

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño de un Banco de Pruebas para medir Propagación de la
combustión en Materiales que arden sin Llama"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Jerry Paul Panchana González

Miguel Ángel Udeo Guamán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por haberme brindado su apoyo durante toda mi vida estudiantil, a los profesores tutor y coordinador por ofrecerme su guía durante el desarrollo de este proyecto.

J.P

Agradezco a Dios principalmente ya que si no fuese por su amor y voluntad no se habría culminado el presente trabajo, a mis padres por ser los pilares fundamentales y apoyo de mi vida. A los tutores que han sabido guiar y compartir sus conocimientos.

M.U

.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Sr Jerry Paul Panchana González

Sr Miguel Ángel Udeo Guamán

PhD. Angel Diego Ramírez Mosquera

PhD. Freddy Xavier Jervis Calle

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Sr. Jerry Paul Panchana González

Sr. Miguel Ángel Udeo Guamán

PhD. Freddy Xavier Jervis Calle

RESUMEN

El presente proyecto de graduación tiene como objetivo general y fundamental, diseñar un banco de pruebas, para estudiar la propagación del frente de combustión de materiales que arden sin llama (smoldering). Resulta de mucha importancia el análisis de este tipo de combustión, debido a que la información existente sobre este fenómeno es muy limitada y es una de las principales causas de muertes en incendios en los Estados Unidos.

En nuestra vida cotidiana siempre vamos a estar rodeados de materiales que combustionan sin llama, uno de estos materiales es la espuma de poliuretano, la cual sirve como material de relleno en muebles y colchones, y que bajo ciertas condiciones se podría considerar como peligro.

En nuestro diseño los cálculos se basaron en conceptos de transferencia de calor, como por ejemplo el modelo de resistencia térmica en serie, para obtener los espesores de las paredes.

Conceptos básicos de la electricidad fueron aplicados para determinar la longitud de la resistencia calefactora y obtener el rango de corrientes de la fuente de poder. Con todo esto los materiales que cumplieron con los requerimientos para el banco de pruebas fueron: (acero al carbono, manta refractaria, ladrillo refractario, niquelina y pernos), mientras que para la adquisición de datos de temperatura se seleccionó (arduino mega, baquelita, fuente 12V, diodos, amplificadores, relé, transistores etc.)

Se diseñó un sistema de adquisición de datos respecto a las variaciones de temperaturas que se tendrá a futuro cuando se lleve a cabo la construcción del diseño, se realizó también el esquema del circuito y finalmente se presenta una simulación básica y simplificada del comportamiento del combustible dentro del banco de pruebas, con el fin de apreciar la forma de los datos a obtener. .

Palabras Clave:

Banco de pruebas, Combustion latente, Carbón, Arduino.

ABSTRACT

This graduation project aims general and fundamental, design a test bench, to measure the spread of materials to combust without flame front (smoldering). Since it is important the analysis and study of combustion without flame, since it is one of the leading causes of deaths in fire caused by smoldering in the United States. In our daily life will always be surrounded by material to combust without flame, among which we have is polyurethane foam which serves as filler in furniture and mattresses.

In our design is performed the analysis and calculations respective for the selection of materials, which met the requirements necessary for the Bank of tests and these were: (steel carbon, refractory blanket, refractory brick, thermal niccolite, angles and bolts), as for the acquisition of data of temperature is selected (arduino mega, bakelite, supply 12V, diodes, amplifiers, relay, transistors etc.)

As results of our design is obtained it acquisition of data concerning them variations of temperatures that is will have to future when is build the Bank of tests, is conducted also the scheme of the circuit and finally a simulation of the flow of transfer of heat to the material or fuel fossil is spread slowly, since its speed of propagation this between them 20-30 mm / h.

Finally reached the goal raised in designing a test bench capable of adapting the criteria and parameters of latent combustion (smoldering), was designed on the basis of all the requirements that this type of combustion entails, for study and analysis.

Keywords:

Bank of tests, Combustion latent, coal, Arduino.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE PLANOS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Marco teórico	2
1.3.1. Combustión	2
1.3.2. Tipos de Combustión	2
1.3.3. Combustión Latente	3
1.3.4. Importancia del estudio de Smoldering	5
1.3.5. Diferencias entre combustión latente (Smoldering) y combustión con llama (Flaming)6	
1.3.6. Estructura del frente de Smoldering	7
1.3.7. Regulación sobre combustión latente (smoldering).....	9
1.3.8. Combustibles característicos de Smoldering	10

CAPÍTULO 2	13
2. Metodología del Diseño	13
2.1. Características más relevantes del smoldering	13
2.2. Requerimientos de diseño	13
2.3. Diseño de forma	14
2.3.1. Diseño 1	14
2.3.2. Diseño 2	15
2.3.3. Diseño 3	15
2.4. Preselección de materiales	16
2.5. Selección del diseño	18
2.6. Selección de materiales	19
2.7. Cálculos de diseño	23
2.7.1. Diseño de las paredes compuestas	23
2.7.2. Unión de los materiales	31
2.7.3. Diseño de ángulos conectores	35
2.7.4. Cálculos de corriente	38
2.8. Detalles de las partes	41
2.9. Diseño del sistema de adquisición de datos	42
CAPÍTULO 3	46
3. Resultados	46
3.1. Análisis térmico	46
3.2. Análisis eléctrico	47
3.3. Análisis del sistema de control	50
Adquisición de datos	50
3.4. Información extraíble del banco de pruebas	52
3.5. Análisis económico	55

3.5.1. Costos de materiales.....	55
CAPÍTULO 4.....	57
4. Discusión y Conclusiones	57
4.1. Conclusiones	58
4.2. Recomendaciones	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59
APÉNDICES	60

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

UNE-EN Regulacion Smoldering

CEN/TC127 Comité Encargado en Desarrollo Smoldering

SIMBOLOGÍA

V: Voltaje

α : Coeficiente de difusividad

M: Metro

Cm: Centímetro

Mm: milímetro

Un: Número de nuselt

Pr: Numero de prandl

R: Resistencia

Q: Flujo de calor

Pot: Potencia

E: Espesor

L: Longitud

T: Temperatura

Kg: Kilogramos

ΔL : Deformación longitudinal

g : Gravedad

β : Coeficiente de expansión volumétrica

T_s : Temperatura superficial

T_∞ : Temperatura ambiente

γ : Viscosidad cinemática

α : Difusividad térmica

L : Longitud característica

\bar{h} : Coeficiente de convección promedio

A : Área de la superficie

ΔT : Diferencia de temperaturas

K_1 : Conductividad térmica

S_y : Límite de fluencia

σ : Esfuerzo en el perno

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Carbón ardiendo (ejemplo de smoldering).....	3
Figura 1.2 Flujo de aire en el sentido de propagación	4
Figura 1.3 Flujo de aire en sentido contrario a la propagación	5
Figura 1.4 Combustión Latente (smouldering) y combustión por llama (Flaming)	6
Figura 1.5 Estructura de combustión latente unidimensional sobre un cigarrillo	8
Figura 1.6. Carbón Vegetal.....	10
Figura 1.7. Turba	11
Figura 1.8. Humus	12
Figura 2.1 Diseño en base a hornos de tratamientos térmicos.....	14
Figura 2.2 Diseño a base concreto (hormigón).....	15
Figura 2.3 Diseño de placas compuestas empernadas	16
Figura 2.4 Partes del banco de pruebas.....	23
Figura 2.5 Modelo de resistencias en serie para la pared compuesta acero-fibra-acero	24
Figura 2.6 Esquematación de la caída de temperatura a través de la pared compuesta.	25
Figura 2.7 Unión de material externo, interno y aislante.....	31
Figura 2.8 Deformación del ángulo conector debido a la diferencia de dilatación de las placas de acero.....	35
Figura 2.9 Angulo conector como viga en voladizo.....	35
Figura 2.10 Pared compuesta con agujeros para insertar termopilas.....	41
Figura 2.11 Esquema general del amplificador AD620.....	43
Figura 2.12 Etapa de filtrado.....	44
Figura 2.13 Conmutación para 4 termopilas	45
Figura 3.1 Caída de temperatura en pared compuesta (ladrillo-fibra-acero)	46
Figura 3.2 Caída de temperatura en pared (acero-fibra-acero)	47
Figura 3.3 Partes del banco de pruebas	48
Figura 3.4 Partes del banco de pruebas	49
Figura 3.5 Banco de pruebas.....	50

Figura 3.6 Circuito amplificado.....	51
Figura 3.7 Configuración para 20 sensores de temperatura.....	52
Figura 3.8 Simulación del proceso de smoldering para el carbón.....	53
Figura 3.9 Evolución del proceso de smoldering	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Materiales preseleccionados y función	16
Tabla 2.2 Características de los materiales estructurales preseleccionados	17
Tabla 2.3 Característica de los materiales refractarios preseleccionados	17
Tabla 2.4 Características de los materiales aislantes preseleccionados	17
Tabla 2.5 Características de los materiales preseleccionados para la resistencia calefactora	17
Tabla 2.6 Matriz de ponderación para la selección de diseño	18
Tabla 2.7 Selección de diseño	18
Tabla 2.8 Matriz de ponderación.....	19
Tabla 2.9 Selección de material estructural	19
Tabla 2.10 Matriz de ponderación para material refractario.....	20
Tabla 2.11 Selección de refractario	20
Tabla 2.12 Matriz de ponderación para material resistivo calefactor	20
Tabla 2.13 Selección de material resistivo calefactor	21
Tabla 2.14 Matriz de ponderación para material aislante	21
Tabla 2.15 Selección de material aislante	21
Tabla 2.16 Matriz de ponderación para la selección de termopilas	22
Tabla 2.17 Selección de termopila.....	22
Tabla 2.18 Espesores de la pared compuesta.....	29
Tabla 2.19 Característica del perno pre-seleccionado.....	31
Tabla 2.20 Límites de longitud y corriente para la ignición	40
Tabla 3.1 Rango de corrientes al variar el voltaje	47
Tabla 3.2 Materiales y componentes para el circuito de adquisición de datos	50
Tabla 3.3 Datos de temperatura en diferentes tiempos	54
Tabla 3.4 Cantidad y costos de materiales	55

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Vista general
- PLANO 2 Placa grande (detalle 1)
- PLANO 3 Placa grande (detalle 2)
- PLANO 4 Placa pequeña
- PLANO 5 Angulo para esquinas
- PLANO 6 Angulo superior e inferior
- PLANO 7 Placa base
- PLANO 8 Placa superior
- PLANO 9 Placa superior (detalle 1)
- PLANO 10 Placa superior (detalle 2)

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La combustión latente (smolderig) es una de las causas más comunes que provocan incendios residenciales y pérdidas económicas que se aproximan a los 350 millones de dólares, solo en los Estados Unidos.

El primer trabajo científico realizado sobre combustión latente fue publicado en el año de 1957. Esta investigación consistió en una toma de datos y observaciones de ensayos simples realizados sobre polvo en combustión, este tipo de trabajos se lo realizaron hasta la mitad de la década de los 70. En la segunda mitad de la década de los 70, los ensayos e investigaciones se centraron en espumas poliméricas (el caso de la espuma flexible de poliuretano, aplicada como material de relleno en muebles y colchones) y cigarrillos, analizando principalmente la detección de humos y toxicidad. En la actualidad este tipo de reacción no ha sido estudiado tan a fondo como el fenómeno de combustión.

1.1. Descripción del problema

Existe la necesidad de estudiar y evaluar el comportamiento de los diferentes materiales que combustionan sin llama, con el fin de poder reflejar las condiciones críticas que den lugar a la ignición y su propagación.

Resulta imperativo entender este proceso de combustión y como varía de acuerdo a las condiciones del ambiente, parámetros como la velocidad del frente de combustión, concentración de oxígeno, calor disipado, temperatura y producción de gases son variables de interés y del banco de pruebas a diseñar deben poder obtenerse datos asociados, por lo que un buen diseño y su correcto funcionamiento permitirían tener resultados confiables.

El banco de pruebas debe ofrecer información suficiente para analizar la combustión de diferentes materiales de prueba en diferentes condiciones, con el fin de evaluar la resistencia o facilidad para empezar la ignición y propagar su frente de combustión.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Diseñar un banco de pruebas para evaluar la propagación del frente de materiales en combustión sin llama.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema capaz de generar la ignición en un material de interés.
- Diseñar el aislamiento térmico del sistema acorde a condiciones que se puedan generar en las pruebas.
- Realizar la integración de todos los sistemas e instrumentos requeridos con la ayuda de un software de adquisición de datos.

1.3. Marco teórico

1.3.1. Combustión

La combustión se define como una reacción química totalmente exotérmica, que se provoca entre un combustible y el oxígeno del aire en presencia de calor, el triángulo de fuego está formado por tres elementos (combustible, calor y oxígeno).

1.3.2. Tipos de Combustión

Lenta (Latente): Esta combustión se origina con emisión de luz y poca emisión de calor, debido a la baja cantidad de oxígeno que conlleva este proceso.

Normal: Esta combustión se produce con emisión de luz y calor notorios.

Rápida: Se aprecia en la inflamación de combustibles derramados y su velocidad con la que se propaga es menor que la del sonido.

Muy Rápida: Se aprecia en explosiones (acumulación de gases encerrados) y la velocidad con la que se propaga es mayor que la del sonido.

1.3.3. Combustión Latente

La combustión latente es una reacción exotérmica que se propaga en el interior de combustibles porosos. Se da principalmente en materiales como el carbón, cascarilla de arroz, aserrín, turba, humus etc. Su reacción es lenta no se requiere de altas temperaturas y se produce sin llama por lo que es capaz de perdurar durante largos periodos de tiempo, incluso horas, propagándose lentamente y produciendo gran cantidad de gases, hasta finalmente terminar en combustión por llama causando grandes incendios.

El smoldering tiene un interés particular en la seguridad contra incendios ya que los gases procedentes de este fenómeno pueden ser altamente tóxicos y su detección en el interior de un material es difícil, además frecuentemente es la fuente de inicio para los incendios con llama.

Este proceso constituye un riesgo de incendio importante por 2 motivos:

- Produce una mayor transformación de un combustible a compuestos tóxicos en comparación con una llama.
- Proporciona una ruta para que la inflamación del combustible pueda ser iniciada por fuentes de calor mucho más débiles que una llama.

El proceso físico de combustión latente puede explicarse de manera detallada como un frente de onda radiante y caliente que se mueve a través de un combustible poroso, mostrada en la figura 1.1 (Rein, 2002)



Figura 1.1 Carbón ardiendo (ejemplo de smoldering)

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

La propagación del smoldering se puede producir en una sola dimensión o en varias dimensiones, el frente de combustión se puede desplazar en el mismo sentido que la dirección del oxígeno o en movimiento contrario.

Movimiento unidimensional

Puede presentarse en 2 situaciones

- **Propagación en el mismo sentido**

Se da cuando el flujo de oxígeno se produce en la misma dirección que el movimiento del frente. El oxígeno fluye a través de la carbonización y reacciona en la zona de combustión y cuando esta se ha empobrecido, continúa hacia el combustible virgen. El transporte de calor hacia dicha zona se produce de manera convectiva y se genera un precalentamiento (Figura 1.2).

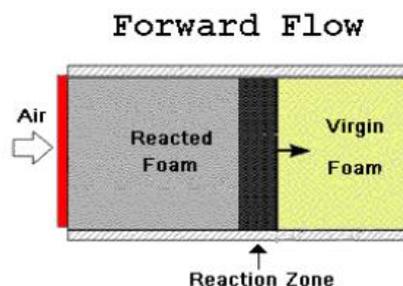


Figura 1.2 Flujo de aire en el sentido de propagación

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

- **Propagación en sentido contrario**

Se produce cuando el oxígeno fluye a través del combustible virgen y reacciona en la zona de combustión, una vez empobrecido viaja a la zona de carbonización. El transporte de calor por convección se produce hacia la zona de carbonización, reduciendo el precalentamiento del combustible (Figura 1.3).

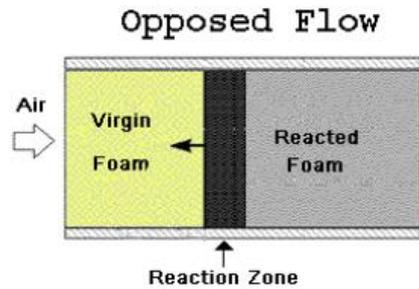


Figura 1.3 Flujo de aire en sentido contrario a la propagación

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

Movimiento multidimensional

Este tipo de propagación nos muestra factores tales como la geometría de la fuente para la ignición, geometría del combustible y la fuerte influencia del flujo de oxígeno las cuales normalmente interactúan entre sí para asegurar que la zona de reacción del smoldering tenga un gradiente de temperatura y en la propagación se desarrolle en varias dimensiones.

1.3.4. Importancia del estudio de Smoldering

Es de gran importancia como ya se ha indicado anteriormente, es un proceso que abarca un gran peligro y que puede convertirse en un gran incendio si se dan determinadas condiciones. Esta reacción puede darse en diferentes situaciones y escenarios.

Es importante el estudio y el conocimiento de este fenómeno ya que está causando riesgos en la industria aeroespacial, incendios forestales e incluso incendios subterráneos. Los incendios con smoldering generan productos de oxidación incompleta y por tanto emite una mezcla de gases y partículas asfixiantes e irritantes. El crecimiento es más lento en relación con los incendios producidos por llama, pero generan una gran amenaza cuando las personas están durmiendo, son incapacitadas, etc.

Se ha determinado que la amenaza para las personas es debido a CO y que se genera una masa considerada peligrosa a partir de los rangos de tiempo 50-150 min desde el inicio del incendio, además los detectores contra incendios en presencia de humo son poco efectivos para este tipo de reacción. (Rein, Smouldering Combustion Phenomena in Sciency and Tecnology , 2009)

1.3.5. Diferencias entre combustión latente (Smoldering) y combustión con llama (Flaming)

La principal diferencia entre combustión latente y combustión con llama se da en la forma de reacción de oxidación y en la liberación de calor que ocurre en la superficie de los materiales combustibles porosos. En la etapa final, estos ocurren en fase gaseosa alrededor del combustible, como se aprecia en la Figura 1.4



Figura 1.4 Combustión Latente (smouldering) y combustión por llama (Flaming)

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

La temperatura, velocidad de propagación y el calor liberado durante el proceso de smoldering son totalmente inferiores en comparación de un material sólido en combustión por llama. El rango de temperaturas alcanzado en combustión sin llama esta entre 250-500°C y energía liberada entre 6 y 12 KJ/g. la velocidad a la que se propaga es baja, y se encuentra aproximadamente en un rango de 10-30 mm/h, es

decir, 2 órdenes de propagación más bajo que la velocidad de propagación de la llama.

La transición del estado de smoldering a llama ocurre cuando se cumplen las condiciones críticas dentro de los poros, estas condiciones incluyen la inflamabilidad de la mezcla de gases dentro de los poros y el exceso de calor liberado por las fuertes reacciones de oxidación en fase sólida. La transición a llamas se puede ver favorecida por un aumento en los niveles de oxígeno y corrientes de aire (como por ejemplo el viento). La transición a las llamas solamente ha sido observada hasta la fecha en la propagación de un mismo sentido, debido a que los gases calientes precalientan el combustible que está por delante de la reacción. No obstante, esta transición no está lo suficientemente investigada y por ello el conocimiento no es adecuado en este momento.

El flujo de calor que se necesita para alcanzar la ignición en smoldering es más baja que la requerida para flaming. Por ejemplo la ignición de smoldering con espuma flexible de poliuretano se produce con un nivel de flujo de calor de 2KW/m², mientras que la ignición con llama se produce por encima de los 10KW/m².

1.3.6. Estructura del frente de Smoldering

Cuando se estudia la propagación a través del interior de materiales combustibles porosos, como ya se lo menciona anteriormente es importante considerar el proceso unidimensional y dividirlo en 2 configuraciones, es decir en un mismo sentido y en dirección opuesta. En estas situaciones se pueden distinguir 4 zonas:

Zona de precalentamiento del material

El calor generado por el frente de la combustión es transportado hacia la parte delantera para precalentar el combustible alcanzando temperaturas donde se produce la evaporación del agua.

Zona de evaporación

Es una reacción de tipo endotérmica que se produce en un rango de temperaturas entre 80 y 100 °C, produciendo vapor de agua. En este frente, la pérdida de masa depende de la cantidad de humedad que el combustible posea.

Zona de combustión

Es donde se producen las reacciones (pirolisis y oxidación), la reacción de pirolisis absorbe el calor y convierte el material combustible en gases volátiles, hidrocarburos aromáticos, trazas de CO y CO₂ y vapor de agua. Estas reacciones producen un residuo carbonizado. La pirolisis se da por encima de los 200°C. En cambio, la oxidación involucra una reacción exotérmica del combustible y la carbonización producida por el frente de la pirolisis. Este tipo de reacción se produce por encima de 300°C y es la principal fuente de CO y CO₂.

Zona de cenizas y carbonización

Esta es la zona donde la combustión latente (smoldering) ha cesado y la temperatura va descendiendo hasta llegar a la temperatura ambiente. La ceniza producida por la reacción es el contenido mineral presente en el combustible y la carbonización es el resultado de una combustión incompleta. (Penalva, 2015)

En la Figura 1.5 se muestran las zonas detalladas anteriormente.

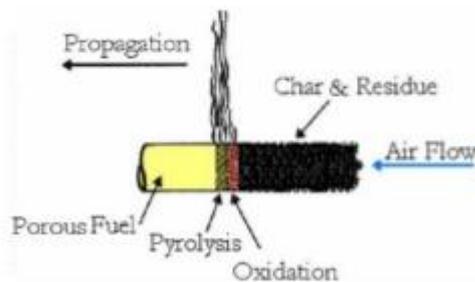


Figura 1.5 Estructura de combustión latente unidimensional sobre un cigarrillo

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

1.3.7. Regulación sobre combustión latente (smoldering)

En España hasta la fecha, la evaluación del proceso de smoldering solamente es considerado por las normas dedicadas al mobiliario.

El código técnico de edificación recoge la obligatoriedad de ensayar bajo las normas UNE-EN 1021-1 "Valoración de la inflamabilidad del mobiliario tapizado. Parte 1: Fuente de ignición: cigarrillo en combustión" y UNE-EN 1021-2 "Valoración de la inflamabilidad del mobiliario tapizado. Parte 2: Fuente de ignición: Llama equivalente a una cerilla"

En el ámbito constructivo, hay países como Noruega que tienen en cuenta el proceso de smoldering y disponen de requerimientos para los materiales aislantes combustibles en los áticos.

Los ensayos se llevan a cabo según la norma NT Fire 305 "Building products: Flammability and smoldering resistance of loose-fill thermal insulation".

En la actualidad se está desarrollando bajo el ámbito de CEN una norma Europea armonizada (FprEN 16733:2015), para la evaluación del smoldering en los procesos utilizados en construcción con vistas a que en el futuro este tipo de combustión sea incluido en el sistema Europeo de clasificación de reacción al fuego (UNE-EN 13501-1). El comité encargado de su desarrollo es el CEN/TC127 "Fire safety in Buildings".

Según el proyecto de norma, los criterios para llegar a la conclusión de que se ha producido smoldering sobre una muestra son los siguientes:

- 1.- Aparición de llama sostenidas en los bordes de la muestra y que no haya sido originadas por una propagación de llama visible sobre la superficie de la muestra.
- 2.- Re-ignición de la muestra después de haber pasado 5 minutos o de la retirada del quemador y después de que todas las llamas de la superficie se hayan extinguido.
- 3.- Un aumento mayor de 250°C de la temperatura medida por termopares después de la retirada de la llama.

4.- Ninguno de los termopares instalados sobre la muestra debe sobrepasar una temperatura mayor de 50°C después de haber transcurrido 6 horas desde el comienzo del ensayo o que se produzca un incremento de temperatura durante al menos 60 minutos. (Penalva, 2015)

1.3.8. Combustibles característicos de Smoldering

Combustibles son aquellas sustancias que pueden o tienen la capacidad de reaccionar químicamente con un agente oxidante, obteniendo como resultado energía liberada en forma de calor. Existe una gran variedad de combustibles fósiles, cada uno con diferentes porcentajes respecto a composición de humedad, carbón, azufre, cenizas etc.

A continuación, se presenta algunos de los tipos de combustibles para smoldering.

Carbón

Es un combustible de mucho interés, es uno de los recursos muy importantes y valiosos para la humanidad, por sus diferentes usos y aplicaciones. El carbón es un combustible sólido y poroso, de color pardo o negro principalmente de origen vegetal, es el producto de la obtención destructiva de la madera, contiene un rango de 10 y 15% de agua, 2 a 3% de cenizas y de 0.5 a 1.0% de hidrogeno. Su poder calorífico es de aproximadamente 27,9 MJ/Kg. (Figura 1.6)



Figura 1.6. Carbón Vegetal.

Fuente: Deconceptos.com.

Turba

Está formado de materia vegetal parcialmente descompuesta. Principalmente se acumula en lugares saturados de humedad, es usada principalmente en la agricultura como abono para las plantas y cultivos, una turba de alto grado se caracteriza por estar formada de un porcentaje típico de 90% de agua, 3% de carbón fijo, 5% de volátiles, 1.5% de cenizas y 0.1% de azufre. (Figura 1.7) El poder calorífico del material cuando está seco es de aproximadamente 20.9 MJ/Kg. (Polo, 1990)



Figura 1.7. Turba

Fuente: Jardicen.cl

Humus

Este combustible se define como una sustancia compuesta por ciertos desechos orgánicos que son de naturaleza coloidal, es decir materia orgánica transformada y estabilizada que se acumula en el suelo, lo cual proviene de la desintegración de los restos orgánicos por cuerpos y microorganismos benéficos (hongos y bacterias), y se caracteriza por su color negruzco debido a la gran cantidad de carbono que posee este combustible fósil, (Figura 1.8). Se encuentra principalmente en las partes altas de los suelos con actividad orgánica.

Los elementos orgánicos que componen el humus son muy estables, es decir, su grado de descomposición es tan elevado que ya no se descomponen más y no sufren transformaciones considerables. (et, 2007)



Figura 1.8. Humus

Fuente: León-García, 2007.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

2.1. Características más relevantes del smoldering

Para iniciar el proceso de diseño es necesario establecer los requerimientos básicos que deberá cumplir el banco de pruebas. Para generar estos requerimientos se han seleccionado las características más relevantes del proceso de smoldering:

- Las temperaturas alcanzadas en este tipo de combustión se encuentran en un intervalo de 250 a 500 °C.
- El combustible más común para el estudio de este tipo de combustión es el carbón y asimismo es el que alcanza mayores temperaturas de combustión.

2.2. Requerimientos de diseño

Basados en estas características se puede definir el requerimiento funcional más básico.

- El banco de pruebas debe soportar una temperatura máxima de 500 °C

De acuerdo a la funcionalidad se puede establecer que:

- El inicio de la combustión del material de prueba debe generarse en un extremo del banco y propagarse solo por las propiedades del combustible.

Por motivos de seguridad operacional se define el siguiente requerimiento:

- La temperatura superficial del banco de pruebas debe ser lo suficientemente baja como para ser considerado seguro de operar. Se considera 40°C como temperatura superficial adecuada.

Basados en información preliminar del comportamiento del carbón y por criterio de los diseñadores se tiene que:

- Las dimensiones definidas para el volumen interno del banco son de 0,3 m X 0,3 m x 0,5 m.

2.3. Diseño de forma

Todos los modelos presentados a continuación fueron basados en estructuras con funciones similares y se modelaron bajo criterios del estudiante, con el fin de adaptarlos a las condiciones de trabajo requeridas, se presentaron 3 modelos, para posteriormente seleccionar la alternativa que mejor se adapte a nuestras condiciones de diseño.

