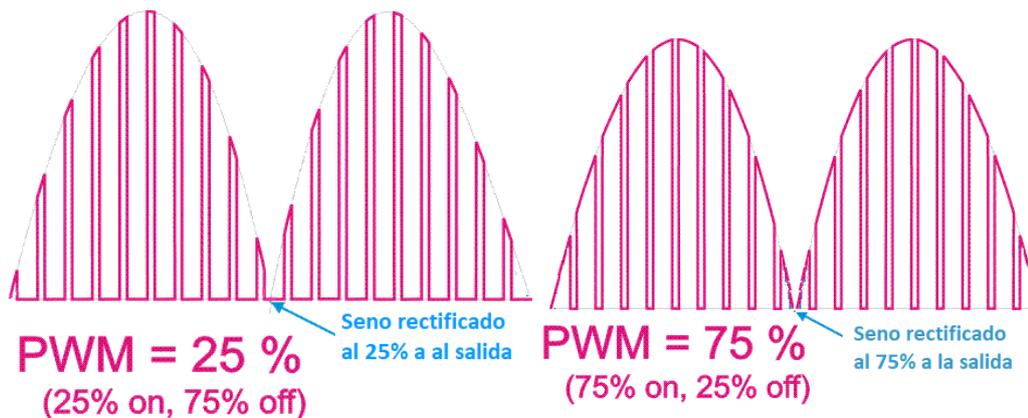


Figura 17: Forma de onda entregada a la carga al 25% y 75%.

Este sistema permite que cuando el ancho de pulso sea más chico menor potencia es entregada a la carga.

### 3.2.3 Sensor de temperatura

Las sondas de temperatura basadas en termopar determinan la temperatura midiendo la pequeña fuerza electromotriz que origina la unión de dos metales (conductores) distintos a distintas temperaturas; el llamado efecto termoeléctrico o efecto Seebeck. Son muy eficaces para trabajar con amplios rangos de temperaturas, especialmente en los tramos altos.

Las sondas de tipo K (cromel–alumel), son las más usadas, por su relación entre precio y prestaciones, capaces, de medir temperaturas entre  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Al del sistema de medida de temperatura basado en termopar, le acompaña la necesidad de resolver tres cuestiones para poder ser utilizado:

- capacidad de gestionar tensiones muy bajas (del orden de  $\mu\text{V}$ ) o amplificar la respuesta del termopar para que un microcontrolador pueda trabajar con ella.
- corrección de la medida de la sonda para equipararla a una distribución lineal (linealización de la respuesta del termopar).
- compensación de unión fría para corregir la dependencia que existe entre la temperatura medida por la sonda y la temperatura ambiente.

Se utilizó el IC MAX6675 que permite resolver de manera sencilla estos tres aspectos y además, gracias a que utiliza un bus SPI para las comunicaciones, es muy fácil utilizar en una aplicación basada en microcontrolador. Este integrado es capaz de medir temperaturas de entre 0 °C y +1024 °C utilizando 12 bits con una resolución de 0,25 °C. El tiempo de conversión de la temperatura del MAX6675 oscila entre los 170 ms y los 220 ms, por lo que se dejó un tiempo de 250 ms para asegurarse de que toma dentro de ese rango. A continuación, se muestra el esquemático y el circuito PCB del mismo extraído de la web del fabricante [2]

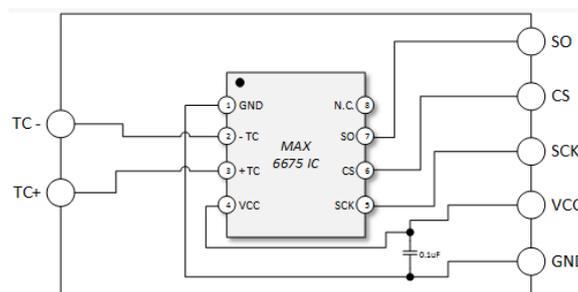


Figura 18: Esquemático.

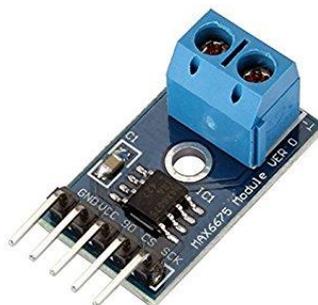


Figura 19: Diagrama de PCB.

Se portó una librería ya existente y funcionando en Arduino para que sea funcional con nuestro microcontrolador. La misma ya posee funciones de inicialización y lectura de este módulo.

### 3.2.4 Interfaz usuario

Se realizó una interfaz con el usuario sencilla a fin de poder configurar el horno en forma manual y ver el estado de la temperatura y potencia entregada. La misma cuenta con un display LCD 2x16 led que informan el estado del horno y un teclado para moverse por el

menú. En la siguiente imagen se puede ver una foto frontal de dicha interfaz seguida de un diagrama de flujo del menú que se visualiza en pantalla.



Figura 20: Interfaz usuario.

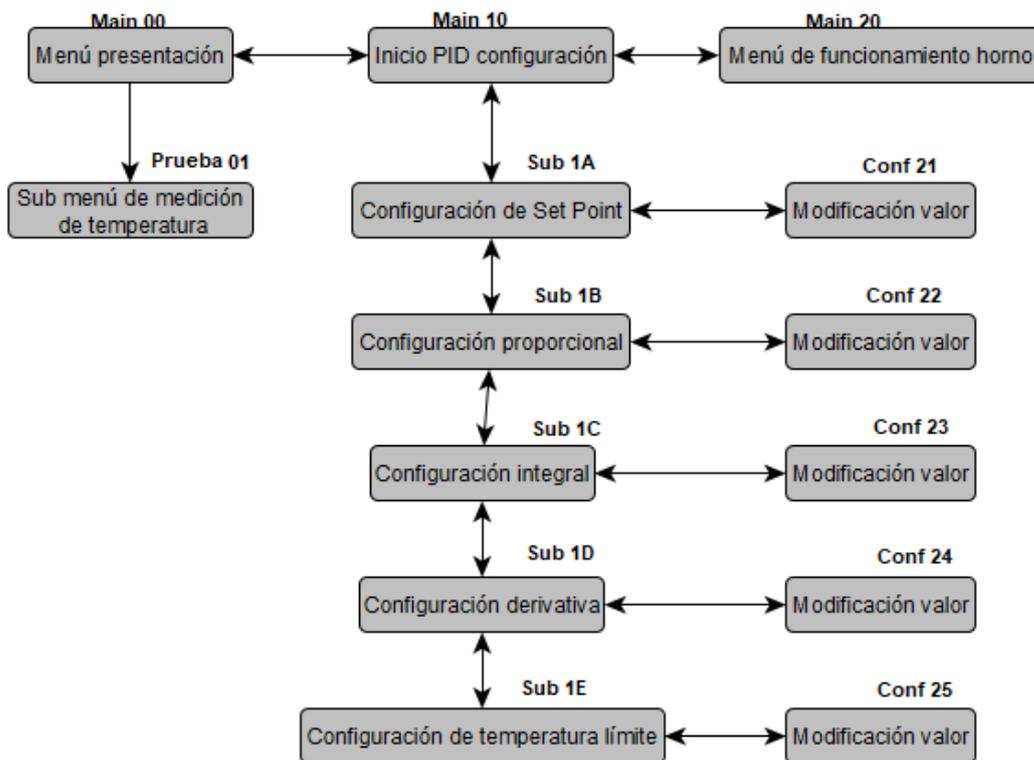


Figura 21: Diagrama flujo del menú.

Los diagramas esquemáticos y de placa se muestran a continuación:

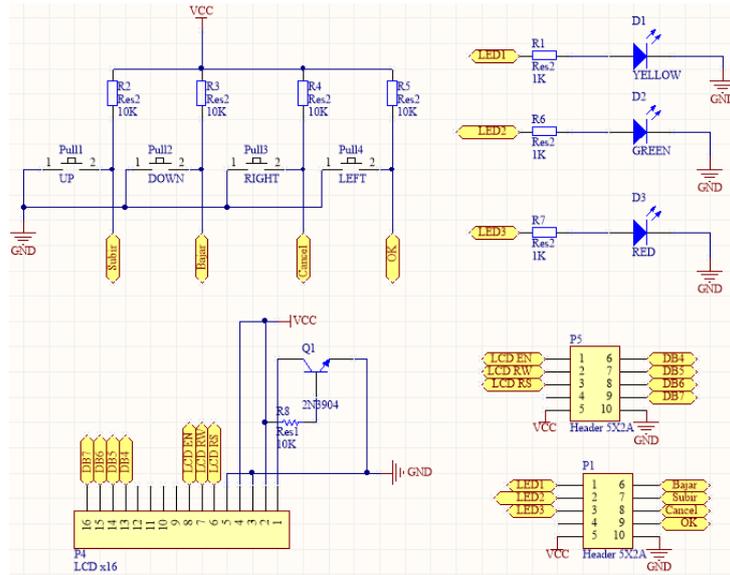


Figura 22 : Diagrama esquemático.

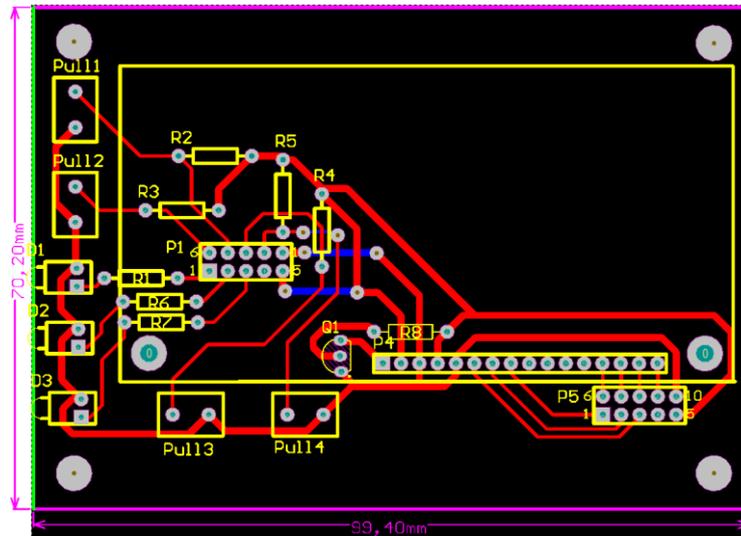


Figura 23: Diagrama PCB.

### 3.2.5 Controlador PID

Un regulador o controlador PID (proporcional, integral, derivativo) es un mecanismo de control retroalimentado en bucle cerrado ampliamente usado en sistemas de control industrial. Un PID calcula un error como la diferencia entre el valor actual del sistema y el valor al que se desea llegar. Además, intenta minimizar el error mediante el ajuste de las entradas del proceso.

En el cálculo del regulador PID intervienen tres parámetros distintos. Estos valores se pueden interpretar en función del tiempo. El proporcional P depende del error actual, el integral I depende de la suma de todos los errores pasados, y el derivativo D es la predicción de errores futuros, basándose en la tasa de cambio actual. La suma ponderada

de los tres términos permite ajustar un proceso mediante un elemento de control como por ejemplo la temperatura que debe alcanzar un horno.

$$U = P + I + D \quad 8$$

Mediante el ajuste de estas tres constantes en el algoritmo de control PID, el regulador es capaz de proporcionar acciones de control específicas a los requerimientos de un sistema. La respuesta del regulador se puede describir como la capacidad de respuesta ante un error, el grado en que el regulador llega más allá del punto de ajuste, y la oscilación del sistema.

El ajuste de las constantes se logra mediante el análisis del sistema, se puede llegar a ajustar el tiempo de respuesta, que es cuánto tiempo tarda el regulador en llevar al sistema a cierto estado. También se puede ajustar que el sistema llegue sin errores de posición y minimizar las sobre oscilaciones alrededor de la referencia o estado deseado.

Sin embargo, esto no siempre se puede ajustar perfectamente ya que si se quiere una respuesta muy rápida las oscilaciones son inevitables ya que el sistema no puede responder correctamente en tan poco tiempo. Esto es claramente un efecto negativo ya que por intentar aumentar el tiempo de respuesta se ha provocado una sobre oscilación y como consecuencia se ha ralentizado la respuesta.

Es importante mencionar que el uso de un regulador PID no garantiza un control óptimo ni estabilidad al sistema. Hay sistemas que son inestables. Un sistema es inestable si el valor regulado oscila indefinidamente, o sí dicho valor diverge sin límite del estado estable.

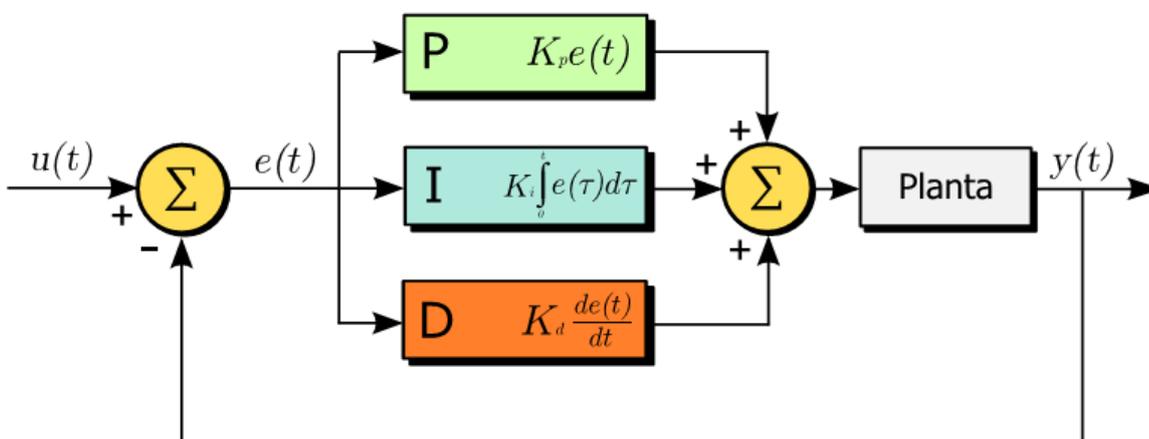


Figura 24: Diagrama de bloques de un Regulador PID.

Algunas aplicaciones solo requieren el uso de uno o dos parámetros para proporcionar un control apropiado al sistema, para no usar un parámetro simplemente hay que poner la ganancia del parámetro a cero. Dependiendo de los parámetros activos, los reguladores se pueden llamar PI, PD, P o I. Los reguladores PI son muy comunes ya que la acción derivativa D es sensible al ruido. Por otro lado, la ausencia de la acción integral puede evitar que el sistema llegue al valor deseado.

### 3.2.5.1 Término Proporcional

El término proporcional modifica la salida proporcionalmente con el error actual. La respuesta proporcional se puede ajustar multiplicando el error por una constante  $K_p$ , conocida como ganancia proporcional.

$$P = K_p e(t) \quad 9$$

Donde  $u$  es la salida y  $e$  el error en un instante de tiempo, de este modo cuanto más grande sea el error más rápido será la respuesta, y conforme el error se reduzca, la respuesta será más pequeña, hasta que finalmente el error sea cero y la respuesta nula ya que el valor deseado es el mismo que el valor actual.

Un controlador proporcional no siempre alcanza su valor objetivo, conservando un error de estado estacionario. Para eliminar este error hay que usar el término integral.

### 3.2.5.2 Término Integral

El término integral es proporcional a la magnitud del error y a la duración del error. Es decir, la suma de todos los errores en cada instante de tiempo o como su nombre indica la integración de los errores. Esta suma compensa la diferencia que debería haber sido corregida anteriormente. El error acumulado se multiplica por la ganancia integral  $K_i$  que indicara la cantidad de acción integral respecto de toda la acción de control.

$$I = K_i \int_0^t e(t) dt \quad 10$$

Al usar el integral junto al proporcional se acelera el movimiento del sistema llegando antes al valor deseado, es decir, menor tiempo de respuesta. Además, elimina el error

estacionario que se produce al usar un regulador proporcional. Sin embargo, el término integral tiene en cuenta los errores acumulados en el pasado y puede hacer que el valor actual sobrepase el valor deseado lo cual creará un error en el otro sentido, creando oscilaciones alrededor del valor deseado.

### 3.2.5.3 Término Derivativo

El término derivativo calcula la variación del error mediante la pendiente del error en cada instante de tiempo, es decir, la primera derivada con respecto al tiempo, y multiplica esa variación del error con la ganancia derivativa  $K_d$ , la cual indica la cantidad de acción derivativa respecto de toda la acción de control.

$$D = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad 11$$

El derivativo ralentiza la tasa de cambio de la salida del regulador y cuanto más cerca esta del valor deseado, se hace aún más lento. Por tanto, el uso del derivativo sirve para disminuir las oscilaciones producidas por el control integral y así mejorar la estabilidad del proceso de regulación. Uno de los inconvenientes es que, al hacer la derivada, el ruido es amplificado, y hace al regulador más sensible a las interferencias llevando al sistema a la inestabilidad en el peor de los casos.

### 3.2.5.4 Ecuación del regulador

Los términos proporcional, integral y derivativo son sumandos para hallar la salida del regulador PID, sabiendo que  $u(t)$  es tal salida, la ecuación que define al algoritmo es la siguiente:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e_\tau d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad 12$$

Donde hay que tener en cuenta las siguientes consecuencias: La ganancia proporcional  $K_p$ , cuanto mayor es, más rápida es la respuesta ya que cuanto más grande es el error, más grande es la acción proporcional. Valores muy grandes pueden ocasionar oscilaciones o incluso la inestabilidad. La ganancia integral  $K_i$ , valores grandes eliminan más rápidamente los errores estacionarios. Sin embargo, puede provocar mayor sobre oscilación. La ganancia derivativa  $K_d$ , cuanto más grande es, más se reduce la sobre oscilación, pero ralentizan el tiempo de respuesta, y pueden llevar al sistema a la inestabilidad debido a la amplificación del ruido en el cálculo diferencial del error.

### 3.2.5.5 Ecuación del regulador discreta

Un microcontrolador solo es capaz de procesar valores discretos y finitos, así que para poder implementar el algoritmo de control de un regulador PID, es necesario discretizar la ecuación del regulador PID, una vez discretizada se calcula para cada uno de los instantes de tiempo muestreados el valor de la acción de control. Para cada instante de tiempo se vuelve a calcular una nueva acción de control utilizando la nueva salida del sistema, esto permitir al sistema avanzar hacia el estado deseado marcado por la referencia con cada nuevo cálculo. La ecuación discreta del regulador para poder ser implementada en un microcontrolador se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i T_s \sum_{k=0}^t e_k + K_d \frac{e(t) - e(t-1)}{T_s} \quad 13$$

Donde  $e(t)$  es el error de la respuesta del sistema en el instante  $t$ ,  $T$  es periodo de muestreo de la señal y  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son la ganancia proporcional, integral y derivativa del regulador, respectivamente.

### 3.2.6 Microcontrolador

Este sistema de control PID fue integrado en el microcontrolador mediante un algoritmo siguiendo lo expresado en el capítulo anterior. El diagrama de flujo nos queda como muestra la siguiente figura :

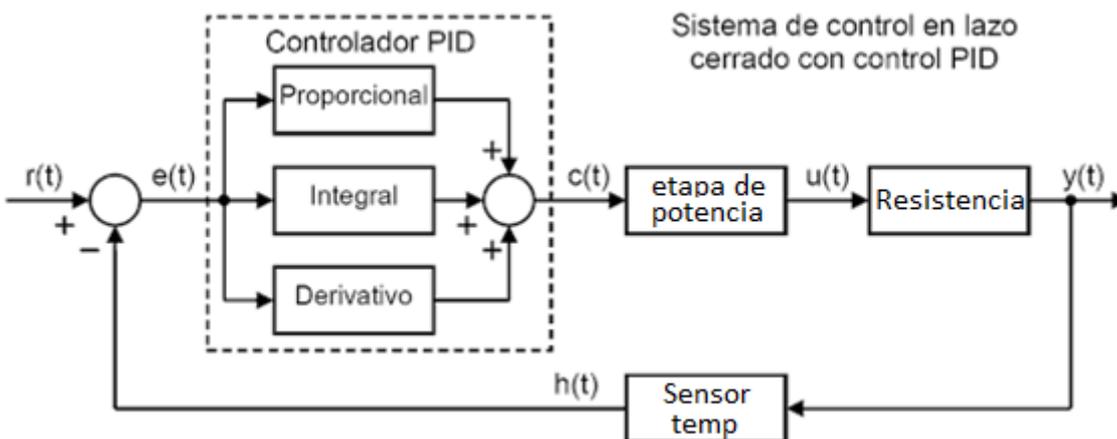


Figura 25: Diagrama de bloques de Regulador PID.