2.3.1. Diseño 1

El banco de pruebas en su forma más básica es una caja con estructura muy similar a los hornos para tratamientos térmicos, en la figura 2.1 se distingue una capa interna de material refractario, capaz de mantener contacto con el combustible en ignición y una capa externa de material metálico lo suficientemente rígido que permite la integración de todos los componentes, como se muestra en la Figura 2.1

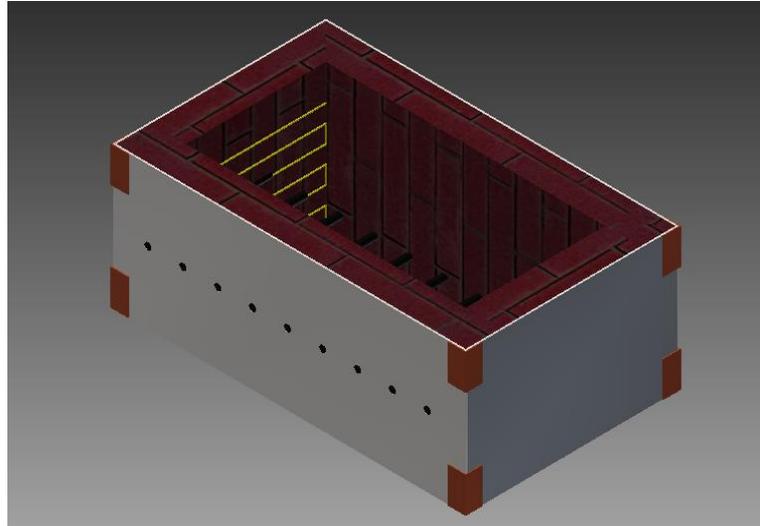


Figura 2.1 Diseño en base a hornos de tratamientos térmicos

Fuente: Elaboración propia

Los puntos fuertes de este diseño se basan en una estructura muy resistente a los cambios de temperatura y al choque térmico, características que le otorgan los ladrillos refractarios a base de sílice, pero presenta el inconveniente de ser muy pesado y difícil de manipular y/o trasladar.

2.3.2. Diseño 2

Como se puede observar en la figura 2.2 esta alternativa es muy similar al diseño 1, con la diferencia de que está formado por concreto (hormigón), lo que le da rigidez, pero con el inconveniente de la posibilidad a presentar fallas estructurales por la intermitencia de temperaturas en el banco. Asimismo, presenta la debilidad frente a los otros diseños de ser muy rustico, además de que se necesitarían espesores elevados para resistir los enormes flujos de calor generados por el combustible de prueba. (Figura 2.2)

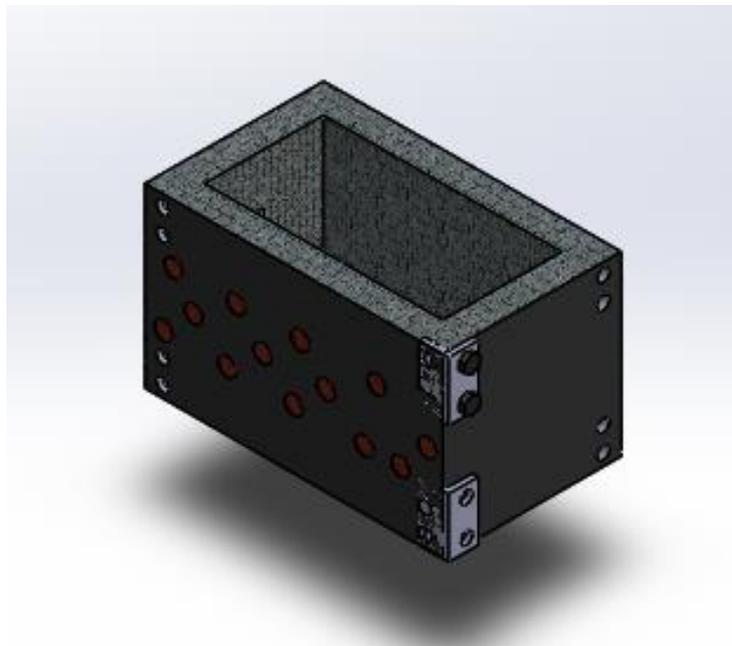


Figura 2.2 Diseño a base concreto (hormigón)

Fuente: Elaboración propia

Como mayor inconveniente se presenta la imposibilidad para su traslado, por peso y fragilidad.

2.3.3. Diseño 3

Se basa en un volumen limitado por paredes compuestas, de adentro hacia afuera de acero-fibra cerámica-acero, unidos por juntas empernadas. A priori se puede observar una disminución de material a utilizar, reducción de peso, facilidad de construcción y mantenimiento. Finalmente, para evitar un cortocircuito de la

resistencia calefactora con las paredes metálicas estas se empotrarán a una única pared de material refractario. (Figura 2.3)

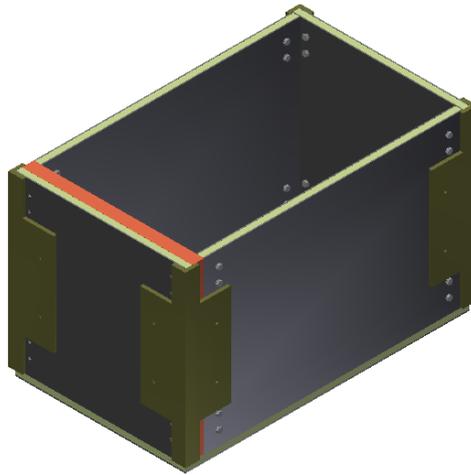


Figura 2.3 Diseño de placas compuestas emperradas

Fuente: Elaboración propia

2.4. Preselección de materiales

En la actualidad existe gran cantidad y variedad de materiales que cumplen con los requisitos para la construcción del banco de pruebas, con el fin de reducir la vasta lista de opciones se han pre-seleccionado algunos que cumplen con los requisitos de diseño. Este proceso de preselección resulta de mucha ayuda para realizar el diseño, debido a que reduce el número de cálculos de prueba. En la Tabla 2.1 se muestran los materiales pre seleccionados y su función, y de la Tabla 2.2 a la Tabla 2.5 sus características más relevantes para el diseño.

Tabla 2.1 Materiales preseleccionados y función

MATERIAL ESTRUCTURAL	MATERIAL REFRACTARIO	MATERIAL AISLANTE	RESISTENCIA ELECTRICA
Aluminio	Ladrillo refractario	Fibra de vidrio	Nicromel
Acero A36	Ladrillo rojo	Fibra cerámica	Niquelina
Acero inox. AISI 304	Concreto (hormigón)	Poliuretano	Cobre

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2 Características de los materiales estructurales preseleccionados

Material	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Punto de fusión (°C)	Densidad (Kg/m ³)	USD por Kg
Aluminio	<160	660	2700	1,73
Acero A36	250	1538	7850	0,63
Acero inox. AISI 304	310	1454	7800	5.50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3 Característica de los materiales refractarios preseleccionados

Material	Temperatura máxima de empleo (°C)	Densidad (Kg/m ³)	USD por Kg
Ladrillo refractario	>1650	2320	5,47
Ladrillo rojo	700	1600-1900	0,04
Concreto (hormigón)		220-2400	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.4 Características de los materiales aislantes preseleccionados

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Temperatura de operación
Fibra de vidrio	0,05	Hasta 800 °C
Fibra cerámica	0,0382	Hasta 1260 °C
Poliuretano	0,020	Hasta 90 °C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.5 Características de los materiales preseleccionados para la resistencia calefactora

Material	Resistividad $\frac{mm^2 \cdot ohm}{m}$	Temperatura de fusión (°C)
Nicromel	1,09	1400
Niquelina	0,44	800
Cobre	58	1085

Fuente: Elaboración propia

2.5. Selección del diseño

Se seleccionará la opción más viable en base a características no cuantificables en este nivel como facilidad de construcción, mantenimiento y peso. Los valores otorgados son una representación numérica de varias indagaciones y del criterio ingenieril del diseñador. (Tabla 2.6 y Tabla 2.7)

Los criterios de selección son:

Facilidad de construcción: Esto se refiere a que tan sencillo resulta el acoplamiento de todos los componentes

Mantenimiento: Hace referencia a la facilidad de realizar inspecciones para verificar el estado de los componentes y de realizar posibles cambios en caso de falla.

Peso: Es un indicador de la facilidad de montaje y traslado del banco

Tabla 2.6 Matriz de ponderación para la selección de diseño

	Facilidad de construcción	Mantenimiento	Peso	Total	Ponderación
Facilidad de construcción		4,00	3,00	7,00	69
Mantenimiento	0,25		2,00	2,25	22
Peso	0,33	0,50		0,83	8
TOTALES	0,58	4,50	5,00	10,08	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.7 Selección de diseño

Factores	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Facilidad de construcción	35	30	50
Mantenibilidad	4	2	20
Peso	5	4	8
Total	44	36	78

Fuente: Elaboración propia

2.6. Selección de materiales

Aquí se seleccionarán los materiales más aptos para la construcción del banco, los criterios más utilizados para este caso fueron: costo, durabilidad y facilidad de adquisición en el mercado local. (Tabla 2.8 y Tabla 2.9)

Consideraciones para el material estructural y selección

- **Costo:** Se analiza que tan económico es el material.
- **Corrosión:** El material seleccionado debe ser resistente a la corrosión.
- **Accesibilidad:** El material debe tener baja conductividad térmica.

Tabla 2.8 Matriz de ponderación

	Costo	Corrosión	Conductividad térmica	Total	Ponderación
Costo		4,00	3,00	7,00	69
Corrosión	0,25		2,00	2,25	22
Accesibilidad	0,33	0,50		0,83	8
TOTALES	0,58	4,50	5,00	10,08	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.9 Selección de material estructural

	Aluminio	Acero al carbono	Acero inoxidable
Costo	50	69	40
Corrosión	20	18	22
Accesibilidad	8	8	7
TOTAL	78	95	69

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones para el material refractario

- **Costo:** que tan económico es el material.
- **Resistencia al calor:** El material seleccionado debe ser resistente alto punto de fusión para evitar su falla al contacto con el combustible en ignición.
- **Accesibilidad:** (facilidad) lugar donde se pueda conseguir el material.

Los resultados de selección se muestran en las Tablas 2.10 y 2.11

Tabla 2.10 Matriz de ponderación para material refractario

	Costo	Resistencia al calor	Accesibilidad	Total	Ponderación
Costo		4,00	0,20	4,20	30
Resistencia al calor	0,25		4,00	4,25	31
Accesibilidad	5,00	0,20		5,20	39
TOTAL	5,25	4,20	4,25	13,6	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.11 Selección de refractario

	Ladrillo rojo	Ladrillo refractario	Concreto
Costo	30	25	20
Resistencia al calor	20	31	15
Accesibilidad	38	36	30
TOTAL	88	92	65

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones para el material resistivo calefactor

- **Costo:** que tan económico es el material.
- **Durabilidad:** que tan propenso es el material a presentar falla.
- **Eficiencia:** Capacidad de la resistencia para convertir la energía eléctrica en calor.
- **Accesibilidad:** (facilidad) lugar donde se pueda conseguir el material.

Los resultados de selección se muestran en las Tablas 2.12 y 2.13

Tabla 2.12 Matriz de ponderación para material resistivo calefactor

Ponderación de los criterios	Costo	Durabilidad	Eficiencia	Accesibilidad	Total	Ponderación
Costo		3,00	0,20	0,25	3,45	14
Durabilidad	0,33		0,25	0,25	0,83	3
Eficiencia	5,00	4,00		4	13,00	51
Accesibilidad	4,00	4,00	0,25		8,25	32
TOTALES	9,33	11,00	0,70	4,50	25,53	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.13 Selección de material resistivo calefactor

	Nicromel	Niquelina	Cobre
Costo	10	13	14
Durabilidad	2	2	3
Eficiencia	48	51	20
Accesibilidad	10	32	32
TOTAL	70	98	69

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones para el material aislante

- **Costo:** que tan económico es el material.
- **Resistencia al calor:** El material seleccionado debe soportar altas temperaturas de trabajo.
- **Accesibilidad:** (facilidad) lugar donde se pueda conseguir el material.

Los resultados de selección se muestran en las Tablas 2.14 y 2.15

Tabla 2.14 Matriz de ponderación para material aislante

Ponderación de los criterios	Costo	Resistencia al calor	Accesibilidad	Total	Ponderación
Costo		4.00	0.20	7.20	30
Resistencia al calor	0.25		0.25	0.83	4
Accesibilidad	5.00	4.00		12.00	51
TOTAL	5.58	11.00	0.78	23.70	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.15 Selección de material aislante

	Poliuretano	Fibra de Vidrio	Fibra Cerámica
Costo	15	30	20
Resistencia al calor	2	4	5
Accesibilidad	40	51	35
TOTAL	57	85	60

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones para las termopilas

Para la selección de termopilas se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Rango de temperaturas:** Temperatura máxima y mínima de trabajo.
- **Resistencia a la oxidación:** Tiempo de vida de la termopila.
- **Costo:** Que tan costoso es el material.

Los resultados de selección se muestran en las Tablas 2.16 y 2.17

Tabla 2.16 Matriz de ponderación para la selección de termopilas

Ponderación de los criterios	Temperatura máxima de operación	Resistencia a la oxidación	Costo	Total	Ponderación
Temperatura de máxima operación		5.00	4.00	12	51
Resistencia a la oxidación	4.00		0.20	7.20	30
Costo	0.25	0.25		0.83	4
TOTAL	5.58	11.00	0.78	23.70	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.17 Selección de termopila

Tipo de material	Termopila tipo J	Termopila tipo K	Termopila tipo E
Temperatura de máxima operación	30	49	37
Resistencia a la oxidación	17	23	12
Costo	3	4	3
Total	50	76	52

Fuente: Elaboración propia

2.7. Cálculos de diseño

A continuación, se presenta un diseño de forma más detallado de la opción seleccionada, con el fin de identificar los componentes del banco de pruebas. (Figura 2.4)

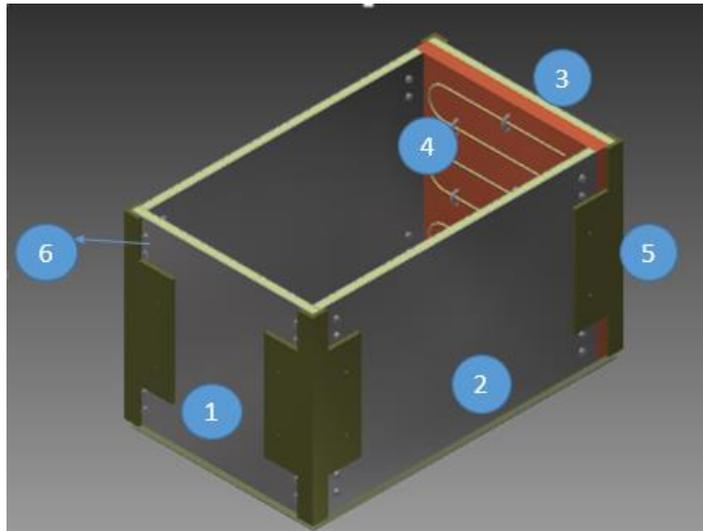


Figura 2.4 Partes del banco de pruebas.

Fuente: Elaboración propia

Parte 1.- Pared compuesta acero-fibra-acero de 300mmx300mm

Parte 2.- Pared compuesta acero-fibra-acero de 300mmx500mm

Parte 3.- Pared compuesta de acero-fibra-refractario de 300mmx300mm

Parte 4.- Resistencia calefactora (Alambre de níquelina)

Parte 5.- Ángulos de conectores

Parte 6.- Pernos

2.7.1. Diseño de las paredes compuestas

Para el cálculo de espesores resulta factible modelar la pared compuesta por el método de resistencias térmicas en serie como se muestra a continuación en la Figura 2.5

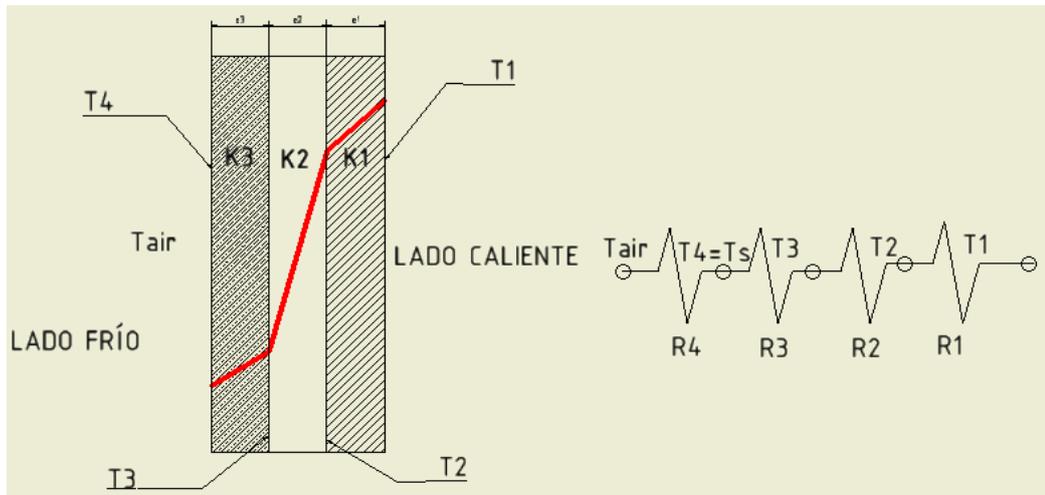


Figura 2.5 Modelo de resistencias en serie para la pared compuesta acero-fibra-acero

Fuente: Elaboración propia

$$R_n = \frac{e_n}{K_n A} \quad (1)$$

Donde

$n = 1, 2$ y 3 De acuerdo al material

R : Resistencia de conducción

e : Espesor

K : Conductividad

A : Área

De la figura 2.5 se obtiene que

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_4}{R_{tot}} \quad (2)$$

Remplazando la ecuación (2) en la ecuación (1) se obtiene

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{A} \left(\frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{e_1}{K_1} \right)} \quad (3)$$

Depreciando la transferencia de calor por radiación en la superficie del banco de pruebas y realizando un balance de energía se obtiene.

$$Q_{conv} = Q_{cond} \quad (4)$$

También

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_{air}) \quad (5)$$

Donde

\bar{h} : Coeficiente de convección promedio

A : Área de la superficie

ΔT : Diferencia de temperaturas $T_{superficie} - T_{\infty}$

Coeficiente de convección y flujo de calor

Como se puede determinar con las ecuaciones dadas, para calcular los espesores de cada capa, es necesario determinar el coeficiente de convección y el flujo de calor a través de cada pared compuesta (ver Figura 2.6).

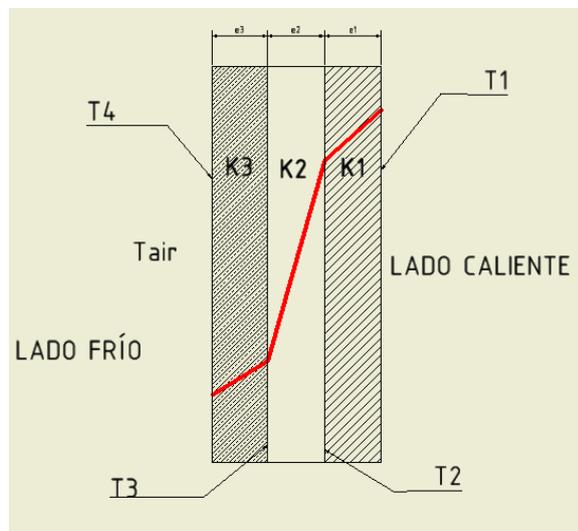


Figura 2.6 Esquematización de la caída de temperatura a través de la pared compuesta.

Fuente: Elaboración propia

Entonces se establecen las condiciones de frontera.

$$T_s = T_4 = 40^{\circ}C$$

$$T_1 = 500^{\circ}C$$

$$T_{air} = T_{\infty} = 27^{\circ}C$$

Basta evaluar estos valores con detenimiento para afirmar que todas las paredes tendrán las mismas condiciones de frontera.

El coeficiente de convección se puede despejar de la ecuación 6.

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{K_{air}} \quad (6)$$

Donde

\overline{Nu}_L : Número Nusselt

\bar{h} : Coeficiente de convección promedio

L : Longitud característica (altura del banco de pruebas)

K_{air} : Conductividad de la película de aire en contacto con la placa

También

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \overline{Ra}_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (7)$$

valida para todo intervalo de Ra_L

Donde

\overline{Ra} : Número Rayleigh

Pr : Número Prandlt

Utilizando la correlación empírica para \overline{Ra}_L en una placa vertical

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\gamma\alpha} \quad (8)$$

Donde

g : Gravedad

β : Coeficiente de expansión volumétrica

T_s : Temperatura superficial

T_∞ : Temperatura ambiente

γ : Viscosidad cinemática

α : Difusividad térmica

L : Longitud característica

Las propiedades del aire circundante a las paredes del banco se asumen constantes y con una temperatura de film T_f .

$$T_f = (T_\infty + T_s) \frac{1}{2} \quad (9)$$

Reemplazando los valores de temperatura se obtiene:

$$T_f = \frac{27^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C}}{2} = 33,5^\circ\text{C} = 300\text{K}$$

Propiedades del aire a $T_f = 300\text{K}$

$$\gamma = 15,89 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr = 0,707$$

$$\rho = 1,1614 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$C_p = 1,007 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * \text{K}}$$

$$\mu = 184,6 \times 10^{-7} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$K_{air} = 26,3 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$$

$$\alpha = 22,5 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Reemplazando los valores en la correlación de Ra

$$Ra_L = \frac{(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) (\frac{1}{300\text{K}}) (40^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}) (0,4\text{m})^3}{(15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) (22,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})}$$

$$Ra_L = 7,57 \times 10^7 < 10^9 \text{ flujo laminar}$$

De igual manera reemplazando los valores en la ecuación (7)

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(7,57 \times 10^7)^{1/6}}{\left[1 + (0,492/0,707)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$\overline{Nu}_L = 56,18$$

Despejando \bar{h} de la ecuación (6) y reemplazando se obtiene

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L K_{air}}{L} \quad (10)$$

$$\bar{h} = \frac{56,18 * 26,3 \times 10^{-3} \frac{W}{mK}}{0,3m}$$

$$\bar{h} = 5,37 W/m^2K$$

Para la pared compuesta de 0,3mm x 0,5mm

$$Q_{conv} = 5,37 \frac{W}{m^2K} (0,3 \times 0,5)m^2 (40^\circ C - 27^\circ C)$$

$$Q_{conv} = 252,89 W$$

Espesores para la pared compuesta acero-fibra cerámica-acero de 0,5 m x 0,3m.

Despejando y reemplazando el valor de Q_{conv} en Q_{cond} en la ecuación de espesores

$$\frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{e_1}{K_1} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{Q_{cond}}{A}} = \frac{500^\circ C - 40^\circ C}{\frac{252,89W}{(0,5 * 0,3)m^2}} = 0,273 \frac{m^2K}{W}$$

Debido que las placas internas y externas son del mismo material (acero A36) y su función es netamente estructural asumo el mismo espesor, entonces: $\frac{e_1}{K_1} = \frac{e_3}{K_3}$

Finalmente se obtiene

$$2 \frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} = 0,273 \frac{m^2K}{W} \quad (11)$$

Donde:

K_3 : Conductividad térmica del acero (52,5 w/mK)

K_2 : Conductividad térmica de la fibra cerámica (0,0382 w/mK)

Despejando e_2 y reemplazando K_2 y K_2 se obtiene:

$$e_2 = 0,038 \frac{W}{mK} * \left(0,273 \frac{m^2K}{W} - 2e_3 \frac{m^2K}{W} \right)$$

Se muestran los valores de e_2 para varios espesores de planchas de acero e_1 disponibles en el mercado local (ver Tabla 2.18).

Tabla 2.18 Espesores de la pared compuesta

e_1 (m)	e_2 (m)
0,001	0,010
0,002	0,010
0,003	0,010
0,004	0,010
0,005	0,010

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar el espesor de fibra e_2 no presenta variación aparente al variar el espesor de la capa de acero e_1 , motivo por el cual se selecciona la segunda opción.

Espesores para la pared compuesta acero-fibra cerámica-acero de dimensiones 0,3 m x 0,3 m

Siguiendo el mismo procedimiento que la pared anterior se obtiene:

$$Q_{conv} = 5,37 \frac{W}{m^2K} (0,3 \times 0,3) m^2 (40^\circ C - 27^\circ C) = 151,73 W$$

$$\frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{e_1}{K_1} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{Q_{cond}}{A}} = \frac{500^\circ C - 40^\circ C}{\frac{151,73 W}{(0,3 * 0,3) m^2}} = 0,273 \frac{m^2 K}{W}$$

$$e_2 = 0,038 \frac{W}{mK} * \left(0,273 \frac{m^2 K}{W} - 2e_3 \frac{m^2 K}{W} \right)$$

La última ecuación resulta la misma que la ecuación 9, por lo que se concluye que la relación de espesores es la misma que la de la pared de 0,3mx03m.

Espesores para la pared compuesta acero-fibra-ladrillo de dimensiones 0,3 m x 0,5m

El procedimiento de diseño es muy similar al mostrado anteriormente

$$Q_{conv} = 5,37 \frac{W}{m^2K} (0,3 \times 0,3)m^2 (40^\circ C - 27^\circ C) = 151,73 W$$

$$\frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{e_1}{K_1} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{Q_{cond}}{A}} = \frac{500^\circ C - 40^\circ C}{\frac{151,73W}{(0,3 * 0,3)m^2}} = 0,273 \frac{m^2K}{W}$$

$$e_2 = K_2 \left(0,273 \frac{m^2K}{W} - \frac{e_1}{K_1} - \frac{e_3}{K_3} \right)$$

Donde

K_1 : Conductividad térmica del ladrillo refractario (0,72 W/mK)

K_2 : Conductividad térmica de la fibra cerámica

K_3 : Conductividad térmica del acero

El valor de e_1 es igual a 2,1cm, debido a que este es el espesor de los ladrillos refractarios encontrados en el mercado local y $e_3=2$ mm (espesor de la placa de acero)

Reemplazando los valores de K_1 , K_2 , K_3 , e_2 , y e_1 se obtiene

$$e_2 = 0,0093m \cong 10mm$$

2.7.2. Unión de los materiales

Debido a que no existe un adhesivo especial para unir la fibra cerámica y acero se ha optado por uniones empernadas para mantener juntas las capas de material.

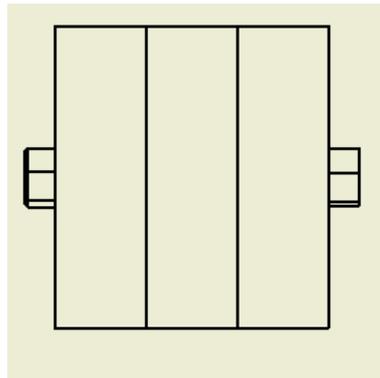


Figura 2.7 Unión de material externo, interno y aislante

Fuente: Elaboración propia

Diseño de junta empernada

Se pre-selecciona un perno M5 clase 4,6 cuyas características se muestran en la tabla 2.19.

Tabla 2.19 Característica del perno pre-seleccionado

Resistencia mínima de prueba (S_p)	225 (MPa)
Resistencia a la fluencia mínima	240 (MPa)
Resistencia a la tensión mínima	400 (MPa)
Material	Acero bajo-medio carbono
Área de trabajo (A_t)	14,18 mm ²
Paso	0,8

Fuente: Elaboración propia

Esfuerzo en el perno (σ)

$$\sigma = \frac{F_{total}}{A_t} \quad (12)$$

Donde

F_{total} : Fuerza total que resiste el perno

A_t : Área de trabajo del perno

Si asumimos que el perno no se dilata la fuerza total que resiste el perno, está dada por la fuerza de la precarga y la fuerza de tensión originada por la dilatación de los espesores de las placas y que provoca un estiramiento en el perno.

$$F_{total} = F_i + F_H \quad (13)$$

F_{total} : Fuerza neta sobre el perno

F_i : Fuerza de precarga

F_H : Fuerza por estiramiento del perno

Calculo de fuerza de pre-carga

$$F_i = 0,75F_p \quad (14)$$

Donde

$$F_p = S_p A_t \quad (15)$$

Y

S_p : Resistencia mínima de prueba

A_t : Área de trabajo

Tomando los datos de la tabla 2.19 y remplazando estos en la ecuación (14).

$$F_i = 0,75(225MPa)(14,18mm^2) = 2394,88 N$$

Calculo de fuerza originada por el estiramiento

Por ley de Hooke

$$F_H = K\Delta x \quad (16)$$

Donde

$$\Delta x = \Delta L_{perno} \text{ y } K = \frac{A_t E}{L_o} \quad (17)$$

Reemplazando Δx y la ecuación (17) en la ecuación (16) se obtiene:

$$F_H = \frac{A_t E}{L_o} \Delta L_{perno} \quad (18)$$

E: es el módulo de Young del material del perno ($20 \times 10^{10} \text{ N/mm}^2$)

Para hallar las deformación longitudinal o dilatación del espesor las placas de acero

$$\Delta L_n = L_{on} \alpha_n \Delta T_n = e_n \alpha_n \Delta T_n \quad (19)$$

Donde $n=1, 2 \text{ y } 3$

$L=e$: Longitud inicial o espesor inicial

α : Coeficiente de dilatación lineal $\alpha_1 = \alpha_3 = 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $\alpha_2 \approx 0$

$$\Delta T_1 = T_1 - T_o$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_o$$

$$\Delta T_3 = T_3 - T_o$$

Donde

ΔT : Diferencia de temperatura $T_{final} - T_{inicial}$

$T_o = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$: Temperatura ambiente estándar

$T_1 = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$: Temperatura de la placa de acero interna

$T_2 = \frac{500 \text{ } ^\circ\text{C} - 40 \text{ } ^\circ\text{C}}{2} = 203 \text{ } ^\circ\text{C}$: Temperatura promedio de la capa de fibra cerámica

$T_3 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$: Temperatura de la placa de acero externa

Reemplazando los valores de temperatura se obtiene:

$$\Delta T_1 = 500 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 473 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 203 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 176 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = 40 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta L_1 = 2 \text{ mm}(11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(473 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,010406 \text{ mm}$$

$$\Delta L_2 = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta L_3 = 2 \text{ mm}(11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(13 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,000286 \text{ mm}$$

$$\Delta L_{perno} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3$$

$$\Delta L_{perno} = 0,013266 \text{ mm}$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (18) se obtiene:

$$F_H = \frac{\left(14,18\text{mm}^2 * \frac{1\text{m}^2}{1000000\text{mm}^2}\right) \left(20 * \frac{10^{10}\text{N}}{\text{m}^2}\right) (0,0133 * 10^{-3}\text{m})}{74 * 10^{-3}\text{m}}$$

$$F_H = 508,41 \text{ N}$$

y

$$F_{total} = 2394,88\text{N} + 508,41\text{N}$$

$$F_{total} = 2901,29\text{N}$$

De la ecuación (12) se obtiene:

$$\sigma = \frac{2901,29\text{N}}{14,18\text{mm}^2 * \frac{1\text{m}}{1000000\text{mm}^2}}$$

$$\sigma = 204,60 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad del perno

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \tag{20}$$

Donde

S_y : Límite de fluencia

σ : Esfuerzo en el perno

$$\eta = \frac{240 \text{ MPa}}{204,60 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 1,2$$

2.7.3. Diseño de ángulos conectores

Para unir las paredes a manera de caja, es necesario el uso de ángulos metálicos que permitan el acople. La figura 2.8 muestra las dos paredes adyacentes y el ángulo trabajando en conjunto, como se puede observar este último se deformará por la diferencia de dilatación de las placas.

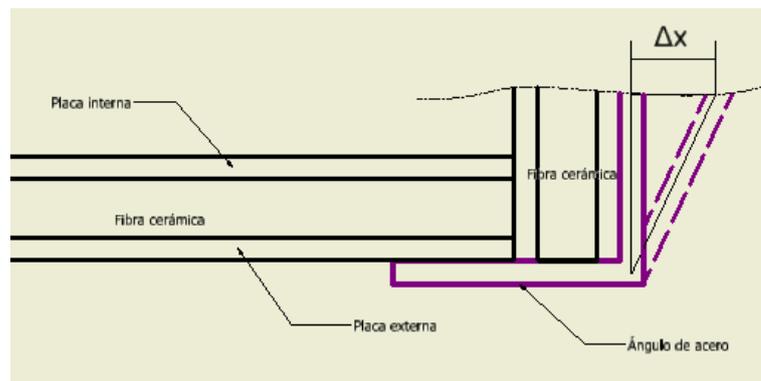


Figura 2.8 Deformación del ángulo conector debido a la diferencia de dilatación de las placas de acero

Fuente: Elaboración propia

La placa interna se dilatará mucho más que la placa externa, generando una deformación angular en el conector, por lo que resulta imperativo calcular un espesor adecuado para que este no falle.

Se asume el ángulo como viga de extremos empotrado y en voladizo

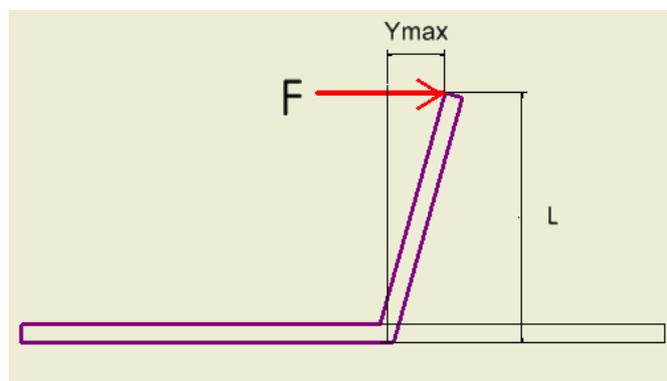


Figura 2.9 Ángulo conector como viga en voladizo

Fuente: Elaboración propia

$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad (21)$$

Donde:

σ : Esfuerzo de fluencia máximo en la viga

M : Momento flector máximo

C : Distancia del eje neutro a los extremos

I : Momento de inercia del área trasversal

Y

$$M = FL \quad (22)$$

F : Fuerza aplicada

L : Distancia del empotramiento hasta la aplicación de la fuerza

Se tiene que:

$$Y_{max} = \frac{L^3}{3EI} F \quad (23)$$

Donde:

Y_{max} : Deformación máxima = Δx

E : Módulo de Young

Despejando F de la ecuación (23)

$$F = 3 \frac{Y_{max}EI}{L^3} \quad (24)$$

Reemplazando la ecuación (23) en la ecuación (22) se obtiene:

$$M = 3 \frac{Y_{max}EI}{L^2} \quad (25)$$

Reemplazando la ecuación (25) en la ecuación (21) y despejando C se obtiene

$$C = \frac{1}{3} \frac{\sigma L^2}{Y_{max} E} \quad (26)$$

Para calcular la deformación angular o Y_{max} , se utiliza:

$$\Delta x = (\Delta L_{int} - \Delta L_{ext})/2 \quad (27)$$

$$\Delta L_{int} = L_{int} \alpha_{acero} \Delta T_1$$

$$\Delta L_{ext} = L_{ext} \alpha_{acero} \Delta T_3$$

$$\Delta L_{int} = (0,5m)(11 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(473^\circ\text{C}) = 0,002602m$$

$$\Delta L_{ext} = (0,5m)(11 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(13^\circ\text{C}) = 0,000075m$$

$$\Delta x = \frac{(0,002602 - 0,000075)m}{2} = 0,0013m$$

Para el cálculo del esfuerzo máximo en el ángulo (σ)

$$\sigma = \frac{S_y}{\eta} \quad (28)$$

Donde:

S_y : Esfuerzo de fluencia 240MPa

η : Factor de seguridad 1,5

Reemplazando estos valores en la ecuación (28) se obtiene:

$$\sigma = \frac{240MPa}{1,5} = 160MPa$$

$$C = \frac{1}{3} \frac{(160000000N/m^2)(0,074m)^2}{(0,0013m)(20 * 10^{10}N/m^2)} = 2,8mm$$

Entonces el espesor del ángulo es

$$e = 2C$$

$$e = 5,6 \text{ mm}$$

2.7.4. Cálculos de corriente

A continuación, se procede a realizar los cálculos respectivos para empezar la ignición, los valores de interés son los siguientes:

- Calor necesario para elevar la temperatura del carbón hasta alcanzar la ignición
- Masa y volumen de carbón a ser encendido por contacto con la resistencia
- Potencia eléctrica necesaria para la ignición
- Resistividad y diámetro de la Niquelina

Para realizar los cálculos se utilizarán las propiedades del carbón por ser uno de los combustibles más críticos (requiere mayor temperatura para alcanzar la ignición), así el calor necesario para elevar la temperatura del combustible hasta el punto de ignición es:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (29)$$

Donde:

m : Masa de la primera capa de carbón

C_p : Calor específico del carbón $1,26 \frac{KJ}{KgK}$

ΔT : Variación de temperatura $T_{ignición} - T_{inicial}$

Volumen de carbón a encender

Para iniciar la combustión del material dentro del banco de pruebas, primero deberá de encenderse la primera capa de carbón que está en contacto con la resistencia eléctrica.

Se asume un espesor de capa igual a 3cm, obteniéndose el siguiente volumen

$$V = 0,03m * 0,3m * 0,3m$$

$$V = 0,0027 m^3$$

Masa de la primera capa de carbón

$$m = \rho V \quad (30)$$

Donde:

ρ : Densidad del carbón $418 \frac{Kg}{m^3}$

$$m = 0,0027 m^3 * 418 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m = 1,1286 Kg$$

$$\Delta T = 500^\circ C - 27^\circ C = 473^\circ C$$

Reemplazando estos valores en (29)

$$Q = 1,1286 Kg * 1,26 \frac{KJ}{KgK} * 473^\circ C$$

$$Q = 672,62 KJ$$

Potencia requerida

Si se asume que todo el calor generado por la resistencia calefactora es absorbido por el carbón

$$Pot = \frac{Q}{t} \quad (31)$$

Donde

t : Tiempo de encendido

Considerando un tiempo de encendido de la capa de 20 min, entonces se obtiene

$$Pot = \frac{672,62 KJ}{20min * \frac{60seg}{1min}} = 0,56 Kwatts$$

Asimismo, para hallar el valor de longitud de alambre (L) y la resistencia eléctrica (R) se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$R = \frac{V^2}{Pot} \quad (32)$$

Donde:

V: Voltaje

$$L = \frac{\frac{\pi}{4} R \varnothing^2}{\varphi} \quad (33)$$

Donde:

φ : Resistividad del alambre $\frac{0,44mm^2 ohm}{m}$ (niquelina)

\varnothing : Diámetro del alambre 0,5106 mm, esta dimensión está disponible en el mercado

En la Tabla 2.20 se muestra los resultados de resistencia, longitud y corriente para diferentes voltajes.

Tabla 2.20 Límites de longitud y corriente para la ignición

Pot (watts)	Voltaje (voltios)	R (ohm)	longitud (m)	corriente (A)
560	110	21,60	10,06	5,09
560	100	17,85	8,31	5,60
560	90	14,46	6,73	6,22
560	80	11,42	5,32	7,00
560	70	8,75	4,07	8,00
560	60	6,42	2,99	9,33
560	50	4,46	2,08	11,20
560	40	2,85	1,33	14,00
560	30	1,60	0,75	18,66
560	20	0,71	0,33	28,00
560	10	0,17	0,08	56,00

Fuente: Elaboración propia

Para el alambre se selecciona la longitud de 6.73m por ser considerada razonable, además de que genera un valor de corriente relativamente bajo.

2.8. Detalles de las partes

En una de las paredes 30x50mm del banco de pruebas se realizarán perforaciones de 15mm de diámetro que servirán como guía de los ductos que contendrán a las termopilas, como se muestra en la Figura 2.10

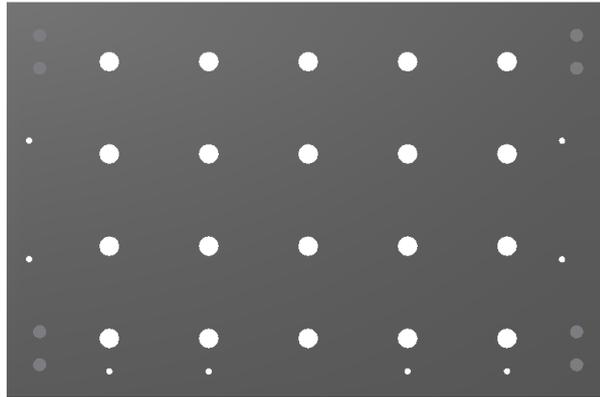


Figura 2.10 Pared compuesta con agujeros para insertar termopilas

Fuente: Elaboración propia

La ubicación de cada agujero tanto para los ductos como para los pernos, se detallan en el plano 1 que se encuentra adjunto en Apéndice A.

Los ductos serán de acero y tendrán un diámetro exterior de 15mm y varias longitudes 5 cm, 10cm, 15 cm, 20cm y 25 cm, con el fin de conseguir tomas de datos en diferentes ubicaciones dentro del banco de pruebas

La pared que servirá de tapa del banco de pruebas tendrá un agujero rectangular que servirá como una entrada para la ventilación en pruebas con flujo de aire forzado.

Todos los detalles de las partes del banco de pruebas se muestran detalladamente en el Apéndice A.

2.9. Diseño del sistema de adquisición de datos

Las temperaturas alcanzadas en el banco de prueba bordearan los 500 °C, por lo que resulta necesario seleccionar un tipo de termopila adecuada. Con la configuración de un sistema adecuado y con un software (Matlab) se podrá hacer la adquisición de datos.

Sistema de adquisición de datos

Debido a que el termopar provee una señal de voltaje en el orden de los milivolts el ADC (convertidor de señal analógica digital) de la tarjeta Arduino no podría realizar una lectura adecuada de los datos. La resolución del ADC Arduino es de 1024 niveles en un rango de voltajes de 0 a 5 Voltios, es decir que:

$$\frac{5V}{1024 \text{ Niveles}} = 0.0048 \frac{V}{\text{nivel}}$$

Es decir que en cada aumento de 0.0048 V el ADC tendrá una lectura de un nivel diferente ya sea que el voltaje aumente o se reduzca. En cuanto a la señal que proporciona el termopar se tiene una variación de 40 µV por cada grado centígrado, es decir 0.000040 V, en este caso el termopar puede tener una variación de temperatura muy importante, pero la variación de temperatura al ser muy pequeña causa que el ADC lea solo unos pocos cambios de niveles. Por lo tanto, la señal del termopar debe amplificarse para que tenga un nivel de voltaje que permita al ADC realizar una lectura correcta.

Al ser una señal de milivoltios que varía en el orden de los µV se requiere una ganancia alta, y al ser usada en un sistema de adquisición de datos, la señal debe ser lo más alejada del ruido. Un amplificador e instrumentación resulta ser idóneo para este caso, debido a sus características, tales como: alta impedancia de entrada y alto rechazo al modo común.

El amplificador disponible en el mercado, económico y encapsulado es el AD620.

El esquema general se muestra a continuación en la figura 2.11.

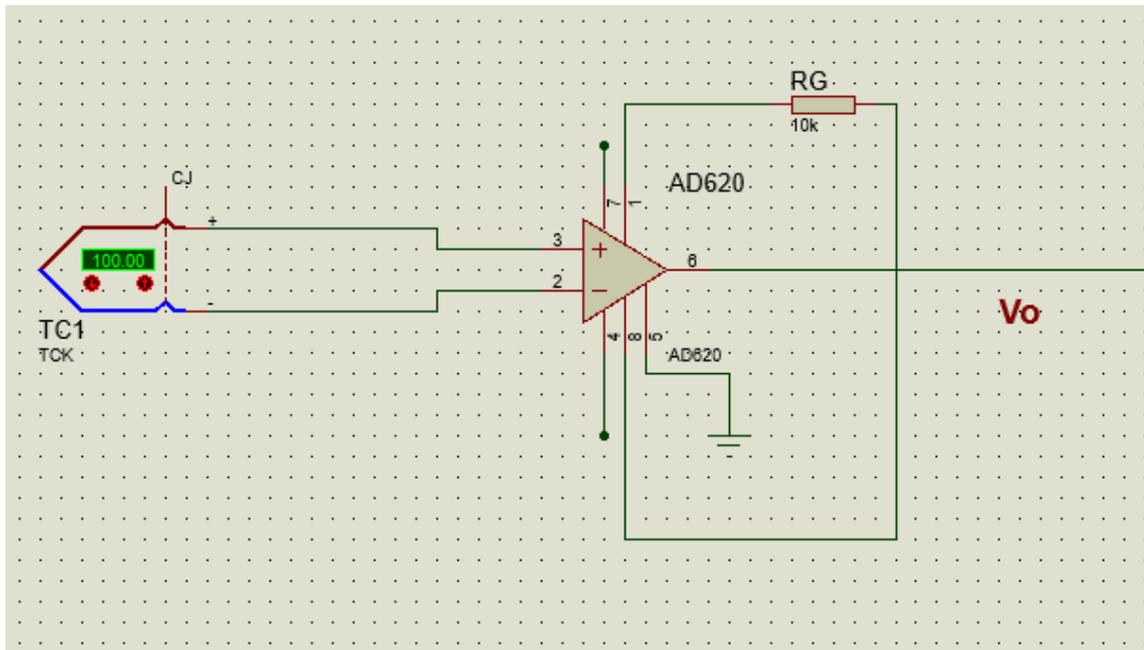


Figura 2.11 Esquema general del amplificador AD620

Fuente: Elaboración propia

La ganancia se configura según la formula dada por la hoja de especificaciones del AD620:

$$G = \frac{49.4 \text{ K}\Omega}{R_g - 1}$$

Donde G es la ganancia y Rg es la resistencia que configura la ganancia del amplificador usado.

La ganancia se calcula tomando un rango de temperaturas a medir:

$$\text{Rango temperatura} = [0 - 600]^\circ\text{C}$$

$$\text{Rango voltaje del termopar} = [0 - 24.902]\text{mV}$$

Así, como la temperatura máxima a medir sería de 600 °C el voltaje correspondiente a esa temperatura debería ser 5 volts máximo, que es el máximo valor que puede leer el ADC.

$$(24.902 \text{ mV})G = 5000 \text{ mV}$$

$$G = 200.78$$

Reemplazando la ganancia en la formula el A620 se determina la resistencia necesaria para obtener tal ganancia.

$$R_g = \frac{49.4 \text{ K}\Omega}{200.78 - 1}$$

$$R_g = 247 \Omega$$

Como en el mercado no se encuentra una resistencia de 247 Ohms exactos, se emplea un potenciómetro, el cual puede manipularse hasta obtener los valores de resistencia deseados.

Para adecuar la señal de salida, obtener un mejor resultado ante el ruido, se ha decidido añadir una etapa de filtrado, usando un filtro pasa bajo, ya que el ruido es una señal de alta frecuencia, así se bloquea el paso de la señal de ruido. El filtro está constituido por un circuito RC en serie como se muestra en la Figura 2.12

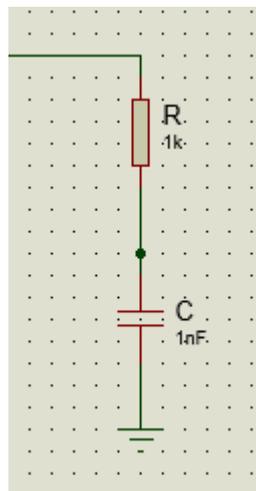


Figura 2.12 Etapa de filtrado

Fuente: Elaboración propia

La frecuencia de corte del filtro está dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Especificando a la señal de ruido en un valor e 1500Hz, se puede establecer los valores de los componentes del filtro, capacitor y resistor. Como el resistor es más fácil encontrar, se emplea un calor de capacitancia conocido y comercial, 0,1 μF para definir el valor de la resistencia.

$$1500 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi R(0,1\mu\text{F})}$$

Resulta:

$$R = 1062 \Omega$$

El valor comercial más próximo es de 1000 Ω

La Figura 2.13 muestra un arreglo de relés que permiten realizar una conmutación entre cuatro termopilas, para de este modo reducir el número de amplificadores usados; un amplificador por cada 4 termopares. Tres señales generadas de manera consecutiva por el Arduino permiten activar los relés de la misma manera y conmutar las señales al amplificador para tener lecturas de varios sensores.

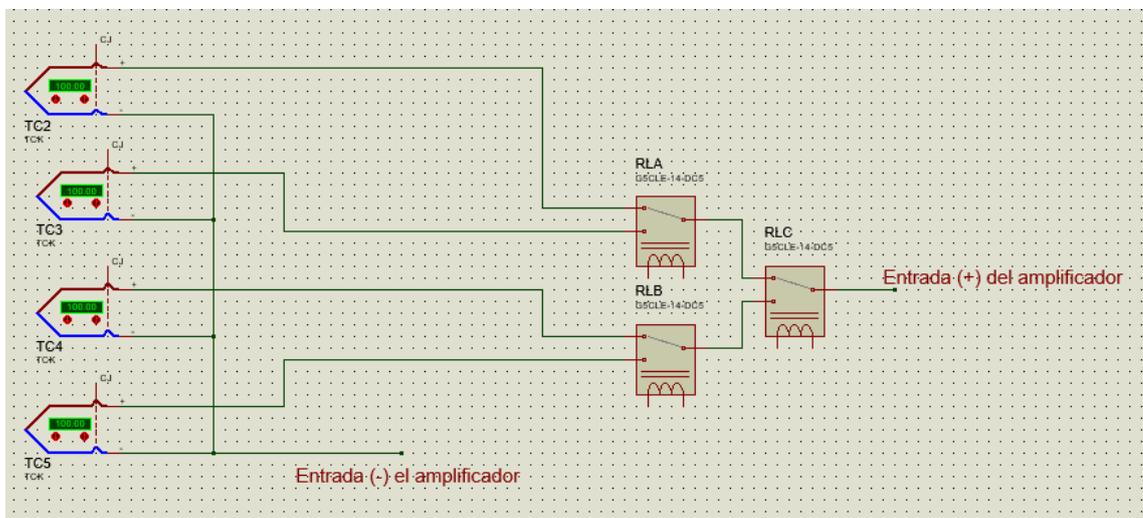


Figura 2.13 Conmutación para 4 termopilas

Fuente: Elaboración propia

El modo de enlace entre el sistema de adquisición de datos y el software, así como su programación se muestran a detalle en el Apéndice B.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1. Análisis térmico

Para calcular las temperaturas entre las placas se tiene que:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{K_1 A_1 (T_1 - T_2)}{e_1} = \frac{K_2 A_2 (T_2 - T_3)}{e_2} = \frac{K_3 A_3 (T_3 - T_4)}{e_3}$$

De aquí se obtiene

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{Q}_{cond} e_1}{K_1 A_1}$$

$$T_3 = T_4 + \frac{\dot{Q}_{cond} e_3}{K_3 A_3}$$

En la Figura 3.1, y 3.2 se muestran las caídas de temperatura a través de las paredes del banco de pruebas.

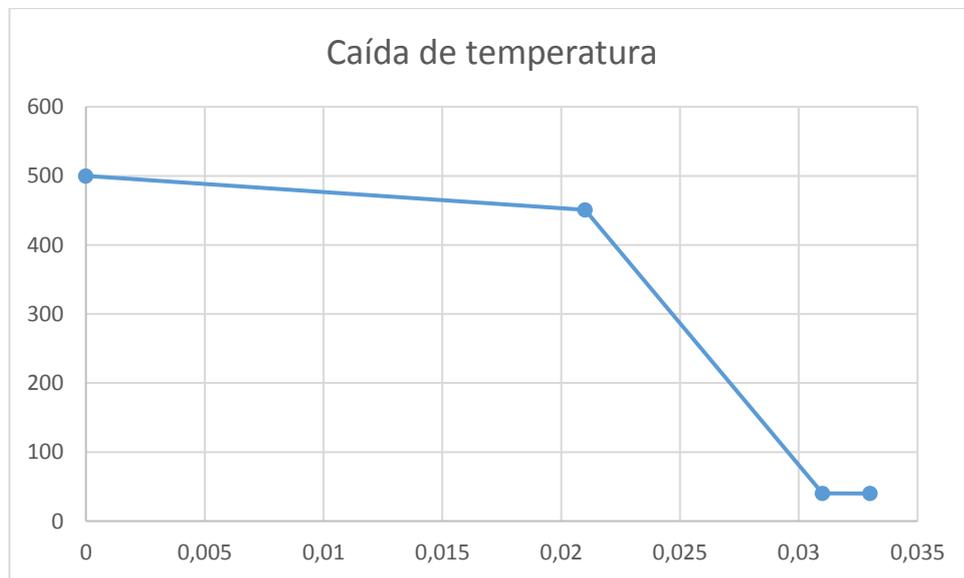


Figura 3.1 Caída de temperatura en pared compuesta (ladrillo-fibra-acero)

Fuente: Elaboración propia

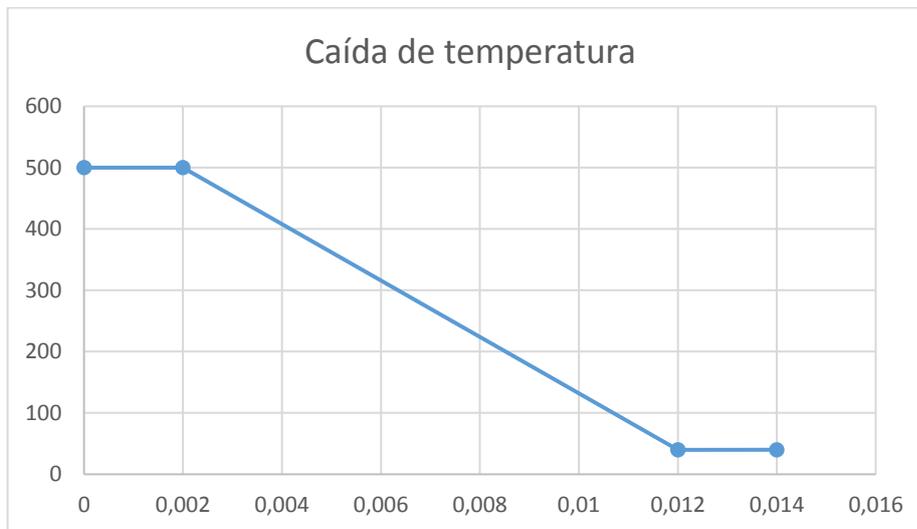


Figura 3.2 Caída de temperatura en pared (acero-fibra-acero)

Fuente: Elaboración propia

3.2. Análisis eléctrico

Con la longitud seleccionada se presenta el rango de corrientes al variar el voltaje, se puede apreciar en la Tabla 3.1, el valor máximo es muy razonable.

Tabla 3.1 Rango de corrientes al variar el voltaje

Potencia (watt)	Voltaje (V)	Resistencia (ohm)	Longitud (m)	Corriente (A)
836.54	110	14.46	6.73	7.60
691.35	100	14.46	6.73	6.91
560.00	90	14.46	6.73	6.22
442.46	80	14.46	6.73	5.53
338.76	70	14.46	6.73	4.83
248.88	60	14.46	6.73	4.14
172.83	50	14.46	6.73	3.45
110.61	40	14.46	6.73	2.76
62.22	30	14.46	6.73	2.07
27.65	20	14.46	6.73	1.38
6.91	10	14.46	6.73	0.69

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra una vista isométrica del banco de pruebas. (Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5).