Nuestra planta es la resistencia y tenemos un elemento accionador que es la etapa de potencia, la misma va a entregar potencia a la resistencia, este paso de corriente va a

generar un aumento en la temperatura que será medido por nuestro sensor de temperatura y realimentando al circuito. La diferencia entre la temperatura deseada y la que mide el sensor produce un error que le permite al controlador PID calcular que potencia le será suministrada por la etapa.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo simplificado del algoritmo implementado en el horno:

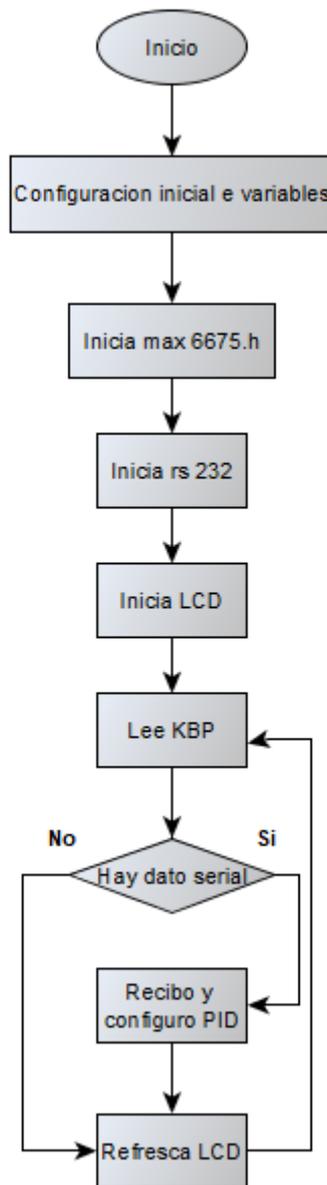


Figura 26: Diagrama de flujo Simplificado.

La función refrescar LCD es la que gestiona tanto lo que se muestra en pantalla como conectar con la función de implementa el algoritmo de control PID se muestra un diagrama de flujos de su funcionamiento

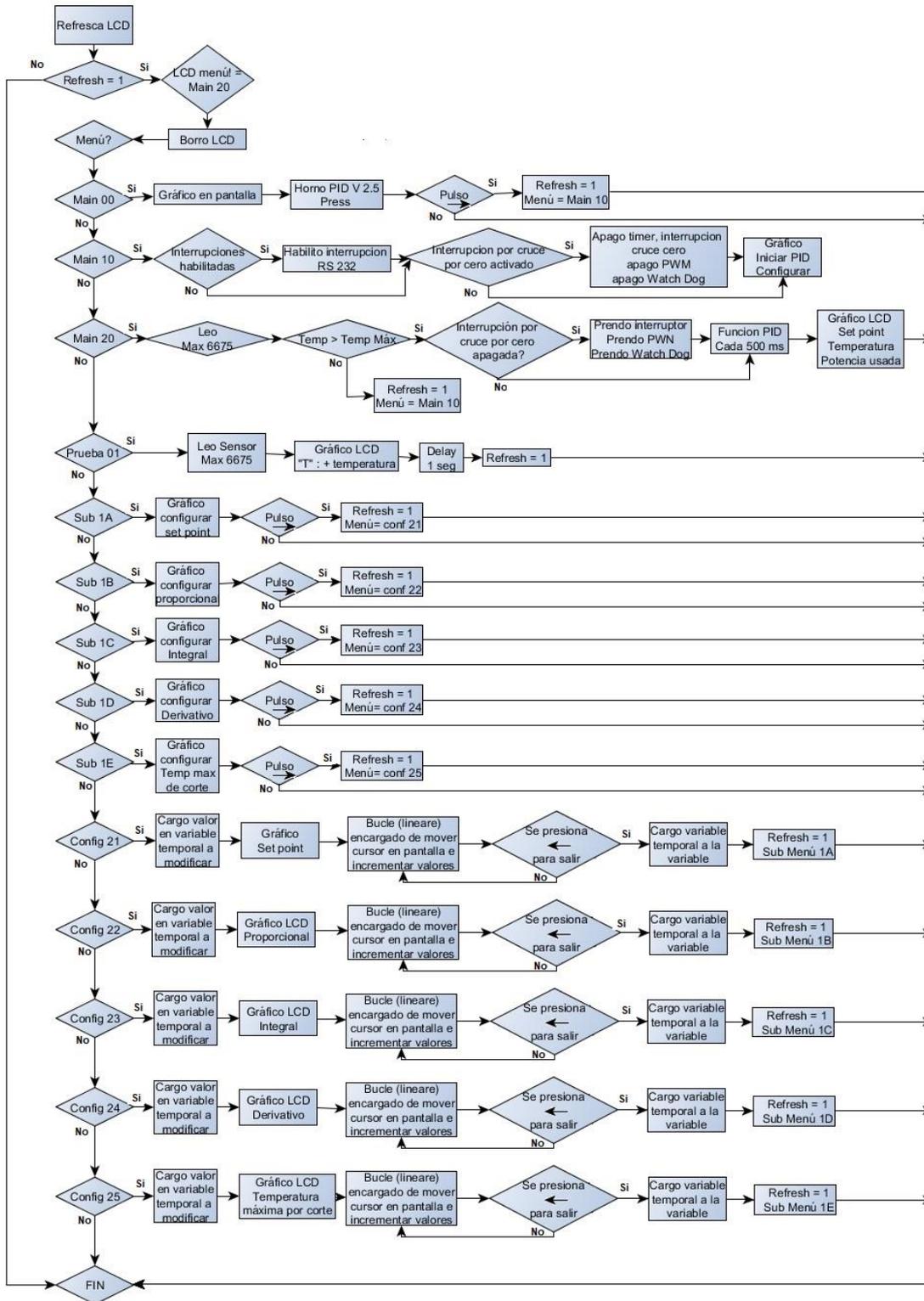


Figura 27: Diagrama de flujo Simplificado.

El menú Main20 que se visualiza en el diagrama es el más importante ya que encargado de mostrar los valores de potencia, el Setpoint o temperatura elegida, así como también la temperatura medida en la resistencia. Este además llama cada 500ms a la función de

cálculo de control PID para recalcular la potencia entregada a la resistencia. Se muestran a continuación fotos tomadas del horno ya finalizado:



Figura 28: Imagen frontal del horno



Figura 29: Imagen lateral

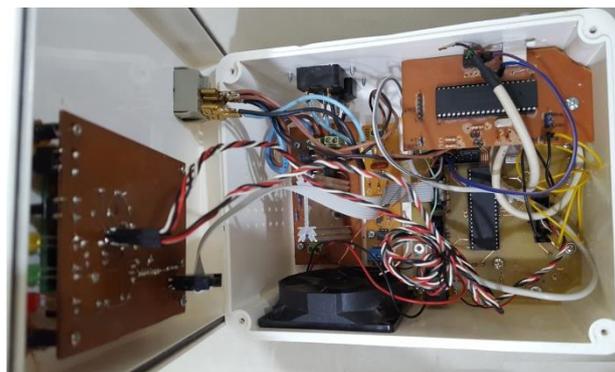


Figura 30: Imagen interna

### 3.3. Dispositivo de adquisición

Se vio a la necesidad de crear esta placa debido a que se necesitaba un sensor que midiera la temperatura en la placa fría y una conexión con la PC a través de la interfaz USB, la misma lleva mucho código y no entra junto el algoritmo del horno ya que se

excede la cantidad de memoria ROM del mismo. Para gestionar la conexión USB entre el microcontrolador y la PC se utiliza el Framework USB que provee la firma Microchip para su microcontrolador PIC 18F4550. El sensor de temperatura elegido se explica en el siguiente apartado. En el diagrama de la figura 3.1 se muestra que este dispositivo se encuentra entre el horno y la PC. El mismo permite tanto la lectura de la temperatura en la placa fría como así también enviar los valores de configuración desde el programa al horno a través de una interfaz RS232. En el siguiente diagrama de flujo se hace una explicación general del algoritmo de la misma

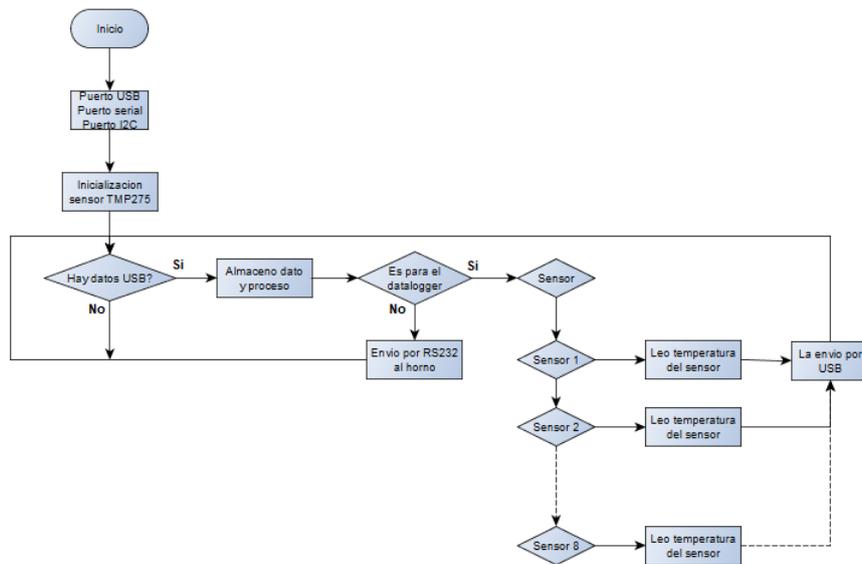


Figura 31: Diagrama de flujo del algoritmo

El diseño del circuito junto con la placa PCB se detallan en las siguientes imágenes:

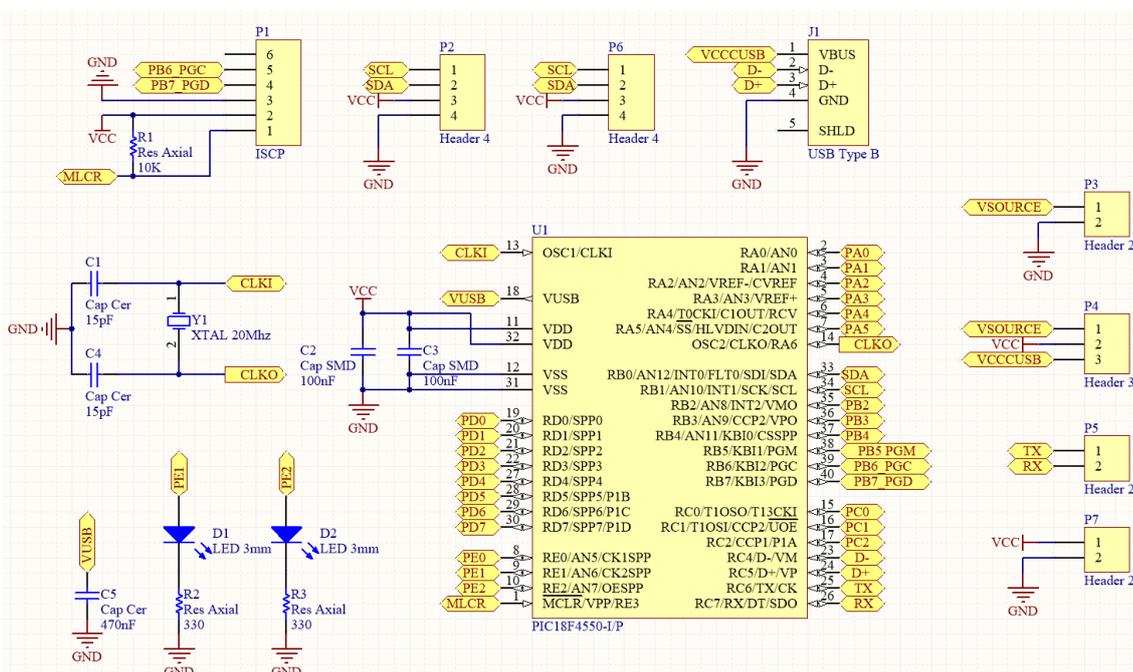


Figura 32: Diagrama esquemático

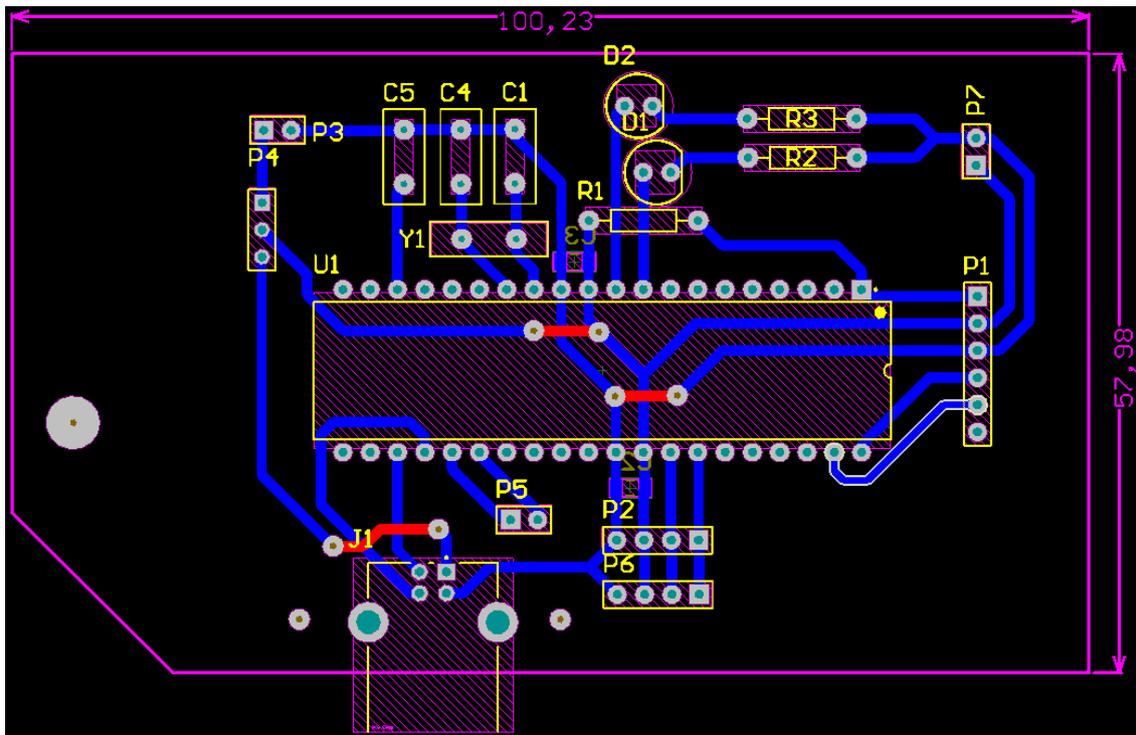


Figura 33: Diagrama PCB

Los conectores P2 y P6 permiten la conexión de dos sensores o un sensor y una placa expansora para los siguientes siete sensores.

### 3.2.1.5 Sensor de temperatura

Para este dispositivo se utiliza un sensor de temperatura TMP275 de la firma Texas Instrument, se lo eligió debido a que ya poseía uno. Este sensor es mucho más preciso al Max6675 utilizado en el horno, además tiene como ventaja que no necesita una termocupla para funcionar, sino que el dispositivo que toma las muestras de temperatura se encuentra incorporado en el encapsulado. Su interfaz de comunicación con el microcontrolador se hace a través del protocolo I2C, este protocolo tiene como ventaja posibilidad conectar desde uno hasta ocho sensores como máximo configurando su dirección con las patas 5, 6 y 7. La temperatura es entregada por el sensor en un formato digital de 12bits con una resolución de  $0.0625^{\circ}\text{C}$  por bit y una precisión de  $0.5^{\circ}\text{C}$  para un rango de temperatura de entre  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$  [4]. El tiempo de conversión de la temperatura al igual que el MAX6675 oscila entre los 170 ms y los 220 ms, por lo que se dejó un tiempo de 250 ms para asegurarse de que toma dentro de ese rango. A continuación, se muestra el esquemático y el circuito PCB diseñado:

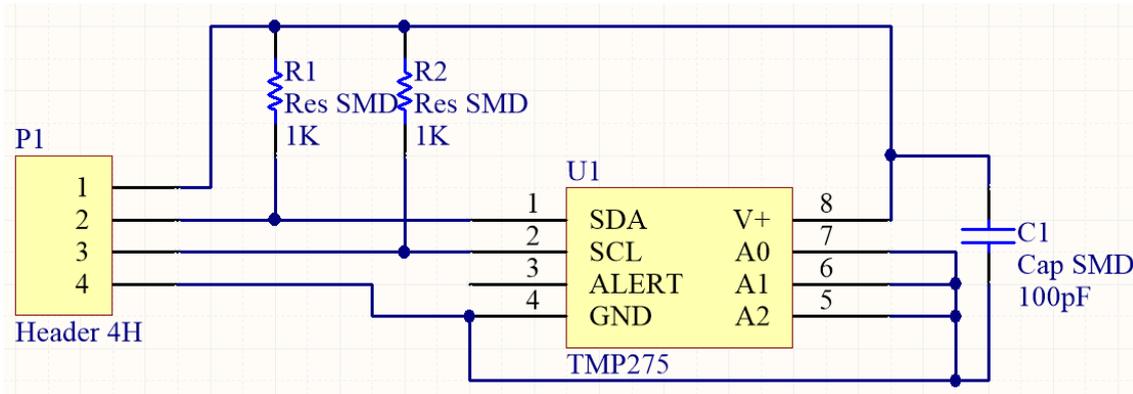


Figura 34: Diagrama esquemático TMP275.

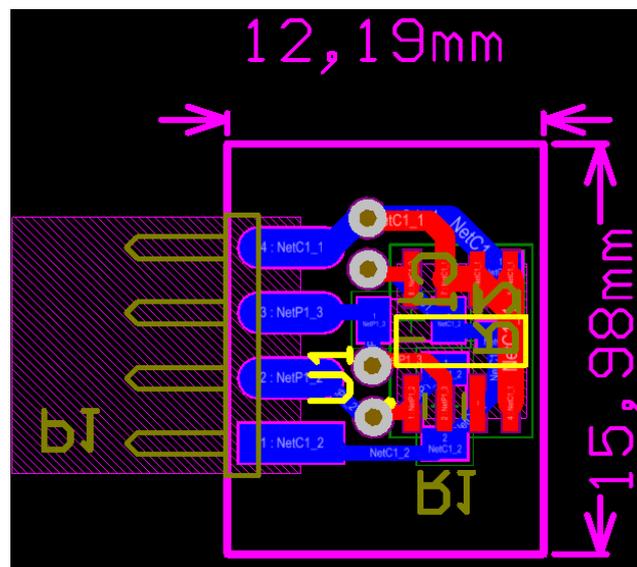


Figura 35: Diagrama PCB TMP275.

Como se ve en el diagrama de PCB se lo diseño lo más pequeño posible y se lo monto en un pequeño disipador para que no sea un obstáculo del flujo de calor entre la placa fría y el ambiente. En la siguiente imagen se ve el sensor terminado dentro de una carcasa impresa en 3D para mantenerlo sujeta a la placa fría



Figura 36: Sensor en Carcasa.

Para la comunicación de este módulo se portó una librería ya existente y funcionando en Arduino para que sea funcional con nuestro microcontrolador. La misma ya posee funciones de inicialización y lectura.

### 3.4. Software de adquisición.

Se desarrolló su software de adquisición que permita graficar y almacenar los valores de temperaturas medidos, así como también pueda calcular la constante de conductividad térmica. Se optó por escribirlo en QT que es una Interfaz de desarrollo (IDE) gratuita, la interfaz gráfica del software quedo como se muestra en la figura:

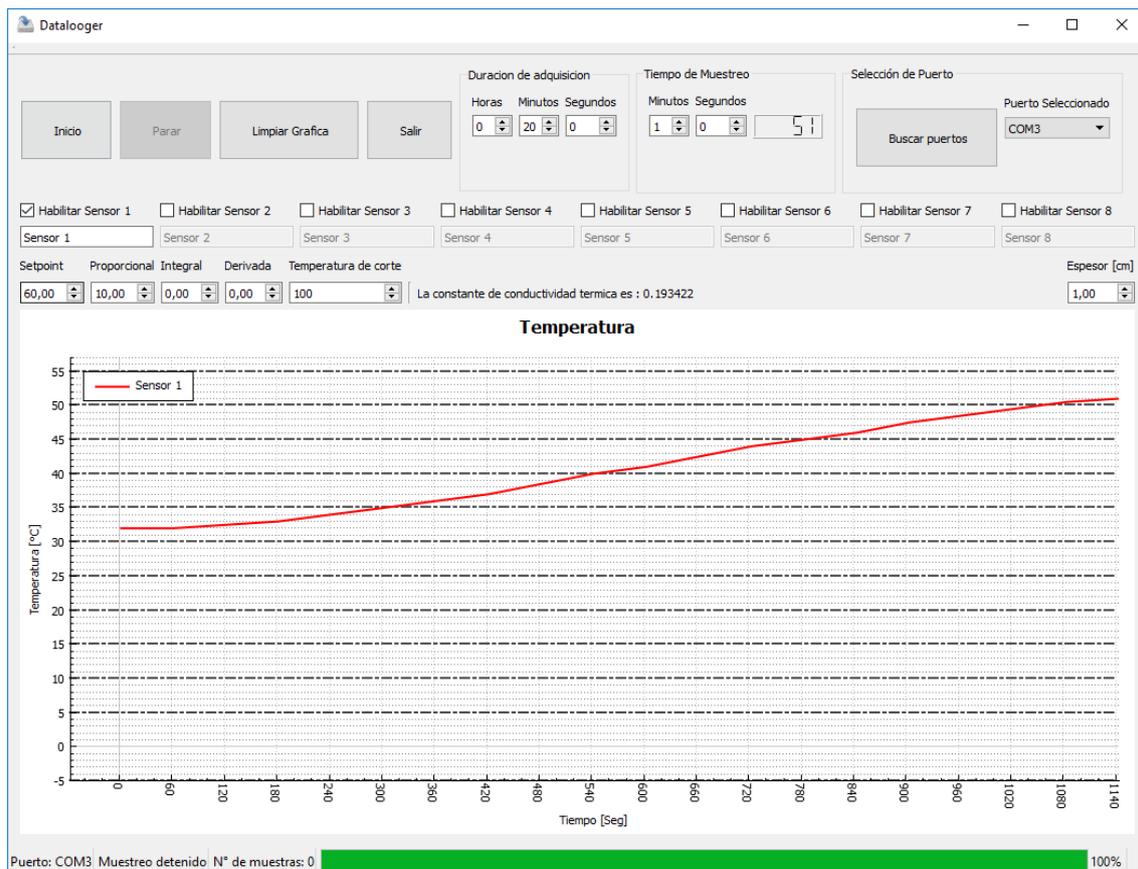


Figura 37: Interfaz gráfica del software.

Este software posee las siguientes funcionalidades:

- Parámetros del PID del horno si uno quisiese cambiarlos por alguna razón puede hacerse a través de programa, mismos ya están pre configurado una vez que inicia el programa. El set Point es la temperatura a la cual calentara el horno, se agregó una temperatura de corte a modo de protección para que el horno corte en caso de excederla y no aumente su temperatura indefinidamente. Es una función de protección por si el sensor de temperatura de realimentación falla.
- Selección el puerto USB al que esta enchufado el horno, y si este se conectó más tarde posee un botón de buscar que refresca el menú de puertos disponibles.

- Selección de la duración de la adquisición esto es porque dependiendo del tipo de material y del espesor puede demorar más o menos esta función se implementó a fin de apagar el horno después de un cierto tiempo de ensayo.
- Tiempo de muestreo permite elegir cada que intervalo de tiempo se tomara una muestra de temperatura, cuanto más aislante es el material los tiempos para los cuales aumenta en un grado su temperatura también aumentan.
- Selección de que sensores de temperatura a utilizar con un máximo de 8 con la capacidad de ponerle un nombre identificador a cada uno a fin de identificarlos en la gráfica y en el archivo que este mismo generara.
- Ingresar el espesor de la muestra para que una vez que termine el proceso de muestreo se el programa calcule la constante de conductividad térmica.
- Además de la gráfica posee un display número que muestra cada valor que es tomado por el sensor.
- En la barra inferior se informa el estado del progreso, así como también cuantas muestras faltan.

Una vez presionado el botón de inicio el programa chequea que el horno esté conectado y abre el puerto, se abre una ventana permitiéndonos ponerle un nombre de archivo y un lugar de almacenamiento y también el formato archivo en que será creado (archivo de texto .TXT o formato delimitado por comas .CSV). Una vez elegido esto el programa comienza a tomar muestras y a graficarlas en función de la duración de adquisición elegida y una vez que finaliza nos muestra en pantalla la constante de conductividad térmica. Todos estos valores son almacenados en el archivo para ser visualizados o procesados posteriormente. Se muestra un diagrama en bloques del software funcionamiento del programa:

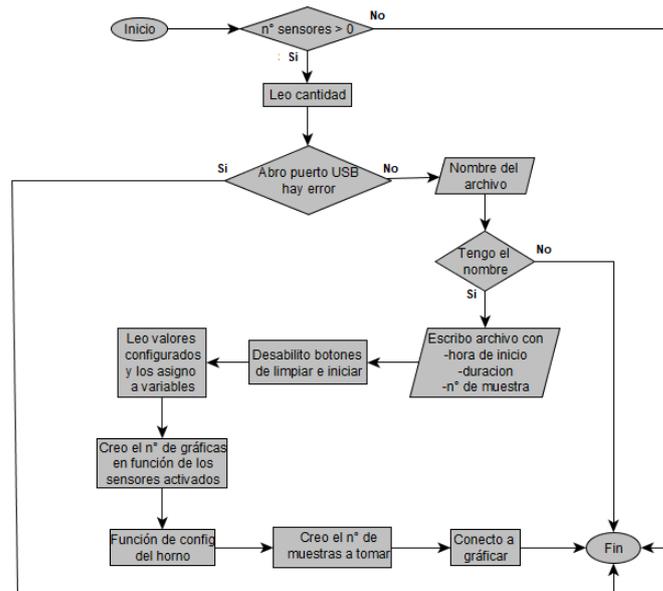


Figura 38: Diagrama de flujo del software parte 1.

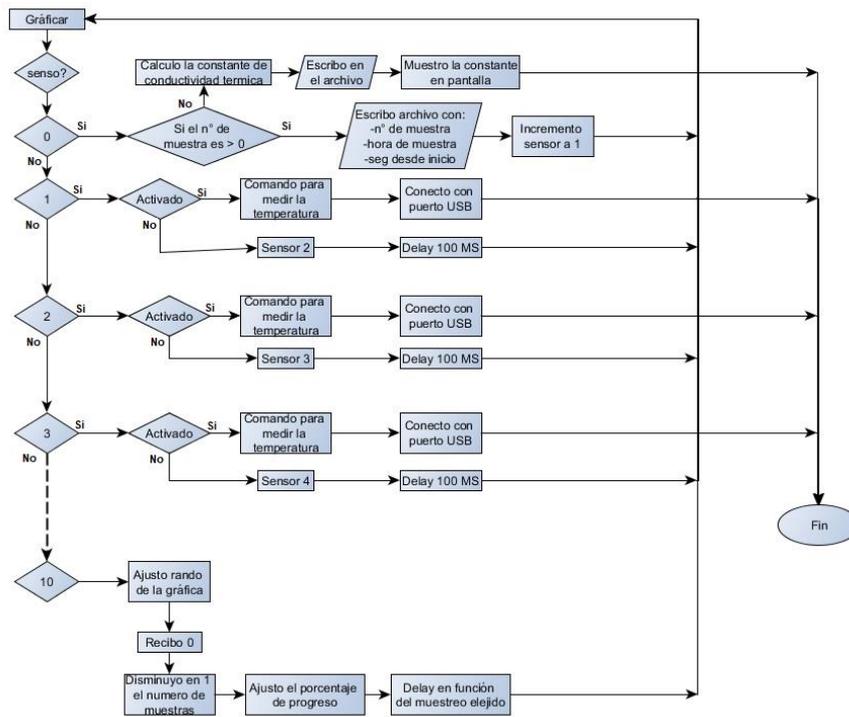


Figura 39: Diagrama de flujo del software parte 2

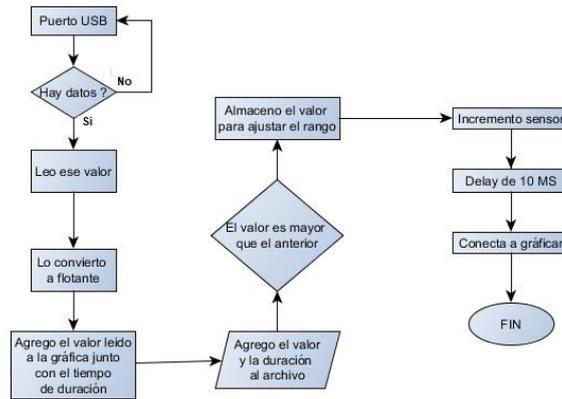


Figura 40: Diagrama de flujo del software parte 3

Si el archivo es grabado en .CSV fácilmente puede ser abierto con EXCEL y verlo representado rápidamente en filas y columnas para poder graficar o procesarlo de la forma que se desee, en la siguiente imagen se muestra cómo queda representado este archivo.

	A	B	C	D	E
1					
2	Medidas Tomadas el mié. 13. nov. 16:09:25 2017				
3					
4	Tiempo de muestreo: 00:1:0				
5					
6	Duracion [hh:mm:ss]: 0:20:0				
7					
8	Nro de muestra	Adquirida[hh:mm:ss]	Duracion[seg]	1:Sensor 1[°C]	
9	0	16:09:27	2	32	
10	1	16:10:27	62	32	
11	2	16:11:27	122	32.5	
12	3	16:12:27	182	33	
13	4	16:13:27	242	34	
14	5	16:14:28	303	35	
15	6	16:15:28	363	36	
16	7	16:16:28	423	37	
17	8	16:17:28	483	38.5	
18	9	16:18:28	543	40	
19	10	16:19:28	603	41	
20	11	16:20:28	663	42.5	
21	12	16:21:28	723	44	
22	13	16:22:29	784	45	
23	14	16:23:29	844	46	
24	15	16:24:29	904	47.5	
25	16	16:25:29	964	48.5	
26	17	16:26:29	1024	49.5	
27	18	16:27:29	1084	50.5	
28	19	16:28:29	1144	51	
29	La constante de conductividad termica es : 0.193422				
30					

Figura 41: Archivo .CSV representado en Excel.

## Capítulo 4: Resultados

En este capítulo se realizaron pruebas con diferentes materiales a fin de realizar las medidas y contrastar los valores obtenidos con los existentes en los diferentes materiales. Los ensayos se realizaron como muestra la siguiente figura

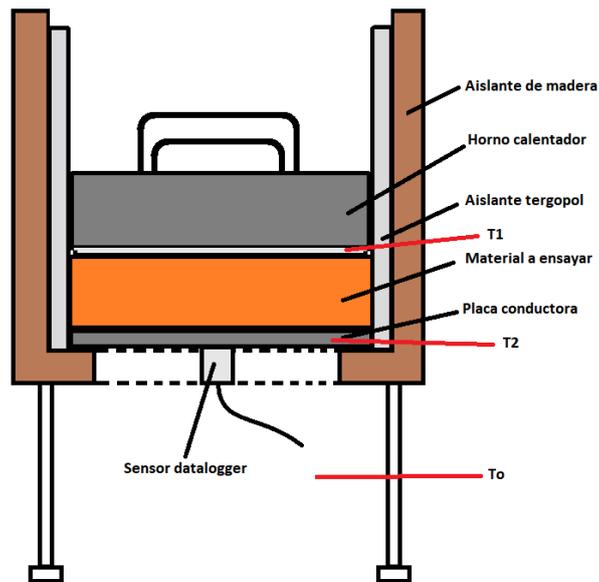


Figura 42: Muestra a ensayar en el horno.