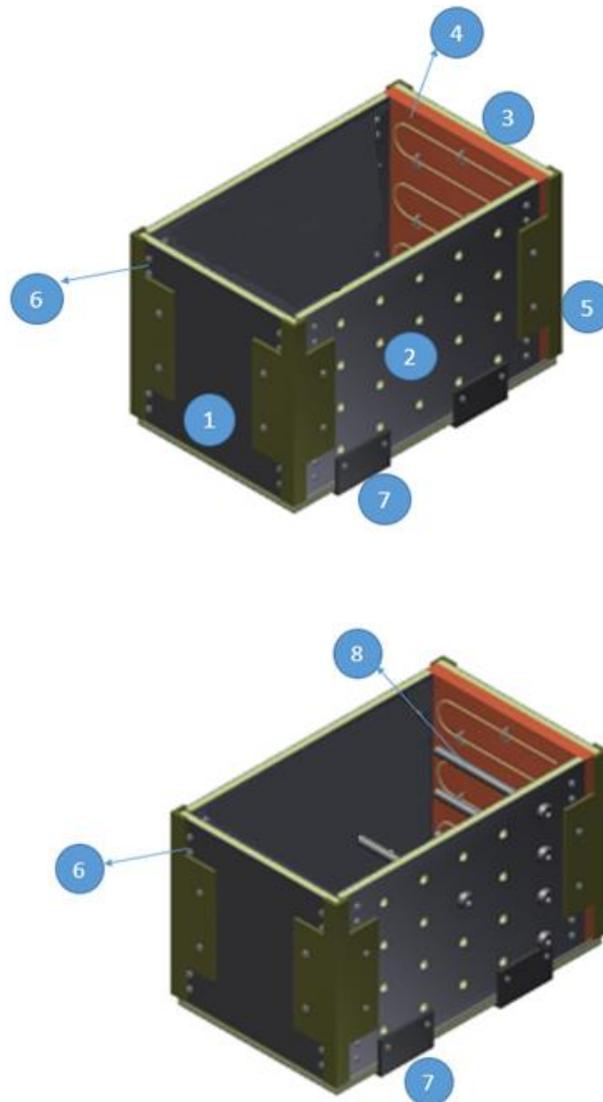


Figura 3.3 Partes del banco de pruebas

Fuente: Elaboración propia

1. Es la pared compuesta de dimensiones 0,3m x 0,3 m,
2. Es la pared compuesta de 0,3 m x 0,5 m, con perforaciones de 15mm para acoplar los tubos guías que contendrán las termopilas.
3. Es la pared de ladrillo refractario sobre la que descansará la resistencia calefactora.
4. Es la resistencia de niquelina, que iniciará la ignición del combustible

5. Ángulos de unión entre paredes compuestas que, por su diseño, deberán ser contruidos.
6. Juntas empernadas para unir las capas de material, se seleccionó este tipo de unión debido a que facilita la construcción, montaje y mantenimiento del banco
7. Ángulos de unión para la base, con más pequeños debido a que no deben obstruir los agujeros guías para los tubos que contendrán las termopilas
8. Termopilas

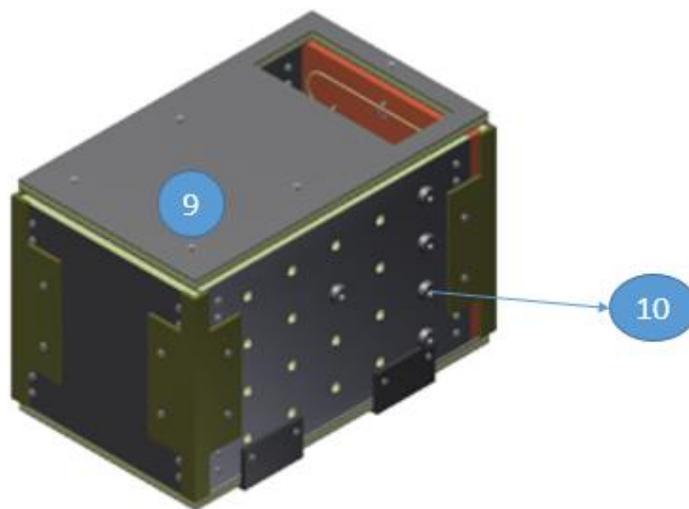


Figura 3.4 Partes del banco de pruebas

Fuente: Elaboración propia

9. Es la tapa del banco de pruebas, con un agujero rectangular cuya función es permitir la entrada de aire para ensayos con flujo forzado de aire.
10. Tuberías de acero para alojar las termopilas, tiene longitudes distintas con el fin de poder tomar datos de diferentes puntos en el interior del banco.
11. Es una pequeña tapa para cuando no se requiera en flujo forzado.

En la Figura 3.5 se muestra el diseño final del banco de pruebas.

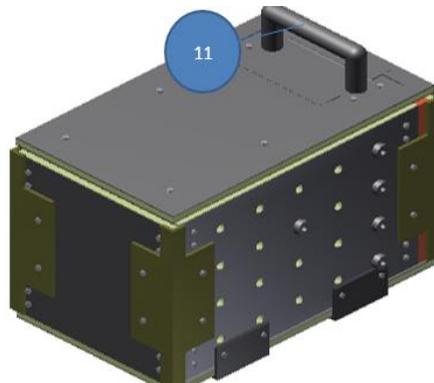


Figura 3.5 Banco de pruebas

Fuente: Elaboración propia

3.3. Análisis del sistema de control

Adquisición de datos

Para la adquisición de datos fueron necesarios los siguientes elementos y componentes detallados a continuación en la Tabla 3.1

Tabla 3.2 Materiales y componentes para el circuito de adquisición de datos

Materiales	Cantidad
Arduino Mega	1
Amplificador AD620	5
Rele	15
Transistores Tip 41	3
Potenciómetros 5k	5
Resistencias 1k	5
Capacitores 0.1µf	5
Diodos rectificadores	3
Borneras	20
Baquelita	1
Termocupla tipo k	20
Cable jumpers	20
Cable USB	1
Fuente	1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.6 Se muestra el circuito amplificado correspondiente, para hacer la conmutación a 4 sensores y usar un amplificador por cada 4 sensores, reduciendo de esta manera la cantidad de uso de amplificadores.

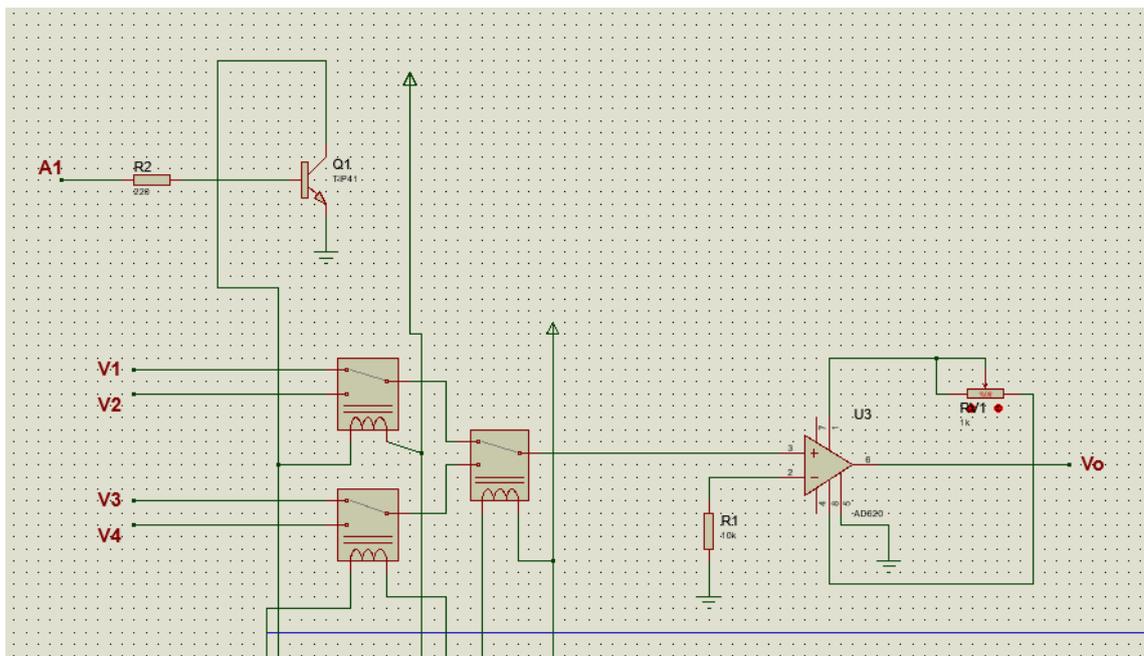


Figura 3.6 Circuito amplificado

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.7 se muestra la configuración total para la toma de datos de temperatura, para 20 termopilas usando 20 sensores y haciendo uso de 5 amplificadores de instrumentación.

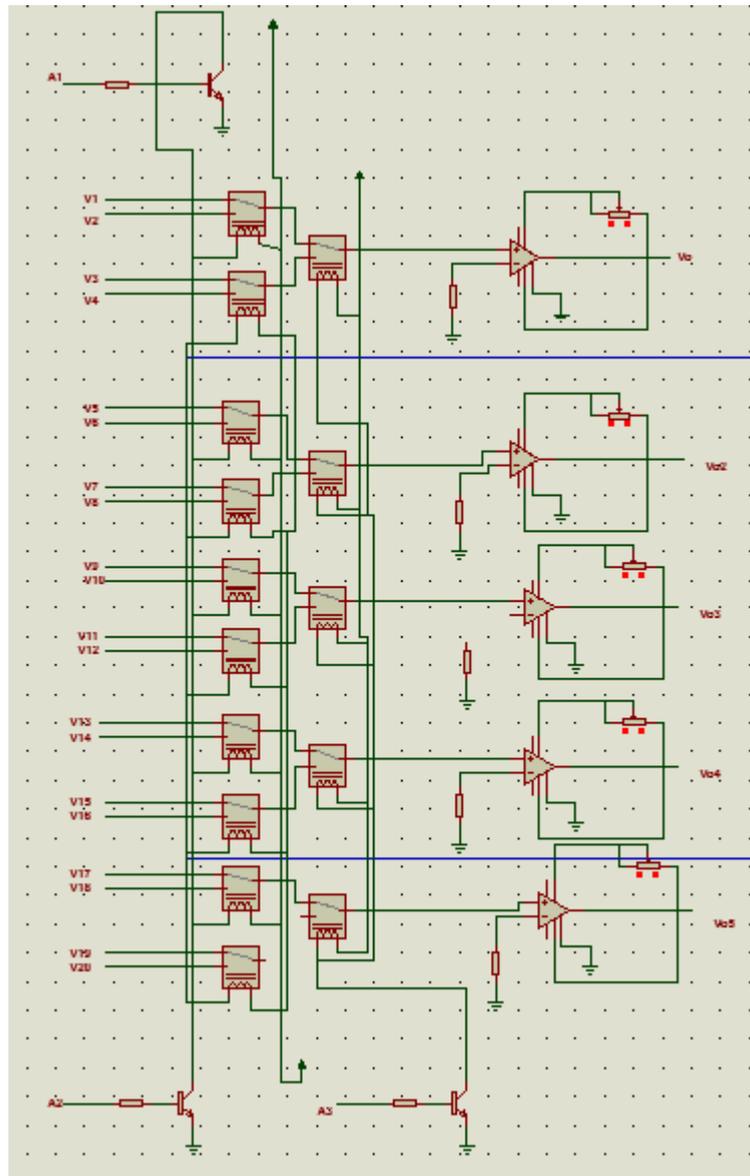


Figura 3.7 Configuración para 20 sensores de temperatura

Fuente: Elaboración propia

3.4. Información extraíble del banco de pruebas

Se ha simulado el proceso de smouldering con el fin de tener una idea del tipo de información que el banco de pruebas debe proporcionar.

Para el modelo se han hechos varias simplificaciones.

- Se ha considerado una barra continua de carbón de longitud 455 mm
- La barra se encuentra inmersa en aire en reposo a temperatura ambiente
- Se ha despreciado el efecto de re ignición del combustible.

- La velocidad de propagación tiene un valor de 25mm/h o 0,416mm/min

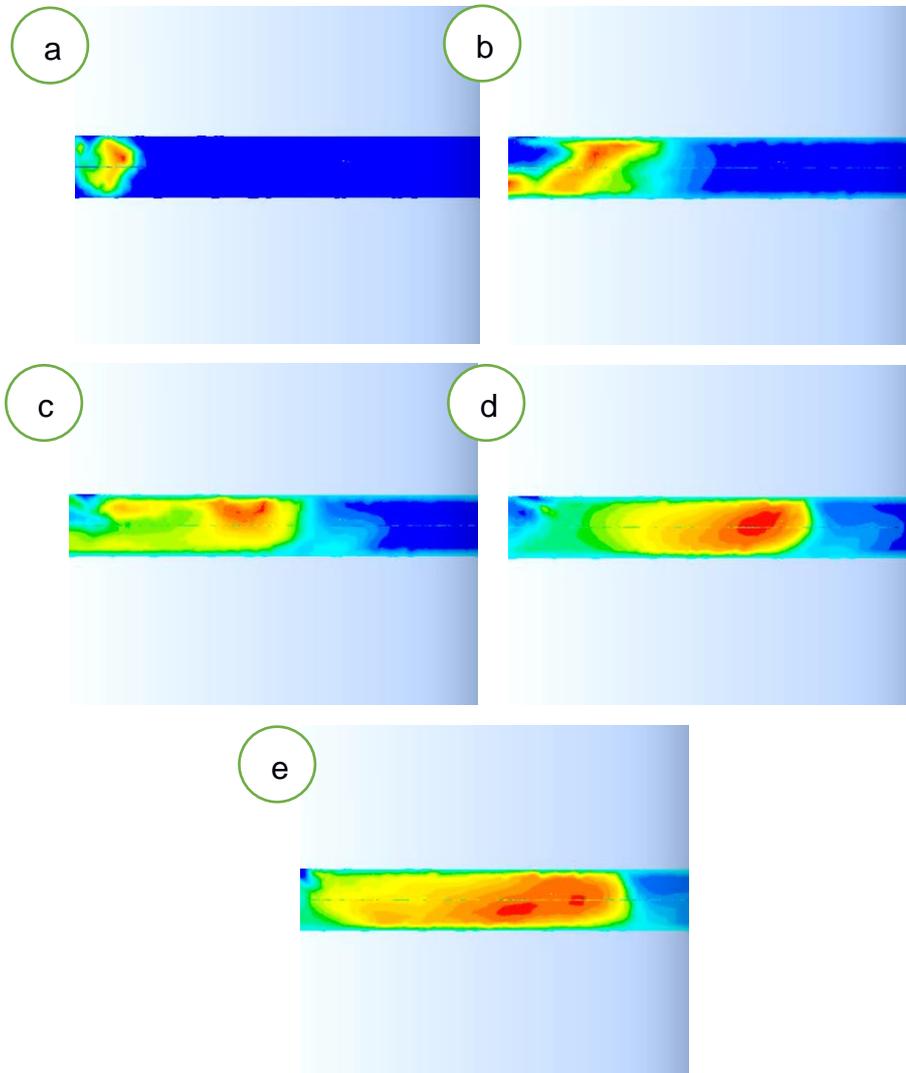


Figura 3.8 Simulación del proceso de smoldering para el carbón

Fuente: Elaboración propia

- a) proceso a $t=0$, b) proceso a $t=18$, c) proceso a $t=36$, d) proceso a $t=54$ y d) proceso a $t=72$ min

Basado en los datos de velocidad de propagación y distanciamiento de las termopilas se obtuvo que los tiempos críticos para la adquisición de datos son los siguientes: 18 min, 36 min, 54 min y 72 min

Debido a que para una misma ubicación y tiempo existen varias temperaturas distribuidas a lo largo del eje y, estas se han promediado y se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Datos de temperatura en diferentes tiempos

TEMPERATURAS (K)					
	x=0cm	x=7,5cm	x=15cm	x=22,5cm	x=30cm
t=0min	773	300	300	300	300
t=18min	635	773	400	300	300
t=36min	510	604	773	409	310
t=54min	438	500	555	773	303
t=72min	400	377	445	550	773

Fuente: Elaboración propia

La figura muestra la evolución del proceso de smoldering en los tiempos críticos, cabe recalcar que esta gráfica es válida solo para modelar una fila de termopilas.

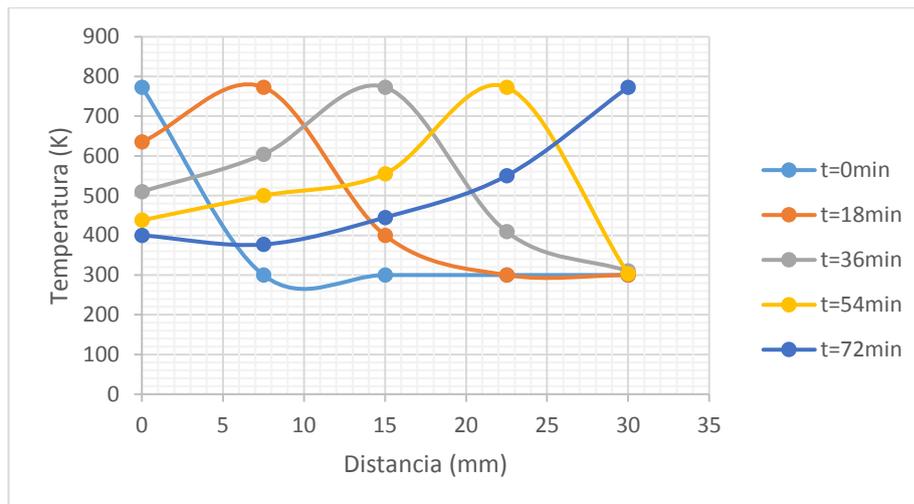


Figura 3.9 Evolución del proceso de smoldering

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar la evolución y propagación del frente de combustión a través del tiempo y las temperaturas de cada sección del banco en cada tiempo de interés. Se pueden identificar las zonas de pirolisis que son las de mayor temperatura y asimismo son identificables las zonas de carbonización.

Para un análisis más apropiado se recomienda tomar como referencia un punto cualquiera y centrar allí la atención, considerando un intervalo de tiempo de 2 horas.

Al finalizar se obtendrá entonces la evolución del punto en cada instante

Los datos obtenidos del banco de pruebas deberían tener una forma muy similar a la que se ha mostrado.

3.5. Análisis económico

Se realiza un análisis respectivo de costos, respecto a construcción del banco de pruebas, en base a los materiales y accesorios seleccionados, analizaremos también el costo de la mano de obra.

Cabe mencionar que los precios no son fijos, sino más bien referenciales debido a que pueden variar por disponibilidad y tipo de proveedor en el mercado.

3.5.1. Costos de materiales

En la siguiente tabla se detallan todos los materiales y elementos necesarios para la construcción del banco de pruebas, donde se detalla cantidad y su respectivo precio.

Tabla 3.4 Cantidad y costos de materiales

Materiales	Dimensiones	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Plancha de acero al carbono	1.22x2.44m	2	\$ 32	\$ 32
Manta cerámica	4.65 m ²	1	\$ 79.70	\$ 79.70
Alambre níquelina	7 m	1	\$ 2	\$ 14
Ladrillos refractarios	9cmx4,5cmx2,1cm	22	\$ 5.16	\$ 113.52
Saco de mortero refractario	25Kg	1	\$ 1.08	\$ 1.08
Pernos	M5x20mm	50	\$ 0.30	\$ 1.5
Pernos	M5x30mm	30	\$ 0.35	\$ 1.05
Arduino Mega	-	1	\$ 50	\$ 50
Amplificador AD620	-	5	\$ 6	\$ 30
Relé	-	15	\$ 1	\$ 15
Termopilas	-	20	\$ 5.5	\$ 110
Transistores Tip 41	-	3	\$ 0.80	\$ 2.4

Potenciómetro 5k	-	5	\$ 0.25	\$ 1.25
Resistencias 1k	-	5	\$ 0.05	\$ 0.25
Capacitores 0.1µf	-	5	\$ 0.05	\$ 0.25
Diodos rectificadores	-	3	\$ 0.10	\$ 0.30
Borneros	-	20	\$ 0.20	\$ 4.0
Baquelita	-	1	\$ 1.50	\$ 1.50
Cable jumper	-	20	\$ 0.15	\$ 3.0
Cable usb	-	1	\$ 1	\$ 1
Fuente 12V	-	1	\$ 22	\$ 22
Total				\$ 484

Fuente: Elaboración propia

Al precio de materiales se le suma el costo de diseño y mano de obra que se consideró \$ 500.

Precio del banco de pruebas: \$ 484 + \$ 500 = \$ 984

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El banco de pruebas tiene un diseño totalmente portátil, debido a que es fácil de armar y desarmar, además presenta una mayor facilidad de limpieza y mantenimiento. Este diseño nos brinda seguridad respecto a temperatura superficial ya que está completamente aislado, y logra reducir la temperatura interna de 500° a una temperatura superficial de 40°C.

Todas sus paredes son compuestas entre acero al carbono, manta cerámica y acero, a excepción de una, que posee ladrillo refractario en una de sus paredes laterales, donde está ubicado la niquelina para provocar la ignición de los combustibles.

En una de sus paredes existen agujeros, donde se colocarán ductos que contendrán las termopilas, las cuales servirán para tomar datos de temperatura a medida que el calor se propague.

Finalmente, en la parte superior hay una tapa la cual se la puede remover para que exista mayor flujo de oxígeno durante la combustión.

Uno de los inconvenientes del banco de pruebas es que si se desea implementar un sistema de flujo de aire forzado (ventilador) a lo largo de la propagación se deberá modificar una de sus caras laterales, dándole acceso a que evacue los gases producidos por la combustión latente (smoldering).

4.1. Conclusiones

- Se diseñó un banco de pruebas el cual cumple con todos los requerimientos para evaluar el proceso de smoldering,
- El diseño es capaz de otorgar información suficiente para analizar el fenómeno.
- Las paredes del banco de pruebas a construir cumplen con la función de aislar a las placas superficiales del calor generado internamente.
- También se presenta un modelo de datos a obtener mediante una simulación básica y simplificada.
- Finalmente con el análisis de costos respectivo se obtuvo un valor relativamente bajo para la construcción del banco de pruebas.
- El banco de pruebas presenta una gran facilidad para armar, trasladar y realizar mantenimiento.

4.2. Recomendaciones

- Al momento de realizar las pruebas se debe tener en cuenta que tipo de fuente que se va a usar para dar inicio a la ignición, si se usa una de menor voltaje puede tardar demasiado tiempo e incluso no darse el encendido del material.
- Tener mucho cuidado con la manipulación del circuito, mantenerlo en un lugar seguro y sin humedad.
- Se recomienda implementar un sistema de ventilación (flujo de aire forzado) para que la propagación se de en menor tiempo
- Cuando se realicen las pruebas se lo debe hacer en un lugar abierto y ventilado, ya que una vez iniciada la ignición se producirá gran cantidad de gases.
- Después de cada prueba realizar la limpieza y extracción de cenizas residuales, producto de una combustión incompleta

BIBLIOGRAFÍA

1. (Rein, Estudio Numerico de Combustión Latente en Flujo Directo, 2002)
2. (Rein, Smouldering Combustion Phenomena in Sciency and Tecnology , 2009)
3. Penalva Antonio Galán, Porque son peligrosos los incendios debido a Smoldering, 2015. Ciencias-Madrid.
4. F.P Incropera y D.P. Dewitt fundamentals of heat and mass transfer, 4ta edición, Jhon Wiley and songs (1990)
5. G Mulholland y T.J. Ohlemilleg Aerozol caracterizacion of a smoldering source, Aerosol sience and Tecnology. Vol 1 pag 59-71 (1982)
6. J.R. Hall, National Fire Protection Association Journal, Vol. 92, N° 1, pg 56-62, (1998).
7. T.J. Ohlemiller, Modeling of smoldering combustion propagation, Progress in Energy and Combustion Science Vol. 11 Pg 277-310, (1985).
8. J.E.J. Staggs, A theory for quasi-steady single step thermal degradation of polymers, Fire and Materials 22 (1998)
9. S.I.Stoliarov,S.Crowley,R.E.Lyon,G.T.Linteris,Predictionoftheburningrates of non-charringpolymers,CombustionandFlame156(2009)1068–1083.
10. C.Lautenberger,C.Fernandez-Pello,Generalizedpyrolysismodelforcombustible solids,FireSafetyJournal44(2009)819–839.
11. C.Lautenberger,C.Fernandez-Pello,Generalizedpyrolysismodelforcombustible solids,FireSafetyJournal44(2009)819–839.
12. T.Kashiwagi,T.J.Ohlemiller,A study of oxygen effects on flaming transient gasification of PMMA and PE. During thermal irradiation,Proceedings of the Symposium (International) onCombustion19(1982)815–823.

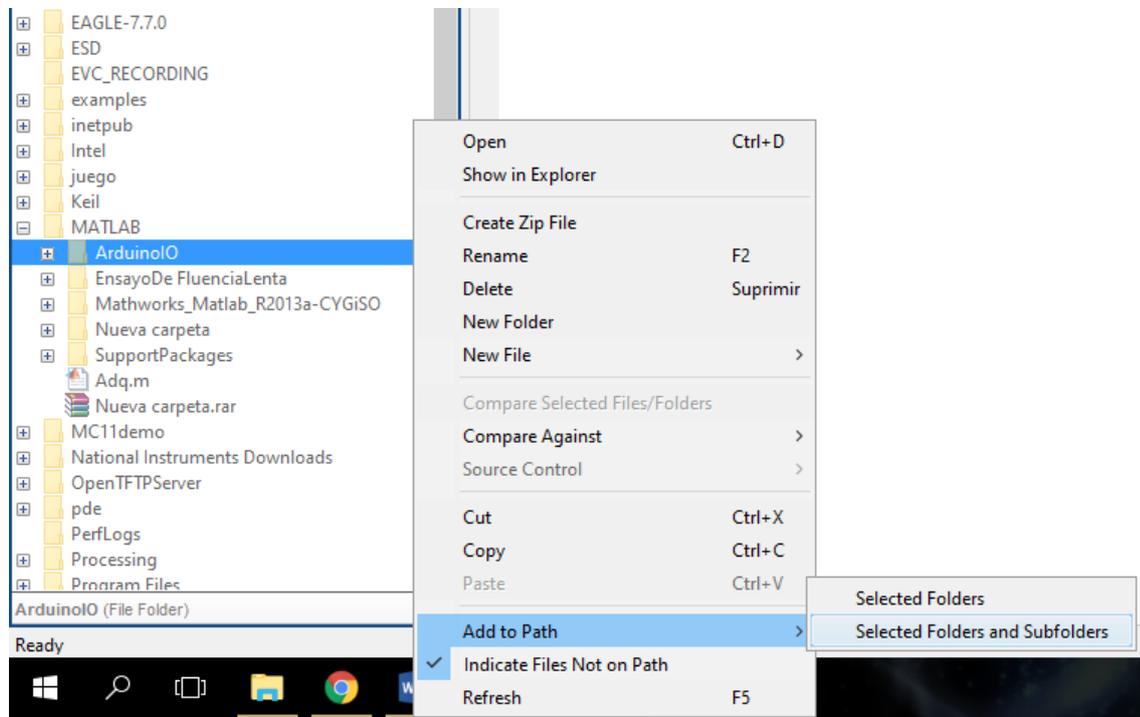
APÉNDICES

APÉNDICE A
Planos Esquemáticos

APÉNDICE B

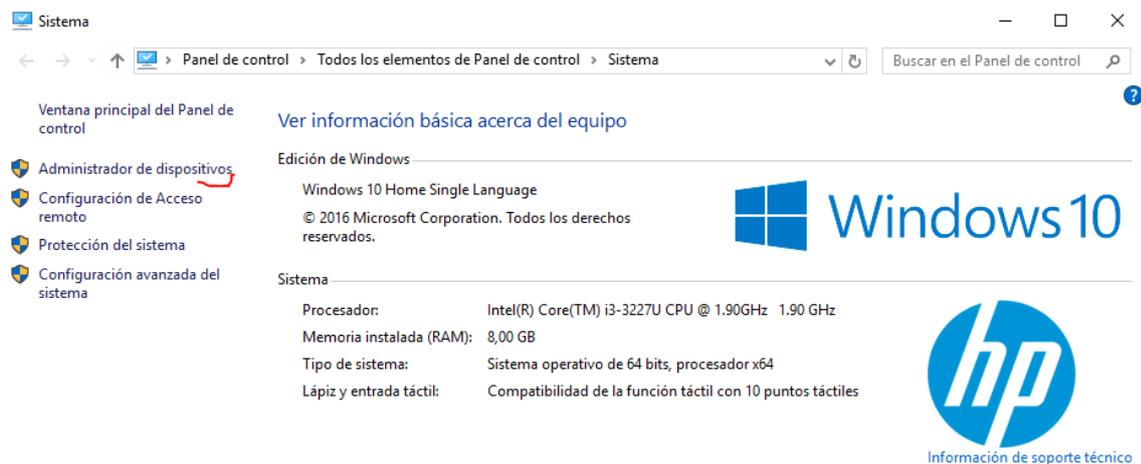
Enlace entre el sistema de adquisición de datos y el software

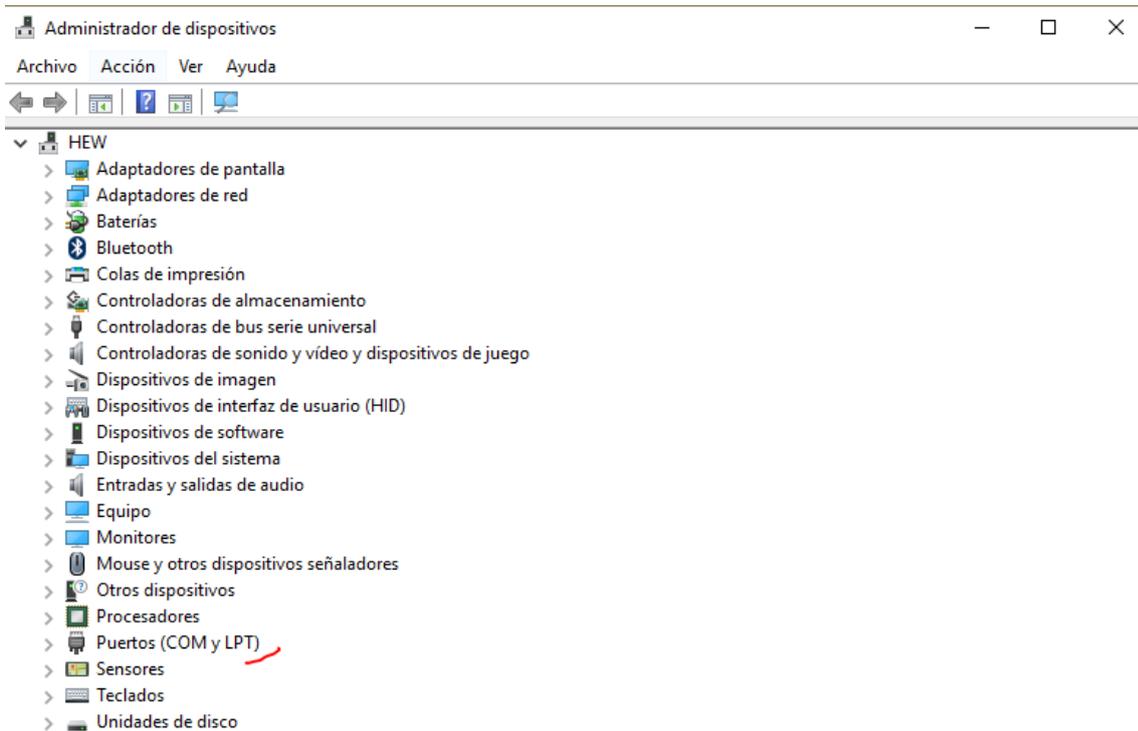
Clic derecho sobre la carpeta y elegir la opción Add to path,



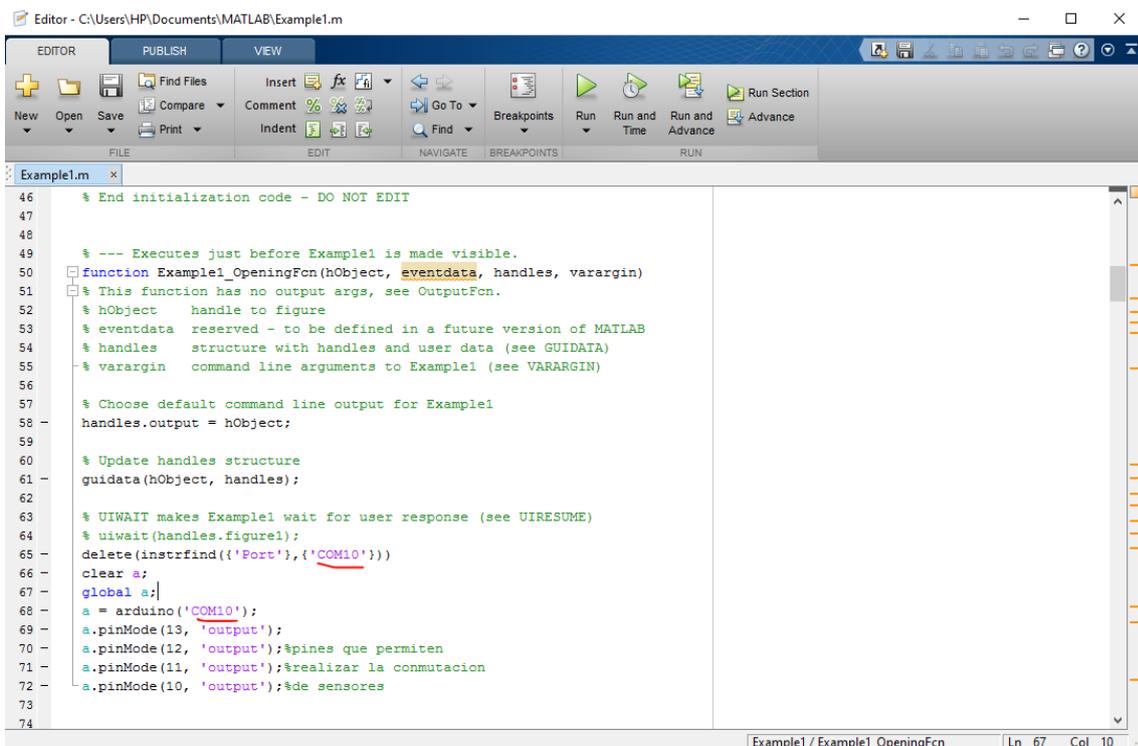
Luego

En el administrador de dispositivos buscar el puerto COM al que corresponde la tarjeta Arduino.





Ese puerto debe reemplazarse en el archivo .m del proyecto



Ahora en el workspace, ya se puede llamar a la función del proyecto Example1

```

function varargout = Example1(varargin)
% EXAMPLE1 MATLAB code for Example1.fig
%   EXAMPLE1, by itself, creates a new EXAMPLE1 or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = EXAMPLE1 returns the handle to a new EXAMPLE1 or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   EXAMPLE1('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in EXAMPLE1.M with the given input arguments.
%
%   EXAMPLE1('Property','Value',...) creates a new EXAMPLE1 or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Example1_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Example1_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Example1

% Last Modified by GUIDE v2.5 10-Feb-2017 03:52:51

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Example1_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Example1_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Example1 is made visible.
function Example1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Example1 (see VARARGIN)

```

```

% Choose default command line output for Example1
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Example1 wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
delete(instrfind({'Port'}, {'COM10'}))
clear a;
global a;
a = arduino('COM10');
a.pinMode(13, 'output');
a.pinMode(12, 'output');%pines que permiten
a.pinMode(11, 'output');%realizar la conmutacion
a.pinMode(10, 'output');%de sensores

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Example1_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in turn_on_button.
function turn_on_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to turn_on_button (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
a.digitalWrite(13,1);

% --- Executes on button press in turn_off_button.
function turn_off_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to turn_off_button (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
a.digitalWrite(13,0);

% --- Executes on button press in read_button.
function read_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to read_button (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

global i a
global t;
t=zeros();

global T1;
global T2;
global T3;
global T4;
global T5;
global T6;
global T7;
global T8;
global T9;
global T10;
global T11;
global T12;
global T13;
global T14;
global T15;
global T16;
global T17;
global T18;
global T19;
global T20;

x=0;
%y=0;
xlabel('tiempo [s]');
ylabel('Temperatura [*C]');

for i=1:300
    t(i)=i;

    %sensores 1ra pos
    T1(i)=a.analogRead(0)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T5(i)=a.analogRead(1)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T9(i)=a.analogRead(2)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T13(i)=a.analogRead(3)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T17(i)=a.analogRead(4)*0.00488/0.01; %sensor temp1

    a.digitalWrite(12,1);%conmuta al sensores 2da pos

    T2(i)=a.analogRead(0)*0.00488/0.01;%sensor temp2
    T6(i)=a.analogRead(1)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T10(i)=a.analogRead(2)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T14(i)=a.analogRead(3)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T18(i)=a.analogRead(4)*0.00488/0.01; %sensor temp1

    a.digitalWrite(11,1);%conmuta al sensores 3ra pos

    T3(i)=a.analogRead(0)*0.00488/0.01;%sensor temp3
    T7(i)=a.analogRead(1)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T11(i)=a.analogRead(2)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T15(i)=a.analogRead(3)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T19(i)=a.analogRead(4)*0.00488/0.01; %sensor temp1

```

```

a.digitalWrite(10,1);%conmuta al sensor 4ta pos

T4(i)=a.analogRead(0)*0.00488/0.01;%sensor temp3
T8(i)=a.analogRead(1)*0.00488/0.01; %sensor temp1
T12(i)=a.analogRead(2)*0.00488/0.01; %sensor temp1
T16(i)=a.analogRead(3)*0.00488/0.01; %sensor temp1
T20(i)=a.analogRead(4)*0.00488/0.01; %sensor temp1

a.digitalWrite(10,0);%conmuta al sensor temp4
a.digitalWrite(11,0);%conmuta al sensor temp4
a.digitalWrite(12,0);%conmuta al sensor temp4

plot(t,T1,t,T2,t,T3,t,T4,t,T5,t,T6,t,T7,t,T8,t,T9,t,T10,t,T11,t,T12,t,T13,t,T
14,t,T15,t,T16,t,T17,t,T18,t,T19,t,T20)
% x=[x,b];
%plot(x,'LineWidth',2,y,'LineWidth',2); grid on;
set(handles.t1,'string', T1(i));%temperatura
set(handles.t2,'string', T2(i));%temperatura
set(handles.t3,'string', T3(i));%temperatura
set(handles.t4,'string', T4(i));%temperatura
set(handles.t5,'string', T5(i));%temperatura
set(handles.t6,'string', T6(i));%temperatura
set(handles.t7,'string', T7(i));%temperatura
set(handles.t8,'string', T8(i));%temperatura
set(handles.t9,'string', T9(i));%temperatura
set(handles.t10,'string', T10(i));%temperatura
set(handles.t11,'string', T11(i));%temperatura
set(handles.t12,'string', T12(i));%temperatura
set(handles.t13,'string', T13(i));%temperatura
set(handles.t14,'string', T14(i));%temperatura
set(handles.t15,'string', T15(i));%temperatura
set(handles.t16,'string', T16(i));%temperatura
set(handles.t17,'string', T17(i));%temperatura
set(handles.t18,'string', T18(i));%temperatura
set(handles.t19,'string', T19(i));%temperatura
set(handles.t20,'string', T20(i));%temperatura

axis([0 30 0 300]);

pause(0.1);
end

function edit_text_samples_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_text_samples (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_text_samples as text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit_text_samples as a double
handles.data1=get(hObject,'String');
handles.xSamples=str2double(handles.data1);
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_text_samples_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_text_samples (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function temperatura_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to temperatura (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of temperatura as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of temperatura as
a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function temperatura_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to temperatura (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function tiempo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tiempo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of tiempo as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of tiempo as a
double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tiempo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tiempo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in menu.
function menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to menu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns menu contents as
cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from menu
v=get(handles.menu,'value');
switch v
    case 1 %polietileno
        if handles.xSamples==3
            set(handles.s1,'string', 160);%temperatura
            set(handles.s2,'string', 54); %tiempo
        elseif handles.xSamples==2
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 36);
        elseif handles.xSamples==1.5
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 28);
        elseif handles.xSamples==1
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 18);
        else
            set(handles.s1,'string', 'Valor inadecuado');
            set(handles.s2,'string', 'Valor inadecuado');
        end

    otherwise %poliestireno
        if handles.xSamples==3
            set(handles.s1,'string', 170);
            set(handles.s2,'string', 82);
        elseif handles.xSamples==2
            set(handles.s1,'string', 170);
            set(handles.s2,'string', 55);
        elseif handles.xSamples==1.5
            set(handles.s1,'string', 170);
            set(handles.s2,'string', 28);
        elseif handles.xSamples==1
            set(handles.s1,'string', 170);
            set(handles.s2,'string', 18);
        else
            set(handles.s1,'string', 'Valor inadecuado');

```

```

        set(handles.s2,'string', 'Valor inadecuado');
    end

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function menu_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to menu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in preparar.
function preparar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to preparar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global T1;
global T2;
global T3;
global T4;
global T5;
global T6;
global T7;
global T8;
global T9;
global T10;
global T11;
global T12;
global T13;
global T14;
global T15;
global T16;
global T17;
global T18;
global T19;
global T20;
T1=zeros();
T2=zeros();
T3=zeros();
T4=zeros();
T5=zeros();
T6=zeros();
T7=zeros();
T8=zeros();
T9=zeros();
T10=zeros();
T11=zeros();

```

```
T12=zeros();
T13=zeros();
T14=zeros();
T15=zeros();
T16=zeros();
T17=zeros();
T18=zeros();
T19=zeros();
T20=zeros();
```

```
% --- Executes on button press in ExpWorkspace.
function ExpWorkspace_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ExpWorkspace (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
prueba
```

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño de un Banco de Pruebas para medir Propagación de la
combustión en Materiales que arden sin Llama"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Jerry Paul Panchana González

Miguel Ángel Udeo Guamán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por haberme brindado su apoyo durante toda mi vida estudiantil, a los profesores tutor y coordinador por ofrecerme su guía durante el desarrollo de este proyecto.

J.P

Agradezco a Dios principalmente ya que si no fuese por su amor y voluntad no se habría culminado el presente trabajo, a mis padres por ser los pilares fundamentales y apoyo de mi vida. A los tutores que han sabido guiar y compartir sus conocimientos.

M.U

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Sr Jerry Paul Panchana González

Sr Miguel Ángel Udeo Guamán

PhD. Angel Diego Ramírez Mosquera

PhD. Freddy Xavier Jervis Calle

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Sr. Jerry Paul Panchana González

Sr. Miguel Ángel Udeo Guamán

PhD. Freddy Xavier Jervis Calle

RESUMEN

El presente proyecto de graduación tiene como objetivo general y fundamental, diseñar un banco de pruebas, para estudiar la propagación del frente de combustión de materiales que arden sin llama (smoldering). Resulta de mucha importancia el análisis de este tipo de combustión, debido a que la información existente sobre este fenómeno es muy limitada y es una de las principales causas de muertes en incendios en los Estados Unidos.

En nuestra vida cotidiana siempre vamos a estar rodeados de materiales que combustionan sin llama, uno de estos materiales es la espuma de poliuretano, la cual sirve como material de relleno en muebles y colchones, y que bajo ciertas condiciones se podría considerar como peligro.

En nuestro diseño los cálculos se basaron en conceptos de transferencia de calor, como por ejemplo el modelo de resistencia térmica en serie, para obtener los espesores de las paredes.

Conceptos básicos de la electricidad fueron aplicados para determinar la longitud de la resistencia calefactora y obtener el rango de corrientes de la fuente de poder. Con todo esto los materiales que cumplieron con los requerimientos para el banco de pruebas fueron: (acero al carbono, manta refractaria, ladrillo refractario, niquelina y pernos), mientras que para la adquisición de datos de temperatura se seleccionó (arduino mega, baquelita, fuente 12V, diodos, amplificadores, relé, transistores etc.)

Se diseñó un sistema de adquisición de datos respecto a las variaciones de temperaturas que se tendrá a futuro cuando se lleve a cabo la construcción del diseño, se realizó también el esquema del circuito y finalmente se presenta una simulación básica y simplificada del comportamiento del combustible dentro del banco de pruebas, con el fin de apreciar la forma de los datos a obtener. .

Palabras Clave:

Banco de pruebas, Combustion latente, Carbón, Arduino.

ABSTRACT

This graduation project aims general and fundamental, design a test bench, to measure the spread of materials to combust without flame front (smoldering). Since it is important the analysis and study of combustion without flame, since it is one of the leading causes of deaths in fire caused by smoldering in the United States. In our daily life will always be surrounded by material to combust without flame, among which we have is polyurethane foam which serves as filler in furniture and mattresses.

In our design is performed the analysis and calculations respective for the selection of materials, which met the requirements necessary for the Bank of tests and these were: (steel carbon, refractory blanket, refractory brick, thermal niccolite, angles and bolts), as for the acquisition of data of temperature is selected (arduino mega, bakelite, supply 12V, diodes, amplifiers, relay, transistors etc.)

As results of our design is obtained it acquisition of data concerning them variations of temperatures that is will have to future when is build the Bank of tests, is conducted also the scheme of the circuit and finally a simulation of the flow of transfer of heat to the material or fuel fossil is spread slowly, since its speed of propagation this between them 20-30 mm / h.

Finally reached the goal raised in designing a test bench capable of adapting the criteria and parameters of latent combustion (smoldering), was designed on the basis of all the requirements that this type of combustion entails, for study and analysis.

Keywords:

Bank of tests, Combustion latent, coal, Arduino.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE PLANOS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Marco teórico	2
1.3.1. Combustión	2
1.3.2. Tipos de Combustión	2
1.3.3. Combustión Latente	3
1.3.4. Importancia del estudio de Smoldering	5
1.3.5. Diferencias entre combustión latente (Smoldering) y combustión con llama (Flaming)6	
1.3.6. Estructura del frente de Smoldering	7
1.3.7. Regulación sobre combustión latente (smoldering).....	9
1.3.8. Combustibles característicos de Smoldering	10

CAPÍTULO 2.....	13
2. Metodología del Diseño	13
2.1. Características más relevantes del smoldering	13
2.2. Requerimientos de diseño	13
2.3. Diseño de forma	14
2.3.1. Diseño 1	14
2.3.2. Diseño 2	15
2.3.3. Diseño 3	15
2.4. Preselección de materiales.....	16
2.5. Selección del diseño	18
2.6. Selección de materiales.....	19
2.7. Cálculos de diseño	23
2.7.1. Diseño de las paredes compuestas	23
2.7.2. Unión de los materiales.....	31
2.7.3. Diseño de ángulos conectores	35
2.7.4. Cálculos de corriente.....	38
2.8. Detalles de las partes	41
2.9. Diseño del sistema de adquisición de datos.....	42
CAPÍTULO 3.....	46
3. Resultados	46
3.1. Análisis térmico.....	46
3.2. Análisis eléctrico	47
3.3. Análisis del sistema de control.....	50
Adquisición de datos.....	50
3.4. Información extraíble del banco de pruebas	52
3.5. Análisis económico	55

3.5.1. Costos de materiales.....	55
CAPÍTULO 4.....	57
4. Discusión y Conclusiones	57
4.1. Conclusiones	58
4.2. Recomendaciones	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59
APÉNDICES	60

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

UNE-EN Regulacion Smoldering

CEN/TC127 Comité Encargado en Desarrollo Smoldering

SIMBOLOGÍA

V: Voltaje

α : Coeficiente de difusividad

M: Metro

Cm: Centímetro

Mm: milímetro

Un: Número de nuselt

Pr: Numero de prandl

R: Resistencia

Q: Flujo de calor

Pot: Potencia

E: Espesor

L: Longitud

T: Temperatura

Kg: Kilogramos

ΔL : Deformación longitudinal

g : Gravedad

β : Coeficiente de expansión volumétrica

T_s : Temperatura superficial

T_∞ : Temperatura ambiente

γ : Viscosidad cinemática

α : Difusividad térmica

L : Longitud característica

\bar{h} : Coeficiente de convección promedio

A : Área de la superficie

ΔT : Diferencia de temperaturas

K_1 : Conductividad térmica

S_y : Límite de fluencia

σ : Esfuerzo en el perno

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Carbón ardiendo (ejemplo de smoldering).....	3
Figura 1.2 Flujo de aire en el sentido de propagación	4
Figura 1.3 Flujo de aire en sentido contrario a la propagación	5
Figura 1.4 Combustión Latente (smouldering) y combustión por llama (Flaming)	6
Figura 1.5 Estructura de combustión latente unidimensional sobre un cigarrillo	8
Figura 1.6. Carbón Vegetal.....	10
Figura 1.7. Turba	11
Figura 1.8. Humus	12
Figura 2.1 Diseño en base a hornos de tratamientos térmicos.....	14
Figura 2.2 Diseño a base concreto (hormigón).....	15
Figura 2.3 Diseño de placas compuestas empernadas	16
Figura 2.4 Partes del banco de pruebas.....	23
Figura 2.5 Modelo de resistencias en serie para la pared compuesta acero-fibra-acero	24
Figura 2.6 Esquemmatización de la caída de temperatura a través de la pared compuesta.	25
Figura 2.7 Unión de material externo, interno y aislante.....	31
Figura 2.8 Deformación del ángulo conector debido a la diferencia de dilatación de las placas de acero.....	35
Figura 2.9 Angulo conector como viga en voladizo.....	35
Figura 2.10 Pared compuesta con agujeros para insertar termopilas.....	41
Figura 2.11 Esquema general del amplificador AD620.....	43
Figura 2.12 Etapa de filtrado.....	44
Figura 2.13 Conmutación para 4 termopilas	45
Figura 3.1 Caída de temperatura en pared compuesta (ladrillo-fibra-acero)	46
Figura 3.2 Caída de temperatura en pared (acero-fibra-acero)	47
Figura 3.3 Partes del banco de pruebas	48
Figura 3.4 Partes del banco de pruebas	49
Figura 3.5 Banco de pruebas.....	50

Figura 3.6 Circuito amplificado.....	51
Figura 3.7 Configuración para 20 sensores de temperatura.....	52
Figura 3.8 Simulación del proceso de smoldering para el carbón.....	53
Figura 3.9 Evolución del proceso de smoldering	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Materiales preseleccionados y función	16
Tabla 2.2 Características de los materiales estructurales preseleccionados	17
Tabla 2.3 Característica de los materiales refractarios preseleccionados	17
Tabla 2.4 Características de los materiales aislantes preseleccionados	17
Tabla 2.5 Características de los materiales preseleccionados para la resistencia calefactora	17
Tabla 2.6 Matriz de ponderación para la selección de diseño	18
Tabla 2.7 Selección de diseño	18
Tabla 2.8 Matriz de ponderación.....	19
Tabla 2.9 Selección de material estructural	19
Tabla 2.10 Matriz de ponderación para material refractario.....	20
Tabla 2.11 Selección de refractario	20
Tabla 2.12 Matriz de ponderación para material resistivo calefactor	20
Tabla 2.13 Selección de material resistivo calefactor	21
Tabla 2.14 Matriz de ponderación para material aislante	21
Tabla 2.15 Selección de material aislante	21
Tabla 2.16 Matriz de ponderación para la selección de termopilas	22
Tabla 2.17 Selección de termopila.....	22
Tabla 2.18 Espesores de la pared compuesta.....	29
Tabla 2.19 Característica del perno pre-seleccionado.....	31
Tabla 2.20 Límites de longitud y corriente para la ignición	40
Tabla 3.1 Rango de corrientes al variar el voltaje	47
Tabla 3.2 Materiales y componentes para el circuito de adquisición de datos	50
Tabla 3.3 Datos de temperatura en diferentes tiempos	54
Tabla 3.4 Cantidad y costos de materiales	55

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Vista general
- PLANO 2 Placa grande (detalle 1)
- PLANO 3 Placa grande (detalle 2)
- PLANO 4 Placa pequeña
- PLANO 5 Angulo para esquinas
- PLANO 6 Angulo superior e inferior
- PLANO 7 Placa base
- PLANO 8 Placa superior
- PLANO 9 Placa superior (detalle 1)
- PLANO 10 Placa superior (detalle 2)

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La combustión latente (smolderig) es una de las causas más comunes que provocan incendios residenciales y pérdidas económicas que se aproximan a los 350 millones de dólares, solo en los Estados Unidos.

El primer trabajo científico realizado sobre combustión latente fue publicado en el año de 1957. Esta investigación consistió en una toma de datos y observaciones de ensayos simples realizados sobre polvo en combustión, este tipo de trabajos se lo realizaron hasta la mitad de la década de los 70. En la segunda mitad de la década de los 70, los ensayos e investigaciones se centraron en espumas poliméricas (el caso de la espuma flexible de poliuretano, aplicada como material de relleno en muebles y colchones) y cigarrillos, analizando principalmente la detección de humos y toxicidad. En la actualidad este tipo de reacción no ha sido estudiado tan a fondo como el fenómeno de combustión.

1.1. Descripción del problema

Existe la necesidad de estudiar y evaluar el comportamiento de los diferentes materiales que combustionan sin llama, con el fin de poder reflejar las condiciones críticas que den lugar a la ignición y su propagación.

Resulta imperativo entender este proceso de combustión y como varía de acuerdo a las condiciones del ambiente, parámetros como la velocidad del frente de combustión, concentración de oxígeno, calor disipado, temperatura y producción de gases son variables de interés y del banco de pruebas a diseñar deben poder obtenerse datos asociados, por lo que un buen diseño y su correcto funcionamiento permitirían tener resultados confiables.

El banco de pruebas debe ofrecer información suficiente para analizar la combustión de diferentes materiales de prueba en diferentes condiciones, con el fin de evaluar la resistencia o facilidad para empezar la ignición y propagar su frente de combustión.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Diseñar un banco de pruebas para evaluar la propagación del frente de materiales en combustión sin llama.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema capaz de generar la ignición en un material de interés.
- Diseñar el aislamiento térmico del sistema acorde a condiciones que se puedan generar en las pruebas.
- Realizar la integración de todos los sistemas e instrumentos requeridos con la ayuda de un software de adquisición de datos.

1.3. Marco teórico

1.3.1. Combustión

La combustión se define como una reacción química totalmente exotérmica, que se provoca entre un combustible y el oxígeno del aire en presencia de calor, el triángulo de fuego está formado por tres elementos (combustible, calor y oxígeno).

1.3.2. Tipos de Combustión

Lenta (Latente): Esta combustión se origina con emisión de luz y poca emisión de calor, debido a la baja cantidad de oxígeno que conlleva este proceso.

Normal: Esta combustión se produce con emisión de luz y calor notorios.

Rápida: Se aprecia en la inflamación de combustibles derramados y su velocidad con la que se propaga es menor que la del sonido.

Muy Rápida: Se aprecia en explosiones (acumulación de gases encerrados) y la velocidad con la que se propaga es mayor que la del sonido.

1.3.3. Combustión Latente

La combustión latente es una reacción exotérmica que se propaga en el interior de combustibles porosos. Se da principalmente en materiales como el carbón, cascarilla de arroz, aserrín, turba, humus etc. Su reacción es lenta no se requiere de altas temperaturas y se produce sin llama por lo que es capaz de perdurar durante largos periodos de tiempo, incluso horas, propagándose lentamente y produciendo gran cantidad de gases, hasta finalmente terminar en combustión por llama causando grandes incendios.

El smoldering tiene un interés particular en la seguridad contra incendios ya que los gases procedentes de este fenómeno pueden ser altamente tóxicos y su detección en el interior de un material es difícil, además frecuentemente es la fuente de inicio para los incendios con llama.

Este proceso constituye un riesgo de incendio importante por 2 motivos:

- Produce una mayor transformación de un combustible a compuestos tóxicos en comparación con una llama.
- Proporciona una ruta para que la inflamación del combustible pueda ser iniciada por fuentes de calor mucho más débiles que una llama.

El proceso físico de combustión latente puede explicarse de manera detallada como un frente de onda radiante y caliente que se mueve a través de un combustible poroso, mostrada en la figura 1.1 (Rein, 2002)



Figura 1.1 Carbón ardiendo (ejemplo de smoldering)

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

La propagación del smoldering se puede producir en una sola dimensión o en varias dimensiones, el frente de combustión se puede desplazar en el mismo sentido que la dirección del oxígeno o en movimiento contrario.

Movimiento unidimensional

Puede presentarse en 2 situaciones

- **Propagación en el mismo sentido**

Se da cuando el flujo de oxígeno se produce en la misma dirección que el movimiento del frente. El oxígeno fluye a través de la carbonización y reacciona en la zona de combustión y cuando esta se ha empobrecido, continúa hacia el combustible virgen. El transporte de calor hacia dicha zona se produce de manera convectiva y se genera un precalentamiento (Figura 1.2).