Todos ensayos se realizaron con la misma superficie de 16x16 cm que es igual a 256cm<sup>2</sup> esta se tendrá en cuenta para los cálculos siguientes. La fórmula empleada para los cálculos la ecuación 2.x la misma que se repite a continuación:

$$\lambda = \frac{C.m.d}{A.(T_1 - T_2)} \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$$

Siendo  $\frac{\delta T}{\delta t}$  el coeficiente incremental de enfriamiento de la placa fría. Se obtuvo en el

capítulo 2 por aproximación la pendiente  $\frac{\delta T}{\delta t} = 0.0002T - 0.0049$  donde T es la temperatura final de equilibrio medido por el sensor datalogger en los siguientes apartados se muestran los ensayos.

#### 4.1 Ensayo con Retak

Se ensayo tres veces a una temperatura de 60°C un ladrillo Retak de 7.25cm de espesor, con un peso aproximado de 1037g y una densidad de 558 kg/m<sup>3</sup>. La humedad que se midió después de las pruebas y fue menor al 1% habiendo hecho una diferencia con su peso inicial y final. La temperatura ambiente aproximada de 25°C cuando se realizaban las pruebas en la siguiente tabla se muestran una de las pruebas realizadas

Duración[seg]	1:Retak[°C]	Duración[seg]	1:Retak[°C]	Duración[seg]	1:Retak[°C]
2	23.5	2286	28	4571	30.5
62	24	2347	28	4631	30.5
122	24	2407	28	4691	30.5
182	24.5	2467	28	4752	30.5
242	24.5	2527	28.5	4812	31
302	24.5	2587	28.5	4872	31
362	25	2647	28.5	4932	31
423	25	2707	28.5	4992	31
483	25	2767	28.5	5052	31
543	25	2828	28.5	5112	31
603	25.5	2888	28.5	5172	31
663	25.5	2948	29	5233	31
723	25.5	3008	29	5293	31
783	25.5	3068	29	5353	31
843	26	3128	29	5413	31.5
904	26	3188	29	5473	31.5
964	26	3248	29	5533	31.5
1024	26	3309	29	5593	31.5
1084	26.5	3369	29.5	5653	31.5
1144	26.5	3429	29.5	5714	31.5
1204	26.5	3489	29.5	5774	31.5
1264	26.5	3549	29.5	5834	31.5
1324	26.5	3609	29.5	5894	31.5
1385	27	3669	29.5	5954	31.5
1445	27	3729	29.5	6014	32
1505	27	3790	29.5	6074	32
1565	27	3850	30	6134	32
1625	27	3910	30	6195	32
1685	27	3970	30	6255	32
1745	27.5	4030	30	6315	32
1805	27.5	4090	30	6375	32
1866	27.5	4150	30	6435	32
1926	27.5	4210	30	6495	32
1986	27.5	4271	30	6555	32
2046	27.5	4331	30.5	6615	32

2106	28	4391	30.5	6676	32
2166	28	4451	30.5		
2226	28	4511	30.5		

Tabla N° 2: Cambio de temperatura en el Retak

Una vez que la temperatura llego a un valor de equilibrio de detuvo la prueba, también se eliminaron los valores repetidos a fin de achicar el tamaño de la misma. Como muestra la tabla anterior la temperatura de equilibrio fue de 32°C para la tercera prueba, de 30.5°C para la primera prueba y de 41°C para la segunda. Procedemos nuevamente con los cálculos de la misma forma que la sección anterior

Datos:

Masa de la placa fría  $m = 0.924$  [kg]

Capacidad calorífica del aluminio  $C = 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right]$

Area  $A = 256$  [cm<sup>2</sup>]

$T_1 = 60$  [°C]

Para prueba 1  $\frac{\delta T}{\delta t} (30.5^\circ\text{C}) = 0.0015 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda = \frac{C.m.d}{A(T_1 - T_2)} \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$$

$$\lambda_1 = \frac{0.924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 7.25[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0.0012}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 30.5^\circ\text{C})} = 0.097 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Para prueba 2  $\frac{\delta T}{\delta t} (31^\circ\text{C}) = 0.0017 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda_2 = \frac{0.924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 7.25[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0.0013}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 31^\circ\text{C})} = 0.107 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Para prueba 3  $\frac{\delta T}{\delta t} (32^\circ\text{C}) = 0.0013 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda_3 = \frac{0.924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 7.25[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0.0015}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C})} = 0.127 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Comparando este valor obtenido de las mediciones con el valor comercial del coeficiente  $\lambda$  para el material de ladrillo Retak

$$\lambda_{\text{Retak}} = 0,12 \left[ \frac{W}{m.K} \right] \text{ según el fabricante}$$

Se calculan los errores para las medidas

$$e_1 = \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_{\text{Retak}}}{\lambda_{\text{Retak}}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{0.097 - 0.12}{0.12} \right) \cdot 100 = -19.1\%$$

$$e_2 = \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_{\text{Retak}}}{\lambda_{\text{Retak}}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{0.107 - 0.12}{0.12} \right) \cdot 100 = -10.8\%$$

$$e_3 = \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_{\text{Retak}}}{\lambda_{\text{Retak}}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{0.127 - 0.12}{0.12} \right) \cdot 100 = 5.8\%$$

Como se puede apreciar para este material obtenemos valores muy cercanos a los provistos por el fabricante.

## 4.2 Ensayo con Aglomerado

Se ensayo dos veces a una temperatura de 60°C y una de 80°C para probar a mayor temperatura, una tabla de Aglomerado de 1.94[cm] de espesor, con un peso aproximado de 272[g] y una densidad de 577.88 [kg/m<sup>3</sup>]. La humedad que se midió después de las pruebas y fue de alrededor al 6.5% habiendo hecho una diferencia con su peso inicial y final. La temperatura ambiente aproximada de 25°C cuando se realizaban las pruebas en la siguiente tabla se muestran una de las pruebas realizadas

Duracion[seg]	1:Aglomerado[°C]	Duracion[seg]	1:Aglomerado[°C]	Duracion[seg]	1:Aglomerado[°C]
2	24.5	3249	35.5	6495	40
62	24.5	3309	35.5	6556	40
122	24.5	3369	35.5	6616	40
182	25	3429	35.5	6676	40
242	25	3489	36	6736	40.5
303	25	3549	36	6796	40.5
363	25	3609	36	6856	40.5
423	25.5	3670	36	6916	40.5
483	25.5	3730	36.5	6976	40.5
543	25.5	3790	36.5	7037	40.5
603	26	3850	36.5	7097	40.5
663	26	3910	36.5	7157	40.5
723	26	3970	37	7217	40.5
784	26.5	4030	37	7277	40.5
844	26.5	4090	37	7337	40.5
904	27	4151	37	7397	40.5
964	27	4211	37.5	7457	40.5
1024	27.5	4271	37.5	7518	40.5

1084	27.5	4331	37.5	7578	41
1144	28	4391	37.5	7638	41
1204	28	4451	38	7698	41
1265	28.5	4511	38	7758	41
1325	29	4571	38	7818	41
1385	29	4632	38	7878	41
1445	29.5	4692	38	7938	41
1505	29.5	4752	38	7999	41
1565	30	4812	38.5	8059	41
1625	30	4872	38.5	8119	41
1685	30.5	4932	38.5	8179	41
1746	30.5	4992	38.5	8239	41
1806	31	5052	38.5	8299	41
1866	31	5113	39	8359	41
1926	31.5	5173	39	8419	41
1986	31.5	5233	39	8480	41
2046	31.5	5293	39	8540	41
2106	32	5353	39	8600	41
2166	32	5413	39	8660	41
2227	32.5	5473	39	8720	41
2287	32.5	5533	39.5	8780	41
2347	32.5	5594	39.5	8840	41
2407	33	5654	39.5	8900	41
2467	33	5714	39.5	8961	41
2527	33.5	5774	39.5	9021	41
2587	33.5	5834	39.5	9081	41
2647	33.5	5894	39.5	9141	41
2708	34	5954	40	9201	41
2768	34	6014	40	9261	41
2828	34	6075	40	9321	41
2888	34.5	6135	40	9381	41
2948	34.5	6195	40	9442	41
3008	34.5	6255	40	9502	41
3068	35	6315	40	9562	41
3128	35	6375	40		
3189	35	6435	40		

Tabla N° 3: Cambio de temperatura en el Aglomerado

Una vez que la temperatura llego a un valor de equilibrio de detuvo la prueba, también se eliminaron los valores repetidos a fin de achicar el tamaño de la misma. Como muestra la tabla anterior la temperatura de equilibrio fue de 41°C para la primera prueba, de 40.5°C para la segunda prueba y de 41°C para la tercera. Procedemos nuevamente con los cálculos de la misma forma que la sección anterior

Datos:

Masa de la placa fría  $m = 0.924$  [kg]

$$\text{Capacidad calorífica del aluminio } C = 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right]$$

$$\text{Area } A = 256 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$T_1 = 60 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\text{Para prueba 1 } \frac{\delta T}{\delta t} (40.5^\circ\text{C}) = 0.0033 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$$

$$\lambda = \frac{C.m.d}{A(T_1 - T_2)} \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$$

$$\lambda_1 = \frac{0.924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 1.94[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0.0032}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 40.5^\circ\text{C})} = 0.104 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

$$\text{Para prueba 2 } \frac{\delta T}{\delta t} (48^\circ\text{C}) = 0.0047 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$$

$$\lambda_1 = \frac{0.924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 1.94[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0.0047}{256[\text{cm}^2] \cdot (80^\circ\text{C} - 41^\circ\text{C})} = 0.093 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

$$\text{Para prueba 3 } \frac{\delta T}{\delta t} (40^\circ\text{C}) = 0.0031 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$$

$$\lambda_3 = \frac{0.924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 1.94[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0.0031}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})} = 0.098 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Para el caso del aglomerado se encontró un trabajo donde se ensaya este material [X] y se ve que la constante de conductividad térmica  $\lambda$  cambia o es mayor en función de su densidad. Para un valor de densidad de  $500[\text{kg/m}^3]$   $\lambda$  es igual a  $0.087 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$  y para un

valor de densidad  $600[\text{kg/m}^3]$   $\lambda$  es igual a  $0.09 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$ . Elegimos el valor de 600 de densidad debido a que es el más cercano a nuestro valor de densidad

$$\lambda_{\text{Aglomerado}} = 0.09 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right] \text{ según el fabricante}$$

Se calculan los errores para las medidas

$$e_1 = \frac{(\lambda_1 - \lambda_{Aglomerad})}{\lambda_{Aglomerad}} \cdot 100 = \frac{(0.104 - 0.09)}{0.09} \cdot 100 = 15.5\%$$

$$e_2 = \frac{(\lambda_1 - \lambda_{Aglomerad})}{\lambda_{Aglomerad}} \cdot 100 = \frac{(0.093 - 0.09)}{0.09} \cdot 100 = 3.33\%$$

$$e_3 = \frac{(\lambda_1 - \lambda_{Aglomerad})}{\lambda_{Aglomerad}} \cdot 100 = \frac{(0.098 - 0.09)}{0.09} \cdot 100 = 8.8\%$$

Como se puede apreciar para este material obtenemos valores muy cercanos a los provistos por el fabricante siendo la primera medida la más alejada suponemos que la misma está afectada por la humedad debido a que ya poseíamos esta muestra y estuvo mucho tiempo guardada y pudimos apreciar que después que se realizó la segunda prueba a 80 grados tanto la muestra dos como tres dieron mejores valores.

### 4.3 Ensayo con MDF o Fibrofácil

Se ensayo tres veces a una temperatura de 60°C, una tabla de MDF o fibrofácil de 0.9[cm] de espesor, con un peso aproximado de 241[g] y una densidad de 1046 [kg/m<sup>3</sup>]. La humedad que se midió después de las pruebas y fue de alrededor al 4% habiendo hecho una diferencia con su peso inicial y final. La temperatura ambiente aproximada de 25°C cuando se realizaban las pruebas en la siguiente tabla se muestran una de las pruebas realizadas

Duración[seg]	1:MDF[°C]	Duración[seg]	1:MDF[°C]	Duración[seg]	1:MDF[°C]
2	36	2768	42	5533	45.5
62	36	2828	42.5	5594	45.5
122	35.5	2888	42.5	5654	45.5
182	35.5	2948	42.5	5714	45.5
242	35.5	3008	42.5	5774	45.5
303	35	3068	43	5834	45.5
363	35	3128	43	5894	45.5
423	35	3189	43	5954	45.5
483	35	3249	43	6014	45.5
543	35	3309	43	6075	45.5
603	35.5	3369	43	6135	45.5
663	35.5	3429	43.5	6195	45.5
723	35.5	3489	43.5	6255	45.5
784	36	3549	43.5	6315	45.5
844	36	3609	43.5	6375	46
904	36.5	3670	43.5	6435	46
964	36.5	3730	43.5	6495	46
1024	37	3790	44	6556	46
1084	37	3850	44	6616	46
1144	37.5	3910	44	6676	46

1204	37.5	3970	44	6736	46
1265	38	4030	44	6796	46
1325	38	4090	44	6856	46
1385	38.5	4151	44	6916	46
1445	38.5	4211	44.5	6976	46
1505	39	4271	44.5	7037	46
1565	39	4331	44.5	7097	46
1625	39.5	4391	44.5	7157	46
1685	39.5	4451	44.5	7217	46
1746	40	4511	44.5	7277	46
1806	40	4571	44.5	7337	46
1866	40	4632	44.5	7397	46
1926	40.5	4692	44.5	7457	46
1986	40.5	4752	45	7518	46
2046	40.5	4812	45	7578	46
2106	41	4872	45	7638	46
2166	41	4932	45	7698	46
2227	41	4992	45	7758	46
2287	41	5052	45	7818	46
2347	41.5	5113	45	7878	46
2407	41.5	5173	45	7938	46
2467	41.5	5233	45	7999	46
2527	41.5	5293	45	8059	46
2587	42	5353	45	8119	46.5
2647	42	5413	45.5		
2708	42	5473	45.5		

Tabla N° 4: Cambio de temperatura en el MDF

Una vez que la temperatura llego a un valor de equilibrio de detuvo la prueba, también se eliminaron los valores repetidos a fin de achicar el tamaño de la misma. Como muestra la tabla anterior la temperatura de equilibrio fue de 46.5°C para la tercera prueba, y de 45.5°C para la segunda prueba y 46°C primera prueba. Procedemos nuevamente con los cálculos de la misma forma que la sección anterior

Datos:

Masa de la placa fría  $m=0.924$  [kg]

Capacidad calorífica del aluminio  $C= 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right]$

Area  $A= 256$  [cm<sup>2</sup>]

$T_1= 60$  [°C]

Para prueba 1  $\frac{\delta T}{\delta t} (46^\circ\text{C}) = 0.0043 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda = \frac{C.m.d}{A(T_1 - T_2)} \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$$

$$\lambda_1 = \frac{0,924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 0,9[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0,0043}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 46^\circ\text{C})} = 0,0907 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Para prueba 2  $\frac{\delta T}{\delta t} (45,5^\circ\text{C}) = 0,0042 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda_2 = \frac{0,924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 0,9[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0,0042}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 45,5^\circ\text{C})} = 0,0856 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Para prueba 3  $\frac{\delta T}{\delta t} (46,5^\circ\text{C}) = 0,0044 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda_3 = \frac{0,924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 0,9[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0,0044}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 46,5^\circ\text{C})} = 0,0929 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Los valores de conductividad térmica para la placa MDF son iguales a los del aglomerado su valor fue tomado como referencia de la Empresa MASISA que lo provee en una hoja de información en su pág. web

$$\lambda_{\text{MDF}} = 0,09 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right] \text{ según el fabricante}$$

Se calculan los errores para las medidas

$$e_1 = \frac{(\lambda_1 - \lambda_{\text{MDF}})}{\lambda_{\text{MDF}}} \cdot 100 = \frac{(0,0907 - 0,09)}{0,09} \cdot 100 = 0,7\%$$

$$e_2 = \frac{(\lambda_2 - \lambda_{\text{MDF}})}{\lambda_{\text{MDF}}} \cdot 100 = \frac{(0,0856 - 0,09)}{0,09} \cdot 100 = -4,8\%$$

$$e_3 = \frac{(\lambda_3 - \lambda_{\text{MDF}})}{\lambda_{\text{MDF}}} \cdot 100 = \frac{(0,0929 - 0,09)}{0,09} \cdot 100 = 3,22\%$$

Como se puede apreciar para este material obtenemos valores muy cercanos a los provistos por el fabricante en este caso no se aprecia un error muy grande debido a que la placa fue comprada nueva y no poseía signos de humedad

#### 4.4 Ensayo con Corcho

Se ensayo tres veces a una temperatura de 60°C, una plancha de Corcho de 0.2[cm] de espesor, con un peso aproximado de 14[g] y una densidad de 273.43 [kg/m<sup>3</sup>]. La humedad que se midió después de las pruebas y fue de alrededor al 5% habiendo hecho una diferencia con su peso inicial y final. La temperatura ambiente aproximada de 25°C cuando se realizaban las pruebas en la siguiente tabla se muestran una de las pruebas realizadas

Duración[seg]	1:Corcho[°C]	Duración[seg]	1:Corcho[°C]	Duración[seg]	1:Corcho[°C]
2	31	1987	46	3972	50.5
62	31	2047	46.5	4032	51
123	31	2107	46.5	4092	51
183	31	2167	47	4152	51
243	31.5	2227	47	4212	51
303	31.5	2288	47.5	4273	51
363	32	2348	47.5	4333	51
423	32.5	2408	48	4393	51
483	33.5	2468	48	4453	51
543	34	2528	48	4513	51
604	34.5	2589	48.5	4573	51
664	35.5	2649	48.5	4633	51.5
724	36	2709	48.5	4693	51.5
784	37	2769	49	4754	51.5
844	37.5	2829	49	4814	51.5
904	38.5	2889	49	4874	51.5
964	39	2949	49	4934	51.5
1025	39.5	3010	49.5	4994	51.5
1085	40	3070	49.5	5054	51.5
1145	41	3130	49.5	5114	51.5
1205	41.5	3190	49.5	5174	51.5
1265	42	3250	50	5235	51.5
1325	42.5	3310	50	5295	51.5
1385	42.5	3370	50	5355	51.5
1446	43	3430	50	5415	51.5
1506	43.5	3491	50	5475	51.5
1566	44	3551	50.5	5535	51.5
1626	44.5	3611	50.5	5595	51.5
1686	44.5	3671	50.5	5655	51.5
1746	45	3731	50.5	5716	51.5
1806	45.5	3791	50.5	5776	51.5
1866	45.5	3851	50.5	5836	52
1927	46	3911	50.5		

Tabla N° 5: Cambio de temperatura en el Corcho

Una vez que la temperatura llego a un valor de equilibrio de detuvo la prueba, también se eliminaron los valores repetidos a fin de achicar el tamaño de la misma. Como muestra la tabla anterior la temperatura de equilibrio fue de 52°C para la primera prueba, y de 51°C para la segunda prueba y 51.5°C primera prueba. Procedemos nuevamente con los cálculos de la misma forma que la sección anterior

Datos:

Masa de la placa fría  $m=0.924$  [kg]

Capacidad calorífica del aluminio  $C = 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right]$

Area  $A= 256$  [cm<sup>2</sup>]

$T_1= 60$  [°C]

Para prueba 1  $\frac{\delta T}{\delta t} (52^\circ\text{C}) = 0.0055 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda = \frac{C.m.d}{A(T_1 - T_2)} \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$$

$$\lambda_1 = \frac{0,924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 0,2[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0,0055}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 52^\circ\text{C})} = 0,0451 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Para prueba 2  $\frac{\delta T}{\delta t} (51^\circ\text{C}) = 0.0053 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda_2 = \frac{0,924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 0,2[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0,0053}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 51^\circ\text{C})} = 0,0386 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Para prueba 3  $\frac{\delta T}{\delta t} (51.5^\circ\text{C}) = 0.0054 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$

$$\lambda_3 = \frac{0,924[\text{kg}] \cdot 910 \left[ \frac{\text{w.s}}{\text{kg.K}} \right] \cdot 0,2[\text{cm}] \cdot 100 \left[ \frac{\text{cm}}{\text{m}} \right] \cdot 0,0054}{256[\text{cm}^2] \cdot (60^\circ\text{C} - 51,5^\circ\text{C})} = 0,0417 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$$

Para el caso del Corcho se realizó una investigación en la web debido a que no se encontró un fabricante que nos dé un valor exacto. Pero se encontró tabla de la facultad de ingeniería de buenos aires, así como también en otras pág. Web que el valor de a conductividad térmica dentro de un rango de 0.036 y 0.043  $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$

$$\lambda_{\text{Corcho}} = 0.036 - 0.043 \left[ \frac{W}{m.K} \right]$$

Se calculan los errores para las medidas

$$e_1 = \frac{(\lambda_1 - \lambda_{MDF})}{\lambda_{MDF}} \cdot 100 = \frac{(0.0451 - 0.043)}{0.043} \cdot 100 = 4,88\%$$

Debido a que la segunda y tercera prueba se encuentran dentro del rango de conductividad del corcho se calculó el error solamente de la primera prueba.