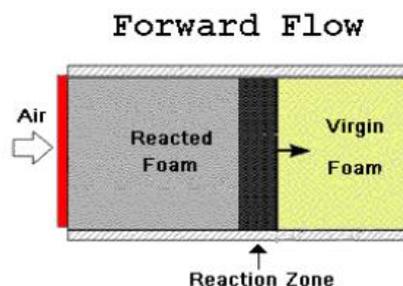


Figura 1.2 Flujo de aire en el sentido de propagación

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

- **Propagación en sentido contrario**

Se produce cuando el oxígeno fluye a través del combustible virgen y reacciona en la zona de combustión, una vez empobrecido viaja a la zona de carbonización. El transporte de calor por convección se produce hacia la zona de carbonización, reduciendo el precalentamiento del combustible (Figura 1.3).

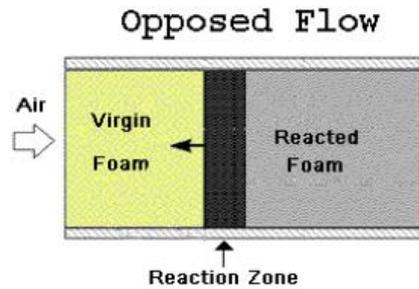


Figura 1.3 Flujo de aire en sentido contrario a la propagación

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

Movimiento multidimensional

Este tipo de propagación nos muestra factores tales como la geometría de la fuente para la ignición, geometría del combustible y la fuerte influencia del flujo de oxígeno las cuales normalmente interactúan entre sí para asegurar que la zona de reacción del smoldering tenga un gradiente de temperatura y en la propagación se desarrolle en varias dimensiones.

1.3.4. Importancia del estudio de Smoldering

Es de gran importancia como ya se ha indicado anteriormente, es un proceso que abarca un gran peligro y que puede convertirse en un gran incendio si se dan determinadas condiciones. Esta reacción puede darse en diferentes situaciones y escenarios.

Es importante el estudio y el conocimiento de este fenómeno ya que está causando riesgos en la industria aeroespacial, incendios forestales e incluso incendios subterráneos. Los incendios con smoldering generan productos de oxidación incompleta y por tanto emite una mezcla de gases y partículas asfixiantes e irritantes. El crecimiento es más lento en relación con los incendios producidos por llama, pero generan una gran amenaza cuando las personas están durmiendo, son incapacitadas, etc.

Se ha determinado que la amenaza para las personas es debido a CO y que se genera una masa considerada peligrosa a partir de los rangos de tiempo 50-150 min desde el inicio del incendio, además los detectores contra incendios en presencia de humo son poco efectivos para este tipo de reacción. (Rein, Smouldering Combustion Phenomena in Sciency and Tecnology , 2009)

1.3.5. Diferencias entre combustión latente (Smoldering) y combustión con llama (Flaming)

La principal diferencia entre combustión latente y combustión con llama se da en la forma de reacción de oxidación y en la liberación de calor que ocurre en la superficie de los materiales combustibles porosos. En la etapa final, estos ocurren en fase gaseosa alrededor del combustible, como se aprecia en la Figura 1.4



Figura 1.4 Combustión Latente (smouldering) y combustión por llama (Flaming)

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

La temperatura, velocidad de propagación y el calor liberado durante el proceso de smoldering son totalmente inferiores en comparación de un material sólido en combustión por llama. El rango de temperaturas alcanzado en combustión sin llama esta entre 250-500°C y energía liberada entre 6 y 12 KJ/g. la velocidad a la que se propaga es baja, y se encuentra aproximadamente en un rango de 10-30 mm/h, es

decir, 2 órdenes de propagación más bajo que la velocidad de propagación de la llama.

La transición del estado de smoldering a llama ocurre cuando se cumplen las condiciones críticas dentro de los poros, estas condiciones incluyen la inflamabilidad de la mezcla de gases dentro de los poros y el exceso de calor liberado por las fuertes reacciones de oxidación en fase sólida. La transición a llamas se puede ver favorecida por un aumento en los niveles de oxígeno y corrientes de aire (como por ejemplo el viento). La transición a las llamas solamente ha sido observada hasta la fecha en la propagación de un mismo sentido, debido a que los gases calientes precalientan el combustible que está por delante de la reacción. No obstante, esta transición no está lo suficientemente investigada y por ello el conocimiento no es adecuado en este momento.

El flujo de calor que se necesita para alcanzar la ignición en smoldering es más baja que la requerida para flaming. Por ejemplo la ignición de smoldering con espuma flexible de poliuretano se produce con un nivel de flujo de calor de 2KW/m², mientras que la ignición con llama se produce por encima de los 10KW/m².

1.3.6. Estructura del frente de Smoldering

Cuando se estudia la propagación a través del interior de materiales combustibles porosos, como ya se lo menciona anteriormente es importante considerar el proceso unidimensional y dividirlo en 2 configuraciones, es decir en un mismo sentido y en dirección opuesta. En estas situaciones se pueden distinguir 4 zonas:

Zona de precalentamiento del material

El calor generado por el frente de la combustión es transportado hacia la parte delantera para precalentar el combustible alcanzando temperaturas donde se produce la evaporación del agua.

Zona de evaporación

Es una reacción de tipo endotérmica que se produce en un rango de temperaturas entre 80 y 100 °C, produciendo vapor de agua. En este frente, la pérdida de masa depende de la cantidad de humedad que el combustible posea.

Zona de combustión

Es donde se producen las reacciones (pirolisis y oxidación), la reacción de pirolisis absorbe el calor y convierte el material combustible en gases volátiles, hidrocarburos aromáticos, trazas de CO y CO₂ y vapor de agua. Estas reacciones producen un residuo carbonizado. La pirolisis se da por encima de los 200°C. En cambio, la oxidación involucra una reacción exotérmica del combustible y la carbonización producida por el frente de la pirolisis. Este tipo de reacción se produce por encima de 300°C y es la principal fuente de CO y CO₂.

Zona de cenizas y carbonización

Esta es la zona donde la combustión latente (smoldering) ha cesado y la temperatura va descendiendo hasta llegar a la temperatura ambiente. La ceniza producida por la reacción es el contenido mineral presente en el combustible y la carbonización es el resultado de una combustión incompleta. (Penalva, 2015)

En la Figura 1.5 se muestran las zonas detalladas anteriormente.

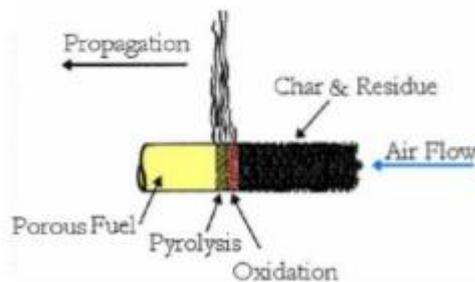


Figura 1.5 Estructura de combustión latente unidimensional sobre un cigarrillo

Fuente: Rein Guillermo, 2009.

1.3.7. Regulación sobre combustión latente (smoldering)

En España hasta la fecha, la evaluación del proceso de smoldering solamente es considerado por las normas dedicadas al mobiliario.

El código técnico de edificación recoge la obligatoriedad de ensayar bajo las normas UNE-EN 1021-1 "Valoración de la inflamabilidad del mobiliario tapizado. Parte 1: Fuente de ignición: cigarrillo en combustión" y UNE-EN 1021-2 "Valoración de la inflamabilidad del mobiliario tapizado. Parte 2: Fuente de ignición: Llama equivalente a una cerilla"

En el ámbito constructivo, hay países como Noruega que tienen en cuenta el proceso de smoldering y disponen de requerimientos para los materiales aislantes combustibles en los áticos.

Los ensayos se llevan a cabo según la norma NT Fire 305 "Building products: Flammability and smoldering resistance of loose-fill thermal insulation".

En la actualidad se está desarrollando bajo el ámbito de CEN una norma Europea armonizada (FprEN 16733:2015), para la evaluación del smoldering en los procesos utilizados en construcción con vistas a que en el futuro este tipo de combustión sea incluido en el sistema Europeo de clasificación de reacción al fuego (UNE-EN 13501-1). El comité encargado de su desarrollo es el CEN/TC127 "Fire safety in Buildings".

Según el proyecto de norma, los criterios para llegar a la conclusión de que se ha producido smoldering sobre una muestra son los siguientes:

- 1.- Aparición de llama sostenidas en los bordes de la muestra y que no haya sido originadas por una propagación de llama visible sobre la superficie de la muestra.
- 2.- Re-ignición de la muestra después de haber pasado 5 minutos o de la retirada del quemador y después de que todas las llamas de la superficie se hayan extinguido.
- 3.- Un aumento mayor de 250°C de la temperatura medida por termopares después de la retirada de la llama.

4.- Ninguno de los termopares instalados sobre la muestra debe sobrepasar una temperatura mayor de 50°C después de haber transcurrido 6 horas desde el comienzo del ensayo o que se produzca un incremento de temperatura durante al menos 60 minutos. (Penalva, 2015)

1.3.8. Combustibles característicos de Smoldering

Combustibles son aquellas sustancias que pueden o tienen la capacidad de reaccionar químicamente con un agente oxidante, obteniendo como resultado energía liberada en forma de calor. Existe una gran variedad de combustibles fósiles, cada uno con diferentes porcentajes respecto a composición de humedad, carbón, azufre, cenizas etc.

A continuación, se presenta algunos de los tipos de combustibles para smoldering.

Carbón

Es un combustible de mucho interés, es uno de los recursos muy importantes y valiosos para la humanidad, por sus diferentes usos y aplicaciones. El carbón es un combustible sólido y poroso, de color pardo o negro principalmente de origen vegetal, es el producto de la obtención destructiva de la madera, contiene un rango de 10 y 15% de agua, 2 a 3% de cenizas y de 0.5 a 1.0% de hidrogeno. Su poder calorífico es de aproximadamente 27,9 MJ/Kg. (Figura 1.6)



Figura 1.6. Carbón Vegetal.

Fuente: Deconceptos.com.

Turba

Está formado de materia vegetal parcialmente descompuesta. Principalmente se acumula en lugares saturados de humedad, es usada principalmente en la agricultura como abono para las plantas y cultivos, una turba de alto grado se caracteriza por estar formada de un porcentaje típico de 90% de agua, 3% de carbón fijo, 5% de volátiles, 1.5% de cenizas y 0.1% de azufre. (Figura 1.7) El poder calorífico del material cuando está seco es de aproximadamente 20.9 MJ/Kg. (Polo, 1990)



Figura 1.7. Turba

Fuente: Jardicen.cl

Humus

Este combustible se define como una sustancia compuesta por ciertos desechos orgánicos que son de naturaleza coloidal, es decir materia orgánica transformada y estabilizada que se acumula en el suelo, lo cual proviene de la desintegración de los restos orgánicos por cuerpos y microorganismos benéficos (hongos y bacterias), y se caracteriza por su color negruzco debido a la gran cantidad de carbono que posee este combustible fósil, (Figura 1.8). Se encuentra principalmente en las partes altas de los suelos con actividad orgánica.

Los elementos orgánicos que componen el humus son muy estables, es decir, su grado de descomposición es tan elevado que ya no se descomponen más y no sufren transformaciones considerables. (et, 2007)



Figura 1.8. Humus

Fuente: León-García, 2007.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

2.1. Características más relevantes del smoldering

Para iniciar el proceso de diseño es necesario establecer los requerimientos básicos que deberá cumplir el banco de pruebas. Para generar estos requerimientos se han seleccionado las características más relevantes del proceso de smoldering:

- Las temperaturas alcanzadas en este tipo de combustión se encuentran en un intervalo de 250 a 500 °C.
- El combustible más común para el estudio de este tipo de combustión es el carbón y asimismo es el que alcanza mayores temperaturas de combustión.

2.2. Requerimientos de diseño

Basados en estas características se puede definir el requerimiento funcional más básico.

- El banco de pruebas debe soportar una temperatura máxima de 500 °C

De acuerdo a la funcionalidad se puede establecer que:

- El inicio de la combustión del material de prueba debe generarse en un extremo del banco y propagarse solo por las propiedades del combustible.

Por motivos de seguridad operacional se define el siguiente requerimiento:

- La temperatura superficial del banco de pruebas debe ser lo suficientemente baja como para ser considerado seguro de operar. Se considera 40°C como temperatura superficial adecuada.

Basados en información preliminar del comportamiento del carbón y por criterio de los diseñadores se tiene que:

- Las dimensiones definidas para el volumen interno del banco son de 0,3 m X 0,3 m x 0,5 m.

2.3. Diseño de forma

Todos los modelos presentados a continuación fueron basados en estructuras con funciones similares y se modelaron bajo criterios del estudiante, con el fin de adaptarlos a las condiciones de trabajo requeridas, se presentaron 3 modelos, para posteriormente seleccionar la alternativa que mejor se adapte a nuestras condiciones de diseño.

2.3.1. Diseño 1

El banco de pruebas en su forma más básica es una caja con estructura muy similar a los hornos para tratamientos térmicos, en la figura 2.1 se distingue una capa interna de material refractario, capaz de mantener contacto con el combustible en ignición y una capa externa de material metálico lo suficientemente rígido que permite la integración de todos los componentes, como se muestra en la Figura 2.1

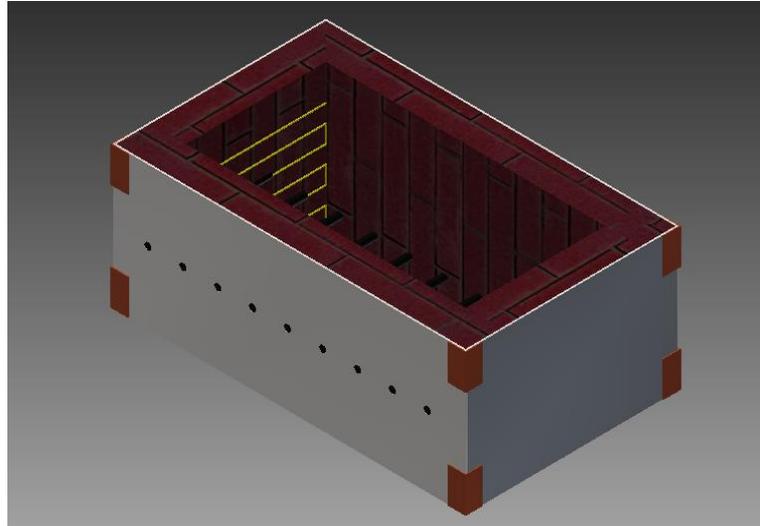


Figura 2.1 Diseño en base a hornos de tratamientos térmicos

Fuente: Elaboración propia

Los puntos fuertes de este diseño se basan en una estructura muy resistente a los cambios de temperatura y al choque térmico, características que le otorgan los ladrillos refractarios a base de sílice, pero presenta el inconveniente de ser muy pesado y difícil de manipular y/o trasladar.

2.3.2. Diseño 2

Como se puede observar en la figura 2.2 esta alternativa es muy similar al diseño 1, con la diferencia de que está formado por concreto (hormigón), lo que le da rigidez, pero con el inconveniente de la posibilidad a presentar fallas estructurales por la intermitencia de temperaturas en el banco. Asimismo, presenta la debilidad frente a los otros diseños de ser muy rustico, además de que se necesitarían espesores elevados para resistir los enormes flujos de calor generados por el combustible de prueba. (Figura 2.2)

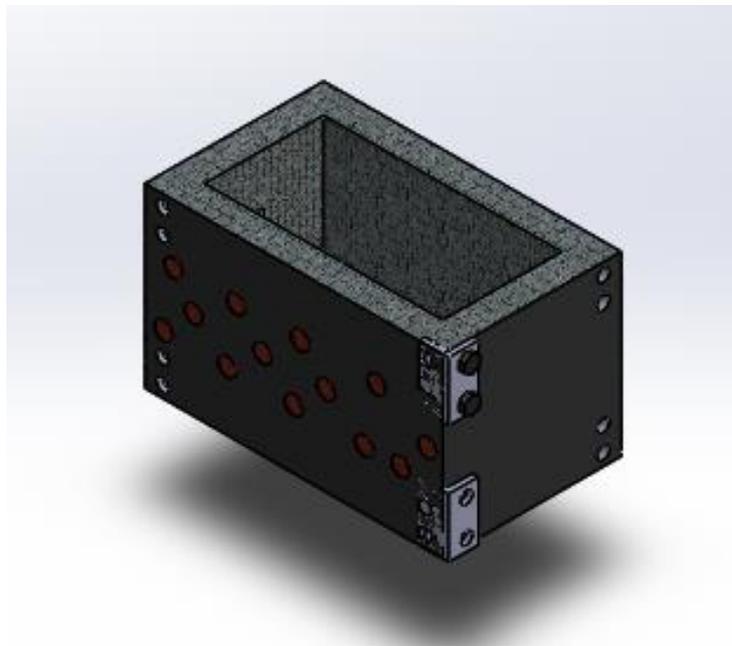


Figura 2.2 Diseño a base concreto (hormigón)

Fuente: Elaboración propia

Como mayor inconveniente se presenta la imposibilidad para su traslado, por peso y fragilidad.

2.3.3. Diseño 3

Se basa en un volumen limitado por paredes compuestas, de adentro hacia afuera de acero-fibra cerámica-acero, unidos por juntas empernadas. A priori se puede observar una disminución de material a utilizar, reducción de peso, facilidad de construcción y mantenimiento. Finalmente, para evitar un cortocircuito de la

resistencia calefactora con las paredes metálicas estas se empotrarán a una única pared de material refractario. (Figura 2.3)

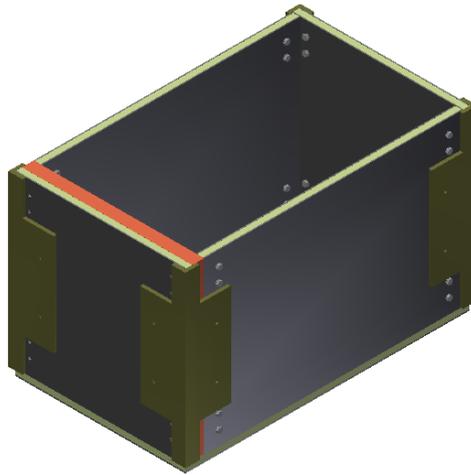


Figura 2.3 Diseño de placas compuestas empernadas

Fuente: Elaboración propia

2.4. Preselección de materiales

En la actualidad existe gran cantidad y variedad de materiales que cumplen con los requisitos para la construcción del banco de pruebas, con el fin de reducir la vasta lista de opciones se han pre-seleccionado algunos que cumplen con los requisitos de diseño. Este proceso de preselección resulta de mucha ayuda para realizar el diseño, debido a que reduce el número de cálculos de prueba. En la Tabla 2.1 se muestran los materiales pre seleccionados y su función, y de la Tabla 2.2 a la Tabla 2.5 sus características más relevantes para el diseño.

Tabla 2.1 Materiales preseleccionados y función

MATERIAL ESTRUCTURAL	MATERIAL REFRACTARIO	MATERIAL AISLANTE	RESISTENCIA ELECTRICA
Aluminio	Ladrillo refractario	Fibra de vidrio	Nicromel
Acero A36	Ladrillo rojo	Fibra cerámica	Niquelina
Acero inox. AISI 304	Concreto (hormigón)	Poliuretano	Cobre

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2 Características de los materiales estructurales preseleccionados

Material	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Punto de fusión (°C)	Densidad (Kg/m ³)	USD por Kg
Aluminio	<160	660	2700	1,73
Acero A36	250	1538	7850	0,63
Acero inox. AISI 304	310	1454	7800	5.50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3 Característica de los materiales refractarios preseleccionados

Material	Temperatura máxima de empleo (°C)	Densidad (Kg/m ³)	USD por Kg
Ladrillo refractario	>1650	2320	5,47
Ladrillo rojo	700	1600-1900	0,04
Concreto (hormigón)		220-2400	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.4 Características de los materiales aislantes preseleccionados

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Temperatura de operación
Fibra de vidrio	0,05	Hasta 800 °C
Fibra cerámica	0,0382	Hasta 1260 °C
Poliuretano	0,020	Hasta 90 °C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.5 Características de los materiales preseleccionados para la resistencia calefactora

Material	Resistividad $\frac{mm^2 \cdot ohm}{m}$	Temperatura de fusión (°C)
Nicromel	1,09	1400
Niquelina	0,44	800
Cobre	58	1085

Fuente: Elaboración propia

2.5. Selección del diseño

Se seleccionará la opción más viable en base a características no cuantificables en este nivel como facilidad de construcción, mantenimiento y peso. Los valores otorgados son una representación numérica de varias indagaciones y del criterio ingenieril del diseñador. (Tabla 2.6 y Tabla 2.7)

Los criterios de selección son:

Facilidad de construcción: Esto se refiere a que tan sencillo resulta el acoplamiento de todos los componentes

Mantenimiento: Hace referencia a la facilidad de realizar inspecciones para verificar el estado de los componentes y de realizar posibles cambios en caso de falla.

Peso: Es un indicador de la facilidad de montaje y traslado del banco

Tabla 2.6 Matriz de ponderación para la selección de diseño

	Facilidad de construcción	Mantenimiento	Peso	Total	Ponderación
Facilidad de construcción		4,00	3,00	7,00	69
Mantenimiento	0,25		2,00	2,25	22
Peso	0,33	0,50		0,83	8
TOTALES	0,58	4,50	5,00	10,08	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.7 Selección de diseño

Factores	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Facilidad de construcción	35	30	50
Mantenibilidad	4	2	20
Peso	5	4	8
Total	44	36	78

Fuente: Elaboración propia

2.6. Selección de materiales

Aquí se seleccionarán los materiales más aptos para la construcción del banco, los criterios más utilizados para este caso fueron: costo, durabilidad y facilidad de adquisición en el mercado local. (Tabla 2.8 y Tabla 2.9)

Consideraciones para el material estructural y selección

- **Costo:** Se analiza que tan económico es el material.
- **Corrosión:** El material seleccionado debe ser resistente a la corrosión.
- **Accesibilidad:** El material debe tener baja conductividad térmica.

Tabla 2.8 Matriz de ponderación

	Costo	Corrosión	Conductividad térmica	Total	Ponderación
Costo		4,00	3,00	7,00	69
Corrosión	0,25		2,00	2,25	22
Accesibilidad	0,33	0,50		0,83	8
TOTALES	0,58	4,50	5,00	10,08	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.9 Selección de material estructural

	Aluminio	Acero al carbono	Acero inoxidable
Costo	50	69	40
Corrosión	20	18	22
Accesibilidad	8	8	7
TOTAL	78	95	69

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones para el material refractario

- **Costo:** que tan económico es el material.
- **Resistencia al calor:** El material seleccionado debe ser resistente alto punto de fusión para evitar su falla al contacto con el combustible en ignición.
- **Accesibilidad:** (facilidad) lugar donde se pueda conseguir el material.

Los resultados de selección se muestran en las Tablas 2.10 y 2.11

Tabla 2.10 Matriz de ponderación para material refractario

	Costo	Resistencia al calor	Accesibilidad	Total	Ponderación
Costo		4,00	0,20	4,20	30
Resistencia al calor	0,25		4,00	4,25	31
Accesibilidad	5,00	0,20		5,20	39
TOTAL	5,25	4,20	4,25	13,6	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.11 Selección de refractario

	Ladrillo rojo	Ladrillo refractario	Concreto
Costo	30	25	20
Resistencia al calor	20	31	15
Accesibilidad	38	36	30
TOTAL	88	92	65

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones para el material resistivo calefactor

- **Costo:** que tan económico es el material.
- **Durabilidad:** que tan propenso es el material a presentar falla.
- **Eficiencia:** Capacidad de la resistencia para convertir la energía eléctrica en calor.
- **Accesibilidad:** (facilidad) lugar donde se pueda conseguir el material.

Los resultados de selección se muestran en las Tablas 2.12 y 2.13

Tabla 2.12 Matriz de ponderación para material resistivo calefactor

Ponderación de los criterios	Costo	Durabilidad	Eficiencia	Accesibilidad	Total	Ponderación
Costo		3,00	0,20	0,25	3,45	14
Durabilidad	0,33		0,25	0,25	0,83	3
Eficiencia	5,00	4,00		4	13,00	51
Accesibilidad	4,00	4,00	0,25		8,25	32
TOTALES	9,33	11,00	0,70	4,50	25,53	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.13 Selección de material resistivo calefactor

	Nicromel	Niquelina	Cobre
Costo	10	13	14
Durabilidad	2	2	3
Eficiencia	48	51	20
Accesibilidad	10	32	32
TOTAL	70	98	69

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones para el material aislante

- **Costo:** que tan económico es el material.
- **Resistencia al calor:** El material seleccionado debe soportar altas temperaturas de trabajo.
- **Accesibilidad:** (facilidad) lugar donde se pueda conseguir el material.

Los resultados de selección se muestran en las Tablas 2.14 y 2.15

Tabla 2.14 Matriz de ponderación para material aislante

Ponderación de los criterios	Costo	Resistencia al calor	Accesibilidad	Total	Ponderación
Costo		4.00	0.20	7.20	30
Resistencia al calor	0.25		0.25	0.83	4
Accesibilidad	5.00	4.00		12.00	51
TOTAL	5.58	11.00	0.78	23.70	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.15 Selección de material aislante

	Poliuretano	Fibra de Vidrio	Fibra Cerámica
Costo	15	30	20
Resistencia al calor	2	4	5
Accesibilidad	40	51	35
TOTAL	57	85	60

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones para las termopilas

Para la selección de termopilas se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Rango de temperaturas:** Temperatura máxima y mínima de trabajo.
- **Resistencia a la oxidación:** Tiempo de vida de la termopila.
- **Costo:** Que tan costoso es el material.

Los resultados de selección se muestran en las Tablas 2.16 y 2.17

Tabla 2.16 Matriz de ponderación para la selección de termopilas

Ponderación de los criterios	Temperatura máxima de operación	Resistencia a la oxidación	Costo	Total	Ponderación
Temperatura de máxima operación		5.00	4.00	12	51
Resistencia a la oxidación	4.00		0.20	7.20	30
Costo	0.25	0.25		0.83	4
TOTAL	5.58	11.00	0.78	23.70	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.17 Selección de termopila

Tipo de material	Termopila tipo J	Termopila tipo K	Termopila tipo E
Temperatura de máxima operación	30	49	37
Resistencia a la oxidación	17	23	12
Costo	3	4	3
Total	50	76	52

Fuente: Elaboración propia

2.7. Cálculos de diseño

A continuación, se presenta un diseño de forma más detallado de la opción seleccionada, con el fin de identificar los componentes del banco de pruebas. (Figura 2.4)

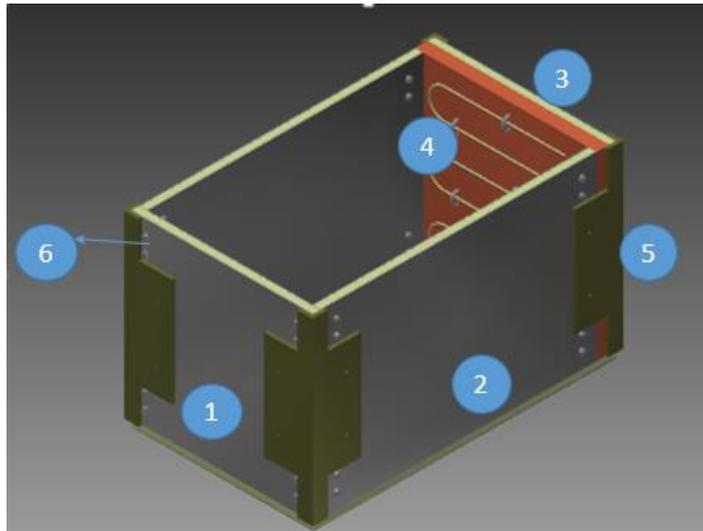


Figura 2.4 Partes del banco de pruebas.