#### 4.5 Calibración

Las primeras mediciones realizadas estaban alejadas de los valores provistos por el fabricante. La calibración del aparato se hace en gran medida con una buena aproximación de la placa fría que está en contacto con la muestra, debido a que la misma está implicada en el cálculo de la constante de conductividad térmica. El sensor de temperatura elegido para leer la temperatura en la placa fría ya viene calibrado de fábrica y posee un error del 0.5[°C], a su vez como estas medidas toman mucho tiempo y el material tiene mucha inercia térmica elegimos despreciarlo. Cuando se ensayó la placa fría por primera vez para obtener su curva de aproximación se obtuvo una curva con mayor pendiente y el valor mínimo que podíamos medir fue de 31 [°C]. Para poder tener una mejor aproximación se terminó la construcción final del horno, y se realizó una primera prueba que arrojó una mejor curva, pero la que se tomó como definitiva fue una segunda prueba que esta fue obtenida agregándole una mejor capa aislante sobre la cara interna del horno y dejándola enfriar desde una temperatura de 80[°C] a la temperatura de 26[°C], que es la temperatura ambiente. La pendiente de aproximación y su obtención es la que se muestra al final del capítulo 2.

## Capítulo 5: Análisis de Costos

A continuación, se detallan los costos que llevaron a la realización de este proyecto:

Recursos materiales			
Insumo	Cantidad	Costo / u (\$)	Total (\$)
Placa para control de horno (contiene PIC18F4550, placa, conectores y componentes varios)	1	700	600
Placa Datalogger (contiene PIC18F4550 , placa conectores componentes varios y placa)	1	500	500
Control de potencia para horno (IRF840A componentes varios y placa)	1	150	150
Kit Max6675 con termocupla	1	450	450
Circuito detector de cruce por cero (placa y compontes varios)	1	70	70
Circuito para interfaz con el usuario (LCD 2x16, placa, y botones)	1	160	160
Caja estanco - dispositivo de medición	1	70	70
Cooler para refrigeración	1	50	50
Fuente Switching 5V	1	100	100
Alambre resistivo bobinado para calefactor	1	340	340
Ladrillo refractario para calefactor	1	200	200
Placas de Aluminio para horno y placa fría	2	270	540
Cables por metros	10	25	75
Maderas varias para construcción del horno	8	92	92
Aglomerado, MDF, Retak, Corcho	5	60	60
Tornillos	25	30	30
<b>Total</b>			<b>3.487\$</b>

Tabla 6 – Costos de recursos materiales

Recursos humanos			
Concepto	Cantidad[hs]	Costo / ing (\$)	Total (\$)
Ingenio	960	300	288.000
<b>Total</b>	<b>960</b>		<b>\$288.000</b>

Tabla 7 – Costos de recursos humanos

Para el cálculo del costo de horas dedicadas de trabajo, se tomó en cuenta el costo del ingenio y los honorarios provistos por el Colegio de Ingenieros Especialistas de Entre Ríos (CIEER) RESOLUCIÓN N° 1380/2017 DE DIRECTORIO. El trabajo llevó un tiempo de realización de 240 días a razón de 4 horas por día. El costo total del proyecto es de \$291.487.

Este dispositivo podría ser vendido a cualquier empresa que se dedique al rubro de la construcción e innovación como así también a fabricantes que se encarguen de la fabricación de materiales de la construcción, no podemos dejar de lado laboratorios que no necesiten una gran precisión como tampoco instituciones universitarias o escuelas técnicas que deseen adquirir el producto para realizar medidas ya sea a fines educativos o comerciales.

## Capítulo 6: Conclusión.

Se ha desarrollado un equipo que permite medir el coeficiente de conductividad térmica de materiales utilizados en la construcción.

Este dispositivo cumple con las especificaciones de diseño de las normas ASTM C177-85, y aunque sólo se ha determinado, hasta el momento, el coeficiente de conductividad térmica para Retak, aglomerado, corcho y MDF (fibro fácil) permite estudiar también, en forma directa, las características térmicas de otros materiales como ser ladrillo, polietileno expandido, mosaicos, cartón, paneles diversos, etc. Al obtener esta constante de conductividad, podemos lograr analizar la aislación térmica de cada uno de ellos, esta información es de gran valor si se tiene en cuenta que lo que se busca hoy en día es lograr el mayor confort en los habientes construidos, para así lograr tenerlos calefaccionados y poder reducir el consumo energético renovable.

Los resultados que se obtuvieron satisfacen gratamente el objetivo planteando en un inicio, el de lograr medir la constante que permite conocer el comportamiento térmico reduciendo la incertidumbre de que material elegir a la hora de construir. Empresas fabricantes de materias primas (muy pocas) entre las especificaciones del producto detallan cuanto es la constante de conductividad, dicho estudio en Argentina lo realizan muy pocos institutos, uno de ellos es el Inti, dicho análisis tiene un costo elevado, con lo cual con este dispositivo que tiene un manejo y una portabilidad accesible, permite estar en el mercado para el alcance de fabricantes, permitiéndole a estos realizar ensayos del comportamientos de los materiales que producen previa verificación por el Inti.

En el proceso me encontré con las siguientes dificultades, una la de los sensores para medir la temperatura, debido a los altos valores alcanzados por el horno, los sensores eran imprecisos dentro de esos rangos, encontrando al final los que se detallaron en el presente trabajo. Se tuvieron que tener en cuenta también, la selección de materiales para el aislamiento térmico del horno y que soporten las temperaturas y no se combustionen, en un inicio fue con tergopol, pero a los 90 grados comienza a deformarse, obstandose por lana de vidrio (400°) y corcho, este último soporta 180°.

A este proyecto se podría hacer mejoras en el diseño al integrar todo en una sola placa y planteando una carcasa ajustada a esta nueva placa.

Un dispositivo muy similar pero no tan automatizado se utiliza en la UTN regional Santa Fe para tomar estas medidas, el cual se utilizó como punto de partida de este proyecto, ellos utilizan una placa calentadora en resistencia, pero las medidas son tomadas manualmente, se enciende, hasta una temperatura deseada y luego se la apaga y se toma el dato obtenido. Por lo cual se creó un sistema más moderno, el cual tiene un controlador de temperatura que además permite el almacenamiento de los datos en pc, y

las pruebas pueden ser realizadas en tiempos largos, sin tener que estar presentes, es decir, se lo deja funcionando y más tarde se pueden evaluar los resultados obtenidos.

Las mediciones tomadas arrojaron valores mejores de lo que se pensó, ya que encuentran dentro de los estándares planteados, esto se basa en la investigación que se hizo en diferentes universidades y fabricantes, y los mismo no establecen una constante fija, sino que la evalúan en un rango, ya que son afectada por diferentes agentes externos, como la humedad, la temperatura del ambiente, que puede variar desde el inicio al fin de la medición.

Este proyecto teniendo en cuenta el valor de los materiales es económico, el mayor valor es la hora dedicadas a la planificación y desarrollo del mismo, pero si pensamos que podemos prorratearlo en el las diferentes unidades que se puedan producir para la venta, termina siendo un producto accesible para la adquisición de empresas constructores o fabricantes de materiales. En la ciudad se consultó con una empresa de construcción SG construcciones SA y la misma se vio muy interesada, ya que estando en el tema lo ve como una herramienta de gran ayuda, se estimó un precio de venta de \$33.000, y el mismo fue presentado a dicha empresa y esta estuvo de acuerdo es que es un precio razonable, hasta económico, para la funcionalidad que se le poder dar.

## Capítulo 7: Bibliografía.

### 7.1 Libros

1. Transferencia de calor y masa – Yunus A. Cengel – Mc Graw Hill
2. Texto Universitario Transferencia de Calor - Ing. Alberto Emilio Panana Girio

### 7.2 Páginas web

- [1] [https://weblab.deusto.es/olarex/cd/kaernten/BBR\\_ES\\_new\\_27.09.2013/conveccin.html](https://weblab.deusto.es/olarex/cd/kaernten/BBR_ES_new_27.09.2013/conveccin.html)
- [2] <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/MAX6675.html>
- [3] [https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/51FxeVa1rKL\\_SY355\\_.jpg](https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/51FxeVa1rKL_SY355_.jpg)
- [4] <http://www.ti.com/product/TMP275>
- [5] <http://www.cieer.org.ar>
- [ ] <http://www.prodexcr.com/descargas/2%20Prodex%20Underfloor%20&%20Carpets.pdf>
- [ ] <https://www.plataformaarquitectura.cl/catalog/cl/products/1794/pisos-fotolaminados-clasicos-ab-kupfer>
- [ ] [http://www.masisa.com/chi/masisatricoyacl/brochures/Masisa\\_SUPER\\_MDF\\_USO\\_EXTERIOR.pdf](http://www.masisa.com/chi/masisatricoyacl/brochures/Masisa_SUPER_MDF_USO_EXTERIOR.pdf)
- [ ] <https://www.inti.gob.ar/construcciones/pdf/retak.pdf>
- [ ] [http://builddailys.com/es/pages/1647198\\_MDF](http://builddailys.com/es/pages/1647198_MDF)
- [ ] <http://files.pfernandezdiez.es/IngenieriaTermica/Tablas/PDFs/Tablas.pdf>
- [ ] <https://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc27/inti5.php>
- [ ] <https://www.inti.gob.ar/construcciones/equipamiento.htm>
- [ ] <https://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc27/inti4.php>
- [ ] [https://sites.google.com/site/picuino/pid\\_controller](https://sites.google.com/site/picuino/pid_controller)

Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Paraná

Se certifica que ..... , DNI: ..... ha realizado la  
dirección del Proyecto Final:

.....  
.....  
.....

De los alumnos:

- .....
- .....
- .....

Realizada durante el ciclo lectivo: ....., obteniendo el grupo un calificación final  
de: .....

A fin de ser emitida la correspondiente certificación por el departamento de electrónica, se extiende  
la siguiente constancia.

*Pañoni Sergio*

*Ramos Hector*

*Maggiolini Lucas*