Fuente: Elaboración propia

Parte 1.- Pared compuesta acero-fibra-acero de 300mmx300mm

Parte 2.- Pared compuesta acero-fibra-acero de 300mmx500mm

Parte 3.- Pared compuesta de acero-fibra-refractario de 300mmx300mm

Parte 4.- Resistencia calefactora (Alambre de níquelina)

Parte 5.- Ángulos de conectores

Parte 6.- Pernos

2.7.1. Diseño de las paredes compuestas

Para el cálculo de espesores resulta factible modelar la pared compuesta por el método de resistencias térmicas en serie como se muestra a continuación en la Figura 2.5

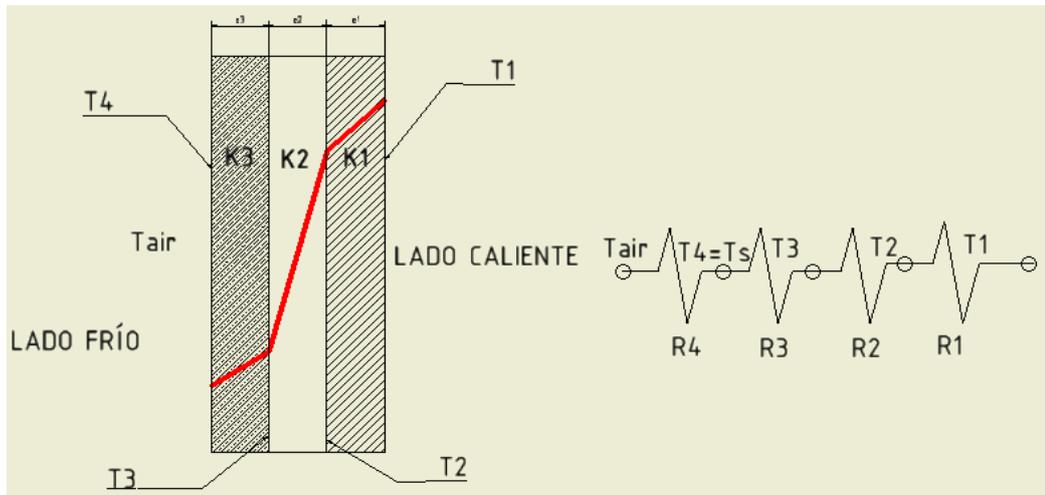


Figura 2.5 Modelo de resistencias en serie para la pared compuesta acero-fibra-acero

Fuente: Elaboración propia

$$R_n = \frac{e_n}{K_n A} \quad (1)$$

Donde

$n = 1, 2$ y 3 De acuerdo al material

R : Resistencia de conducción

e : Espesor

K : Conductividad

A : Área

De la figura 2.5 se obtiene que

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_4}{R_{tot}} \quad (2)$$

Remplazando la ecuación (2) en la ecuación (1) se obtiene

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{A} \left(\frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{e_1}{K_1} \right)} \quad (3)$$

Depreciando la transferencia de calor por radiación en la superficie del banco de pruebas y realizando un balance de energía se obtiene.

$$Q_{conv} = Q_{cond} \quad (4)$$

También

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_{air}) \quad (5)$$

Donde

\bar{h} : Coeficiente de convección promedio

A : Área de la superficie

ΔT : Diferencia de temperaturas $T_{superficie} - T_{\infty}$

Coeficiente de convección y flujo de calor

Como se puede determinar con las ecuaciones dadas, para calcular los espesores de cada capa, es necesario determinar el coeficiente de convección y el flujo de calor a través de cada pared compuesta (ver Figura 2.6).

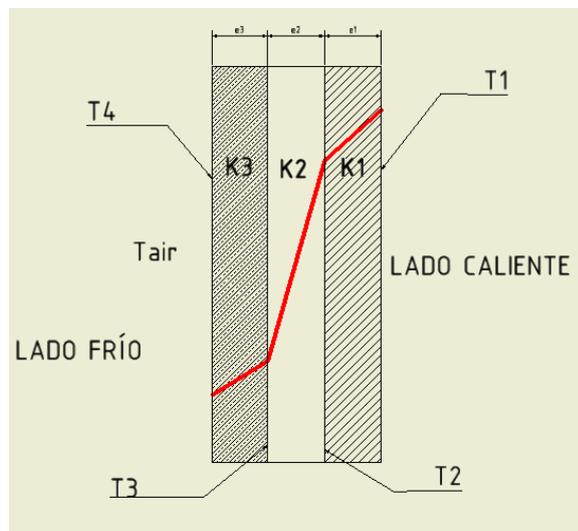


Figura 2.6 Esquematización de la caída de temperatura a través de la pared compuesta.

Fuente: Elaboración propia

Entonces se establecen las condiciones de frontera.

$$T_s = T_4 = 40^{\circ}C$$

$$T_1 = 500^{\circ}C$$

$$T_{air} = T_{\infty} = 27^{\circ}C$$

Basta evaluar estos valores con detenimiento para afirmar que todas las paredes tendrán las mismas condiciones de frontera.

El coeficiente de convección se puede despejar de la ecuación 6.

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{K_{air}} \quad (6)$$

Donde

\overline{Nu}_L : Número Nusselt

\bar{h} : Coeficiente de convección promedio

L : Longitud característica (altura del banco de pruebas)

K_{air} : Conductividad de la película de aire en contacto con la placa

También

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \overline{Ra}_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (7)$$

valida para todo intervalo de Ra_L

Donde

\overline{Ra} : Número Rayleigh

Pr : Número Prandlt

Utilizando la correlación empírica para \overline{Ra}_L en una placa vertical

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\gamma\alpha} \quad (8)$$

Donde

g : Gravedad

β : Coeficiente de expansión volumétrica

T_s : Temperatura superficial

T_∞ : Temperatura ambiente

γ : Viscosidad cinemática

α : Difusividad térmica

L : Longitud característica

Las propiedades del aire circundante a las paredes del banco se asumen constantes y con una temperatura de film T_f .

$$T_f = (T_\infty + T_s) \frac{1}{2} \quad (9)$$

Reemplazando los valores de temperatura se obtiene:

$$T_f = \frac{27^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C}}{2} = 33,5^\circ\text{C} = 300\text{K}$$

Propiedades del aire a $T_f = 300\text{K}$

$$\gamma = 15,89 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr = 0,707$$

$$\rho = 1,1614 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$C_p = 1,007 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * \text{K}}$$

$$\mu = 184,6 \times 10^{-7} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$K_{air} = 26,3 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$$

$$\alpha = 22,5 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Reemplazando los valores en la correlación de Ra

$$Ra_L = \frac{(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) (\frac{1}{300\text{K}}) (40^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}) (0,4\text{m})^3}{(15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) (22,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})}$$

$$Ra_L = 7,57 \times 10^7 < 10^9 \text{ flujo laminar}$$

De igual manera reemplazando los valores en la ecuación (7)

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(7,57 \times 10^7)^{1/6}}{\left[1 + (0,492/0,707)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$\overline{Nu}_L = 56,18$$

Despejando \bar{h} de la ecuación (6) y reemplazando se obtiene

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L K_{air}}{L} \quad (10)$$

$$\bar{h} = \frac{56,18 * 26,3 \times 10^{-3} \frac{W}{mK}}{0,3m}$$

$$\bar{h} = 5,37 W/m^2K$$

Para la pared compuesta de 0,3mm x 0,5mm

$$Q_{conv} = 5,37 \frac{W}{m^2K} (0,3 \times 0,5)m^2 (40^\circ C - 27^\circ C)$$

$$Q_{conv} = 252,89 W$$

Espesores para la pared compuesta acero-fibra cerámica-acero de 0,5 m x 0,3m.

Despejando y reemplazando el valor de Q_{conv} en Q_{cond} en la ecuación de espesores

$$\frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{e_1}{K_1} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{Q_{cond}}{A}} = \frac{500^\circ C - 40^\circ C}{\frac{252,89W}{(0,5 * 0,3)m^2}} = 0,273 \frac{m^2K}{W}$$

Debido que las placas internas y externas son del mismo material (acero A36) y su función es netamente estructural asumo el mismo espesor, entonces: $\frac{e_1}{K_1} = \frac{e_3}{K_3}$

Finalmente se obtiene

$$2 \frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} = 0,273 \frac{m^2K}{W} \quad (11)$$

Donde:

K_3 : Conductividad térmica del acero (52,5 w/mK)

K_2 : Conductividad térmica de la fibra cerámica (0,0382 w/mK)

Despejando e_2 y reemplazando K_2 y K_2 se obtiene:

$$e_2 = 0,038 \frac{W}{mK} * \left(0,273 \frac{m^2K}{W} - 2e_3 \frac{m^2K}{W} \right)$$

Se muestran los valores de e_2 para varios espesores de planchas de acero e_1 disponibles en el mercado local (ver Tabla 2.18).

Tabla 2.18 Espesores de la pared compuesta

e_1 (m)	e_2 (m)
0,001	0,010
0,002	0,010
0,003	0,010
0,004	0,010
0,005	0,010

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar el espesor de fibra e_2 no presenta variación aparente al variar el espesor de la capa de acero e_1 , motivo por el cual se selecciona la segunda opción.

Espesores para la pared compuesta acero-fibra cerámica-acero de dimensiones 0,3 m x 0,3 m

Siguiendo el mismo procedimiento que la pared anterior se obtiene:

$$Q_{conv} = 5,37 \frac{W}{m^2K} (0,3 \times 0,3) m^2 (40^\circ C - 27^\circ C) = 151,73 W$$

$$\frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{e_1}{K_1} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{Q_{cond}}{A}} = \frac{500^\circ C - 40^\circ C}{\frac{151,73 W}{(0,3 * 0,3) m^2}} = 0,273 \frac{m^2 K}{W}$$

$$e_2 = 0,038 \frac{W}{mK} * \left(0,273 \frac{m^2 K}{W} - 2e_3 \frac{m^2 K}{W} \right)$$

La última ecuación resulta la misma que la ecuación 9, por lo que se concluye que la relación de espesores es la misma que la de la pared de 0,3mx03m.

Espesores para la pared compuesta acero-fibra-ladrillo de dimensiones 0,3 m x 0,5m

El procedimiento de diseño es muy similar al mostrado anteriormente

$$Q_{conv} = 5,37 \frac{W}{m^2K} (0,3 \times 0,3)m^2(40^\circ C - 27^\circ C) = 151,73 W$$

$$\frac{e_3}{K_3} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{e_1}{K_1} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{Q_{cond}}{A}} = \frac{500^\circ C - 40^\circ C}{\frac{151,73W}{(0,3 * 0,3)m^2}} = 0,273 \frac{m^2K}{W}$$

$$e_2 = K_2 \left(0,273 \frac{m^2K}{W} - \frac{e_1}{K_1} - \frac{e_3}{K_3} \right)$$

Donde

K_1 : Conductividad térmica del ladrillo refractario (0,72 W/mK)

K_2 : Conductividad térmica de la fibra cerámica

K_3 : Conductividad térmica del acero

El valor de e_1 es igual a 2,1cm, debido a que este es el espesor de los ladrillos refractarios encontrados en el mercado local y $e_3=2$ mm (espesor de la placa de acero)

Reemplazando los valores de K_1 , K_2 , K_3 , e_2 , y e_1 se obtiene

$$e_2 = 0,0093m \cong 10mm$$

2.7.2. Unión de los materiales

Debido a que no existe un adhesivo especial para unir la fibra cerámica y acero se ha optado por uniones empernadas para mantener juntas las capas de material.

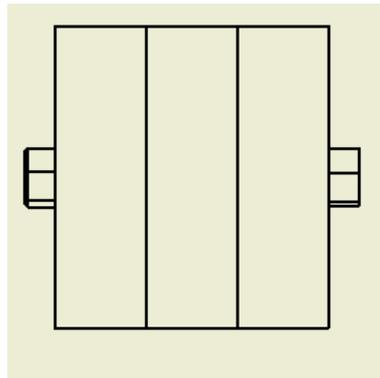


Figura 2.7 Unión de material externo, interno y aislante

Fuente: Elaboración propia

Diseño de junta empernada

Se pre-selecciona un perno M5 clase 4,6 cuyas características se muestran en la tabla 2.19.

Tabla 2.19 Característica del perno pre-seleccionado

Resistencia mínima de prueba (S_p)	225 (MPa)
Resistencia a la fluencia mínima	240 (MPa)
Resistencia a la tensión mínima	400 (MPa)
Material	Acero bajo-medio carbono
Área de trabajo (A_t)	14,18 mm ²
Paso	0,8

Fuente: Elaboración propia

Esfuerzo en el perno (σ)

$$\sigma = \frac{F_{total}}{A_t} \quad (12)$$

Donde

F_{total} : Fuerza total que resiste el perno

A_t : Área de trabajo del perno

Si asumimos que el perno no se dilata la fuerza total que resiste el perno, está dada por la fuerza de la precarga y la fuerza de tensión originada por la dilatación de los espesores de las placas y que provoca un estiramiento en el perno.

$$F_{total} = F_i + F_H \quad (13)$$

F_{total} : Fuerza neta sobre el perno

F_i : Fuerza de precarga

F_H : Fuerza por estiramiento del perno

Calculo de fuerza de pre-carga

$$F_i = 0,75F_p \quad (14)$$

Donde

$$F_p = S_p A_t \quad (15)$$

Y

S_p : Resistencia mínima de prueba

A_t : Área de trabajo

Tomando los datos de la tabla 2.19 y reemplazando estos en la ecuación (14).

$$F_i = 0,75(225MPa)(14,18mm^2) = 2394,88 N$$

Calculo de fuerza originada por el estiramiento

Por ley de Hooke

$$F_H = K\Delta x \quad (16)$$

Donde

$$\Delta x = \Delta L_{perno} \text{ y } K = \frac{A_t E}{L_o} \quad (17)$$

Reemplazando Δx y la ecuación (17) en la ecuación (16) se obtiene:

$$F_H = \frac{A_t E}{L_o} \Delta L_{perno} \quad (18)$$

E: es el módulo de Young del material del perno ($20 \times 10^{10} \text{ N/mm}^2$)

Para hallar la deformación longitudinal o dilatación del espesor las placas de acero

$$\Delta L_n = L_{on} \alpha_n \Delta T_n = e_n \alpha_n \Delta T_n \quad (19)$$

Donde $n=1, 2 \text{ y } 3$

$L=e$: Longitud inicial o espesor inicial

α : Coeficiente de dilatación lineal $\alpha_1 = \alpha_3 = 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $\alpha_2 \approx 0$

$$\Delta T_1 = T_1 - T_o$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_o$$

$$\Delta T_3 = T_3 - T_o$$

Donde

ΔT : Diferencia de temperatura $T_{final} - T_{inicial}$

$T_o = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$: Temperatura ambiente estándar

$T_1 = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$: Temperatura de la placa de acero interna

$T_2 = \frac{500 \text{ } ^\circ\text{C} - 40 \text{ } ^\circ\text{C}}{2} = 203 \text{ } ^\circ\text{C}$: Temperatura promedio de la capa de fibra cerámica

$T_3 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$: Temperatura de la placa de acero externa

Reemplazando los valores de temperatura se obtiene:

$$\Delta T_1 = 500 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 473 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 203 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 176 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = 40 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta L_1 = 2 \text{ mm}(11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(473 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,010406 \text{ mm}$$

$$\Delta L_2 = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta L_3 = 2 \text{ mm}(11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(13 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,000286 \text{ mm}$$

$$\Delta L_{perno} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3$$

$$\Delta L_{perno} = 0,013266 \text{ mm}$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (18) se obtiene:

$$F_H = \frac{\left(14,18 \text{ mm}^2 * \frac{1 \text{ m}^2}{1000000 \text{ mm}^2}\right) \left(20 * \frac{10^{10} \text{ N}}{\text{m}^2}\right) (0,0133 * 10^{-3} \text{ m})}{74 * 10^{-3} \text{ m}}$$

$$F_H = 508,41 \text{ N}$$

y

$$F_{total} = 2394,88 \text{ N} + 508,41 \text{ N}$$

$$F_{total} = 2901,29 \text{ N}$$

De la ecuación (12) se obtiene:

$$\sigma = \frac{2901,29 \text{ N}}{14,18 \text{ mm}^2 * \frac{1 \text{ m}}{1000000 \text{ mm}^2}}$$

$$\sigma = 204,60 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad del perno

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \tag{20}$$

Donde

S_y : Límite de fluencia

σ : Esfuerzo en el perno

$$\eta = \frac{240 \text{ MPa}}{204,60 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 1,2$$

2.7.3. Diseño de ángulos conectores

Para unir las paredes a manera de caja, es necesario el uso de ángulos metálicos que permitan el acople. La figura 2.8 muestra las dos paredes adyacentes y el ángulo trabajando en conjunto, como se puede observar este último se deformará por la diferencia de dilatación de las placas.

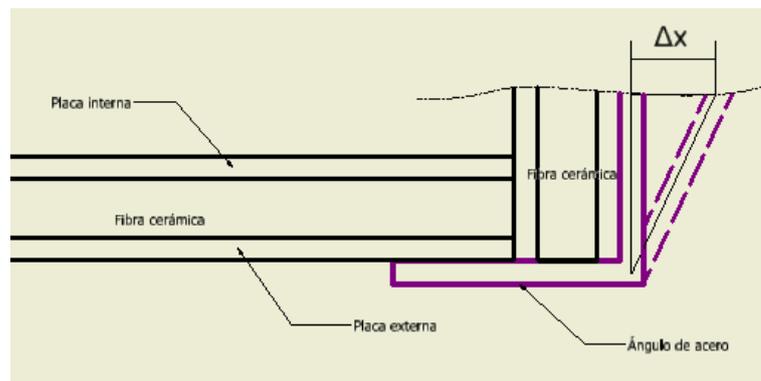


Figura 2.8 Deformación del ángulo conector debido a la diferencia de dilatación de las placas de acero

Fuente: Elaboración propia

La placa interna se dilatará mucho más que la placa externa, generando una deformación angular en el conector, por lo que resulta imperativo calcular un espesor adecuado para que este no falle.

Se asume el ángulo como viga de extremos empotrado y en voladizo

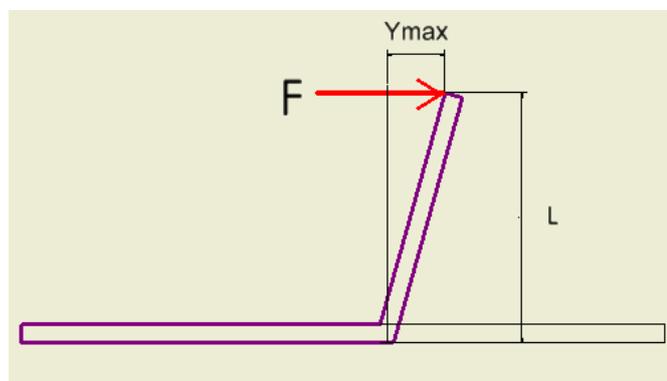


Figura 2.9 Ángulo conector como viga en voladizo

Fuente: Elaboración propia

$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad (21)$$

Donde:

σ : Esfuerzo de fluencia máximo en la viga

M : Momento flector máximo

C : Distancia del eje neutro a los extremos

I : Momento de inercia del área trasversal

Y

$$M = FL \quad (22)$$

F : Fuerza aplicada

L : Distancia del empotramiento hasta la aplicación de la fuerza

Se tiene que:

$$Y_{max} = \frac{L^3}{3EI} F \quad (23)$$

Donde:

Y_{max} : Deformación máxima = Δx

E : Módulo de Young

Despejando F de la ecuación (23)

$$F = 3 \frac{Y_{max}EI}{L^3} \quad (24)$$

Reemplazando la ecuación (23) en la ecuación (22) se obtiene:

$$M = 3 \frac{Y_{max}EI}{L^2} \quad (25)$$

Reemplazando la ecuación (25) en la ecuación (21) y despejando C se obtiene

$$C = \frac{1}{3} \frac{\sigma L^2}{Y_{max} E} \quad (26)$$

Para calcular la deformación angular o Y_{max} , se utiliza:

$$\Delta x = (\Delta L_{int} - \Delta L_{ext})/2 \quad (27)$$

$$\Delta L_{int} = L_{int} \alpha_{acero} \Delta T_1$$

$$\Delta L_{ext} = L_{ext} \alpha_{acero} \Delta T_3$$

$$\Delta L_{int} = (0,5m)(11 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(473^\circ\text{C}) = 0,002602m$$

$$\Delta L_{ext} = (0,5m)(11 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(13^\circ\text{C}) = 0,000075m$$

$$\Delta x = \frac{(0,002602 - 0,000075)m}{2} = 0,0013m$$

Para el cálculo del esfuerzo máximo en el ángulo (σ)

$$\sigma = \frac{S_y}{\eta} \quad (28)$$

Donde:

S_y : Esfuerzo de fluencia 240MPa

η : Factor de seguridad 1,5

Reemplazando estos valores en la ecuación (28) se obtiene:

$$\sigma = \frac{240MPa}{1,5} = 160MPa$$

$$C = \frac{1}{3} \frac{(160000000N/m^2)(0,074m)^2}{(0,0013m)(20 * 10^{10}N/m^2)} = 2,8mm$$

Entonces el espesor del ángulo es

$$e = 2C$$

$$e = 5,6 \text{ mm}$$

2.7.4. Cálculos de corriente

A continuación, se procede a realizar los cálculos respectivos para empezar la ignición, los valores de interés son los siguientes:

- Calor necesario para elevar la temperatura del carbón hasta alcanzar la ignición
- Masa y volumen de carbón a ser encendido por contacto con la resistencia
- Potencia eléctrica necesaria para la ignición
- Resistividad y diámetro de la Niquelina

Para realizar los cálculos se utilizarán las propiedades del carbón por ser uno de los combustibles más críticos (requiere mayor temperatura para alcanzar la ignición), así el calor necesario para elevar la temperatura del combustible hasta el punto de ignición es:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (29)$$

Donde:

m : Masa de la primera capa de carbón

C_p : Calor específico del carbón $1,26 \frac{KJ}{KgK}$

ΔT : Variación de temperatura $T_{ignición} - T_{inicial}$

Volumen de carbón a encender

Para iniciar la combustión del material dentro del banco de pruebas, primero deberá de encenderse la primera capa de carbón que está en contacto con la resistencia eléctrica.

Se asume un espesor de capa igual a 3cm, obteniéndose el siguiente volumen

$$V = 0,03m * 0,3m * 0,3m$$

$$V = 0,0027 m^3$$

Masa de la primera capa de carbón

$$m = \rho V \quad (30)$$

Donde:

ρ : Densidad del carbón $418 \frac{Kg}{m^3}$

$$m = 0,0027 m^3 * 418 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m = 1,1286 Kg$$

$$\Delta T = 500^\circ C - 27^\circ C = 473^\circ C$$

Reemplazando estos valores en (29)

$$Q = 1,1286 Kg * 1,26 \frac{KJ}{KgK} * 473^\circ C$$

$$Q = 672,62 KJ$$

Potencia requerida

Si se asume que todo el calor generado por la resistencia calefactora es absorbido por el carbón

$$Pot = \frac{Q}{t} \tag{31}$$

Donde

t : Tiempo de encendido

Considerando un tiempo de encendido de la capa de 20 min, entonces se obtiene

$$Pot = \frac{672,62 KJ}{20min * \frac{60seg}{1min}} = 0,56 Kwatts$$

Asimismo, para hallar el valor de longitud de alambre (L) y la resistencia eléctrica (R) se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$R = \frac{V^2}{Pot} \tag{32}$$

Donde:

V: Voltaje

$$L = \frac{\frac{\pi}{4} R \varnothing^2}{\varphi} \quad (33)$$

Donde:

φ : Resistividad del alambre $\frac{0,44mm^2 ohm}{m}$ (niquelina)

\varnothing : Diámetro del alambre 0,5106 mm, esta dimensión está disponible en el mercado

En la Tabla 2.20 se muestra los resultados de resistencia, longitud y corriente para diferentes voltajes.

Tabla 2.20 Límites de longitud y corriente para la ignición

Pot (watts)	Voltaje (voltios)	R (ohm)	longitud (m)	corriente (A)
560	110	21,60	10,06	5,09
560	100	17,85	8,31	5,60
560	90	14,46	6,73	6,22
560	80	11,42	5,32	7,00
560	70	8,75	4,07	8,00
560	60	6,42	2,99	9,33
560	50	4,46	2,08	11,20
560	40	2,85	1,33	14,00
560	30	1,60	0,75	18,66
560	20	0,71	0,33	28,00
560	10	0,17	0,08	56,00

Fuente: Elaboración propia

Para el alambre se selecciona la longitud de 6.73m por ser considerada razonable, además de que genera un valor de corriente relativamente bajo.

2.8. Detalles de las partes

En una de las paredes 30x50mm del banco de pruebas se realizarán perforaciones de 15mm de diámetro que servirán como guía de los ductos que contendrán a las termopilas, como se muestra en la Figura 2.10

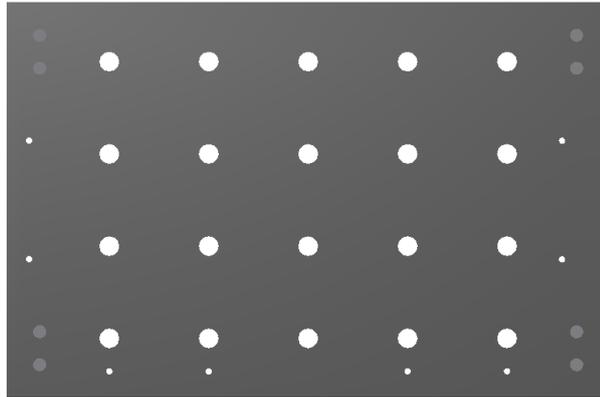


Figura 2.10 Pared compuesta con agujeros para insertar termopilas

Fuente: Elaboración propia

La ubicación de cada agujero tanto para los ductos como para los pernos, se detallan en el plano 1 que se encuentra adjunto en Apéndice A.

Los ductos serán de acero y tendrán un diámetro exterior de 15mm y varias longitudes 5 cm, 10cm, 15 cm, 20cm y 25 cm, con el fin de conseguir tomas de datos en diferentes ubicaciones dentro del banco de pruebas

La pared que servirá de tapa del banco de pruebas tendrá un agujero rectangular que servirá como una entrada para la ventilación en pruebas con flujo de aire forzado.

Todos los detalles de las partes del banco de pruebas se muestran detalladamente en el Apéndice A.

2.9. Diseño del sistema de adquisición de datos

Las temperaturas alcanzadas en el banco de prueba bordearan los 500 °C, por lo que resulta necesario seleccionar un tipo de termopila adecuada. Con la configuración de un sistema adecuado y con un software (Matlab) se podrá hacer la adquisición de datos.

Sistema de adquisición de datos

Debido a que el termopar provee una señal de voltaje en el orden de los milivolts el ADC (convertidor de señal analógica digital) de la tarjeta Arduino no podría realizar una lectura adecuada de los datos. La resolución del ADC Arduino es de 1024 niveles en un rango de voltajes de 0 a 5 Voltios, es decir que:

$$\frac{5V}{1024 \text{ Niveles}} = 0.0048 \frac{V}{\text{nivel}}$$

Es decir que en cada aumento de 0.0048 V el ADC tendrá una lectura de un nivel diferente ya sea que el voltaje aumente o se reduzca. En cuanto a la señal que proporciona el termopar se tiene una variación de 40 µV por cada grado centígrado, es decir 0.000040 V, en este caso el termopar puede tener una variación de temperatura muy importante, pero la variación de temperatura al ser muy pequeña causa que el ADC lea solo unos pocos cambios de niveles. Por lo tanto, la señal del termopar debe amplificarse para que tenga un nivel de voltaje que permita al ADC realizar una lectura correcta.

Al ser una señal de milivoltios que varía en el orden de los µV se requiere una ganancia alta, y al ser usada en un sistema de adquisición de datos, la señal debe ser lo más alejada del ruido. Un amplificador e instrumentación resulta ser idóneo para este caso, debido a sus características, tales como: alta impedancia de entrada y alto rechazo al modo común.

El amplificador disponible en el mercado, económico y encapsulado es el AD620.

El esquema general se muestra a continuación en la figura 2.11.

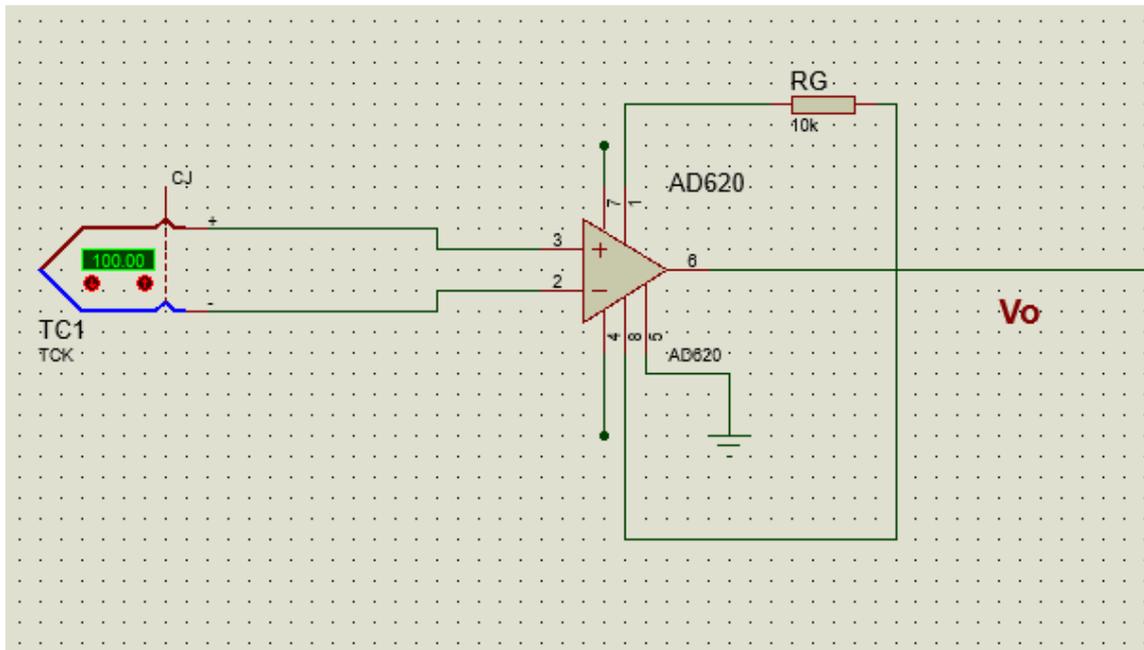


Figura 2.11 Esquema general del amplificador AD620

Fuente: Elaboración propia

La ganancia se configura según la formula dada por la hoja de especificaciones del AD620:

$$G = \frac{49.4 \text{ K}\Omega}{R_g - 1}$$

Donde G es la ganancia y Rg es la resistencia que configura la ganancia del amplificador usado.

La ganancia se calcula tomando un rango de temperaturas a medir:

$$\text{Rango temperatura} = [0 - 600]^\circ\text{C}$$

$$\text{Rango voltaje del termopar} = [0 - 24.902]\text{mV}$$

Así, como la temperatura máxima a medir sería de 600 °C el voltaje correspondiente a esa temperatura debería ser 5 volts máximo, que es el máximo valor que puede leer el ADC.

$$(24.902 \text{ mV})G = 5000 \text{ mV}$$

$$G = 200.78$$

Reemplazando la ganancia en la formula el A620 se determina la resistencia necesaria para obtener tal ganancia.

$$R_g = \frac{49.4 \text{ K}\Omega}{200.78 - 1}$$

$$R_g = 247 \Omega$$

Como en el mercado no se encuentra una resistencia de 247 Ohms exactos, se emplea un potenciómetro, el cual puede manipularse hasta obtener los valores de resistencia deseados.

Para adecuar la señal de salida, obtener un mejor resultado ante el ruido, se ha decidido añadir una etapa de filtrado, usando un filtro pasa bajo, ya que el ruido es una señal de alta frecuencia, así se bloquea el paso de la señal de ruido. El filtro está constituido por un circuito RC en serie como se muestra en la Figura 2.12

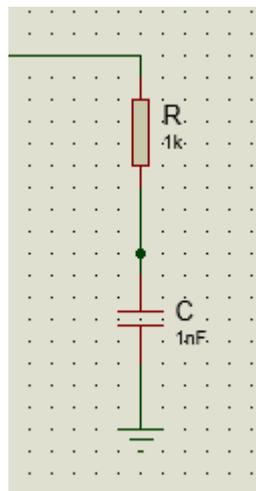


Figura 2.12 Etapa de filtrado

Fuente: Elaboración propia

La frecuencia de corte del filtro está dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Especificando a la señal de ruido en un valor e 1500Hz, se puede establecer los valores de los componentes del filtro, capacitor y resistor. Como el resistor es más fácil encontrar, se emplea un calor de capacitancia conocido y comercial, 0,1 μF para definir el valor de la resistencia.

$$1500 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi R(0,1\mu\text{F})}$$

Resulta:

$$R = 1062 \Omega$$

El valor comercial más próximo es de 1000 Ω

La Figura 2.13 muestra un arreglo de relés que permiten realizar una conmutación entre cuatro termopilas, para de este modo reducir el número de amplificadores usados; un amplificador por cada 4 termopares. Tres señales generadas de manera consecutiva por el Arduino permiten activar los relés de la misma manera y conmutar las señales al amplificador para tener lecturas de varios sensores.

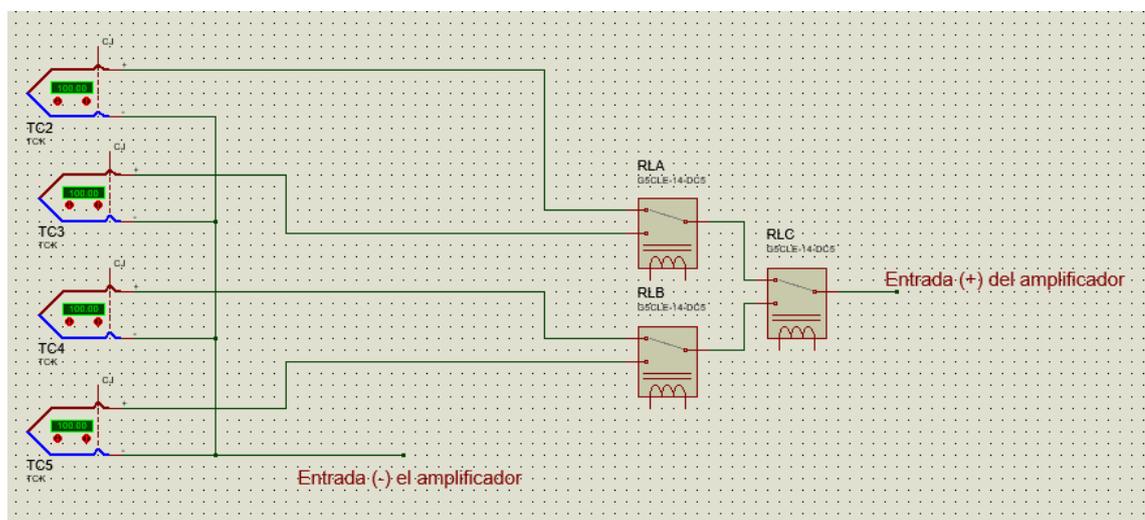


Figura 2.13 Conmutación para 4 termopilas

Fuente: Elaboración propia

El modo de enlace entre el sistema de adquisición de datos y el software, así como su programación se muestran a detalle en el Apéndice B.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1. Análisis térmico

Para calcular las temperaturas entre las placas se tiene que:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{K_1 A_1 (T_1 - T_2)}{e_1} = \frac{K_2 A_2 (T_2 - T_3)}{e_2} = \frac{K_3 A_3 (T_3 - T_4)}{e_3}$$

De aquí se obtiene

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{Q}_{cond} e_1}{K_1 A_1}$$

$$T_3 = T_4 + \frac{\dot{Q}_{cond} e_3}{K_3 A_3}$$

En la Figura 3.1, y 3.2 se muestran las caídas de temperatura a través de las paredes del banco de pruebas.

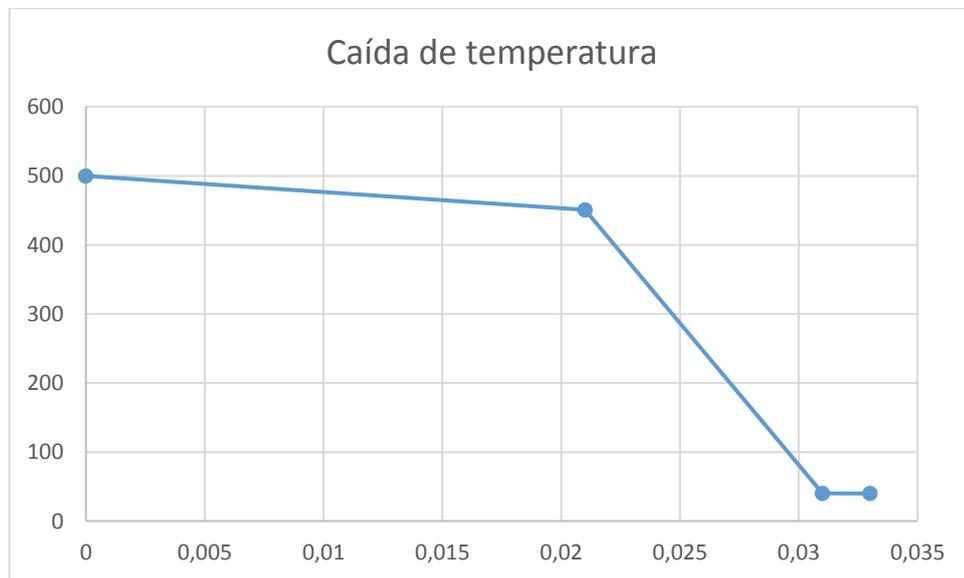


Figura 3.1 Caída de temperatura en pared compuesta (ladrillo-fibra-acero)

Fuente: Elaboración propia

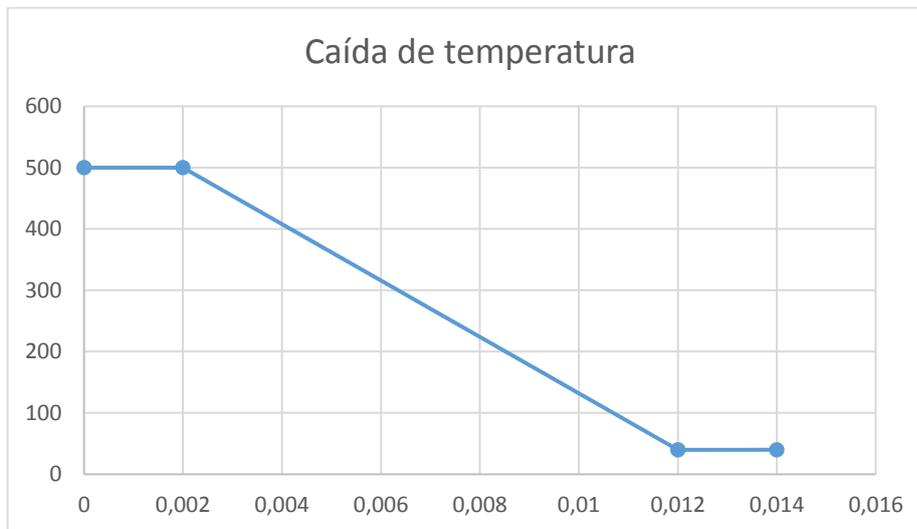


Figura 3.2 Caída de temperatura en pared (acero-fibra-acero)

Fuente: Elaboración propia

3.2. Análisis eléctrico

Con la longitud seleccionada se presenta el rango de corrientes al variar el voltaje, se puede apreciar en la Tabla 3.1, el valor máximo es muy razonable.

Tabla 3.1 Rango de corrientes al variar el voltaje

Potencia (watt)	Voltaje (V)	Resistencia (ohm)	Longitud (m)	Corriente (A)
836.54	110	14.46	6.73	7.60
691.35	100	14.46	6.73	6.91
560.00	90	14.46	6.73	6.22
442.46	80	14.46	6.73	5.53
338.76	70	14.46	6.73	4.83
248.88	60	14.46	6.73	4.14
172.83	50	14.46	6.73	3.45
110.61	40	14.46	6.73	2.76
62.22	30	14.46	6.73	2.07
27.65	20	14.46	6.73	1.38
6.91	10	14.46	6.73	0.69

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra una vista isométrica del banco de pruebas. (Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5).

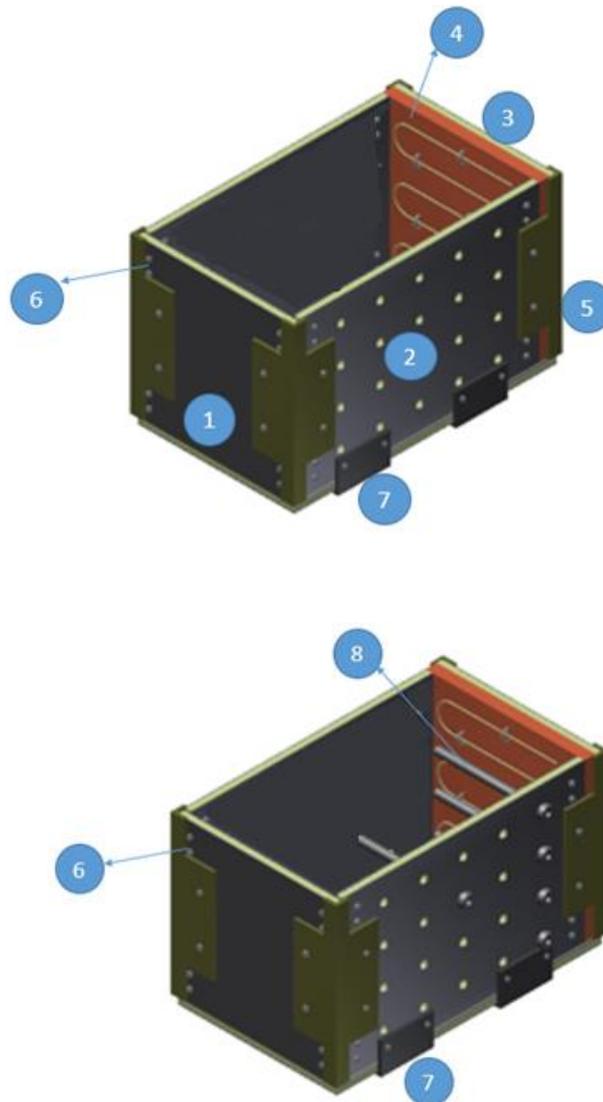


Figura 3.3 Partes del banco de pruebas

Fuente: Elaboración propia

1. Es la pared compuesta de dimensiones 0,3m x 0,3 m,
2. Es la pared compuesta de 0,3 m x 0,5 m, con perforaciones de 15mm para acoplar los tubos guías que contendrán las termopilas.
3. Es la pared de ladrillo refractario sobre la que descansará la resistencia calefactora.
4. Es la resistencia de níquelina, que iniciará la ignición del combustible

5. Ángulos de unión entre paredes compuestas que, por su diseño, deberán ser contruidos.
6. Juntas empernadas para unir las capas de material, se seleccionó este tipo de unión debido a que facilita la construcción, montaje y mantenimiento del banco
7. Ángulos de unión para la base, con más pequeños debido a que no deben obstruir los agujeros guías para los tubos que contendrán las termopilas
8. Termopilas

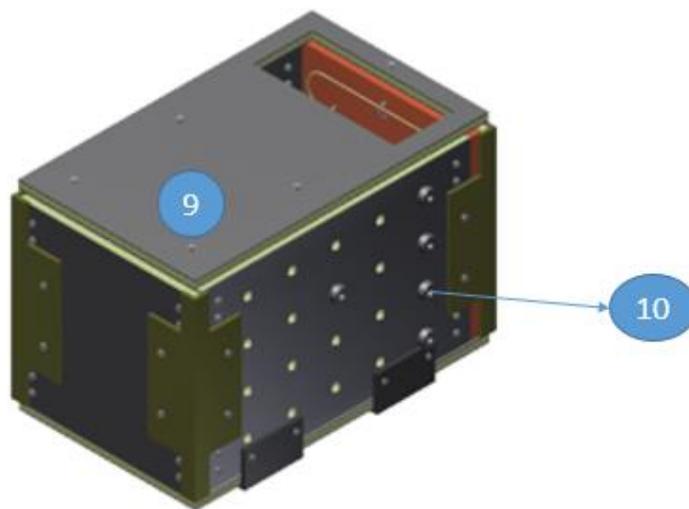


Figura 3.4 Partes del banco de pruebas

Fuente: Elaboración propia

9. Es la tapa del banco de pruebas, con un agujero rectangular cuya función es permitir la entrada de aire para ensayos con flujo forzado de aire.
10. Tuberías de acero para alojar las termopilas, tiene longitudes distintas con el fin de poder tomar datos de diferentes puntos en el interior del banco.
11. Es una pequeña tapa para cuando no se requiera en flujo forzado.

En la Figura 3.5 se muestra el diseño final del banco de pruebas.

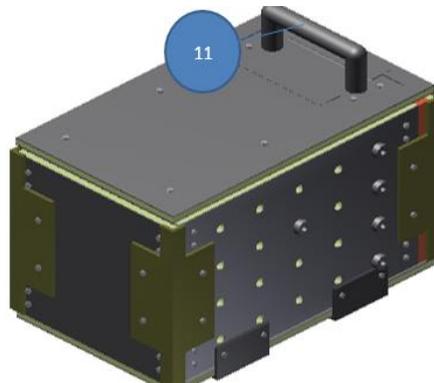


Figura 3.5 Banco de pruebas

Fuente: Elaboración propia

3.3. Análisis del sistema de control

Adquisición de datos

Para la adquisición de datos fueron necesarios los siguientes elementos y componentes detallados a continuación en la Tabla 3.1

Tabla 3.2 Materiales y componentes para el circuito de adquisición de datos

Materiales	Cantidad
Arduino Mega	1
Amplificador AD620	5
Rele	15
Transistores Tip 41	3
Potenciómetros 5k	5
Resistencias 1k	5
Capacitores 0.1 μ f	5
Diodos rectificadores	3
Borneras	20
Baquelita	1
Termocupla tipo k	20
Cable jumpers	20
Cable USB	1
Fuente	1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.6 Se muestra el circuito amplificado correspondiente, para hacer la conmutación a 4 sensores y usar un amplificador por cada 4 sensores, reduciendo de esta manera la cantidad de uso de amplificadores.

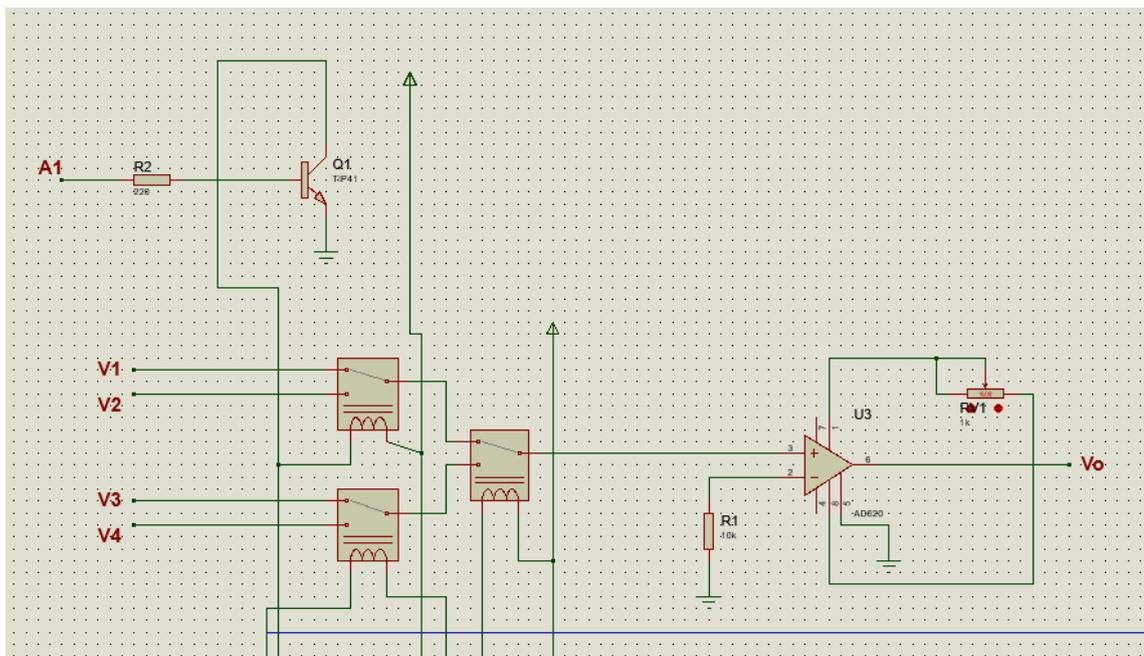


Figura 3.6 Circuito amplificado

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.7 se muestra la configuración total para la toma de datos de temperatura, para 20 termopilas usando 20 sensores y haciendo uso de 5 amplificadores de instrumentación.

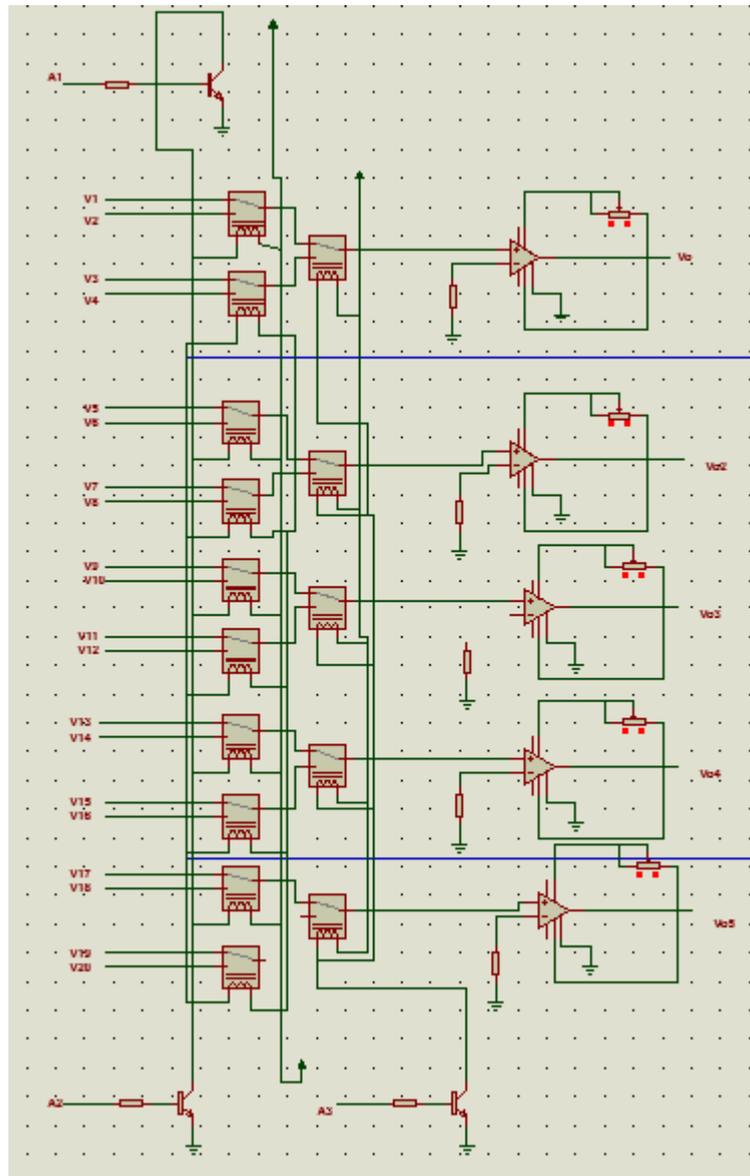


Figura 3.7 Configuración para 20 sensores de temperatura

Fuente: Elaboración propia

3.4. Información extraíble del banco de pruebas

Se ha simulado el proceso de smouldering con el fin de tener una idea del tipo de información que el banco de pruebas debe proporcionar.

Para el modelo se han hechos varias simplificaciones.

- Se ha considerado una barra continua de carbón de longitud 455 mm
- La barra se encuentra inmersa en aire en reposo a temperatura ambiente
- Se ha despreciado el efecto de re ignición del combustible.

- La velocidad de propagación tiene un valor de 25mm/h o 0,416mm/min

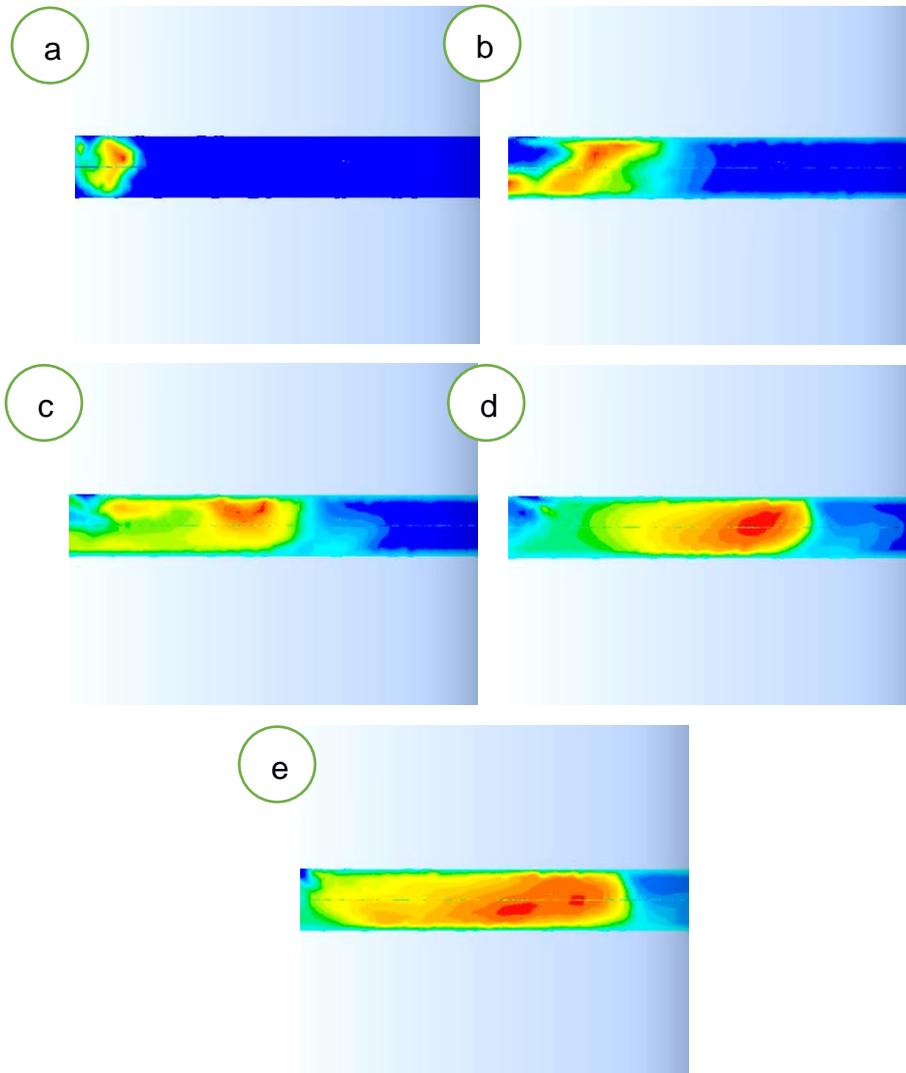


Figura 3.8 Simulación del proceso de smoldering para el carbón

Fuente: Elaboración propia

- a) proceso a $t=0$, b) proceso a $t=18$, c) proceso a $t=36$, d) proceso a $t=54$ y d) proceso a $t=72$ min

Basado en los datos de velocidad de propagación y distanciamiento de las termopilas se obtuvo que los tiempos críticos para la adquisición de datos son los siguientes: 18 min, 36 min, 54 min y 72 min

Debido a que para una misma ubicación y tiempo existen varias temperaturas distribuidas a lo largo del eje y, estas se han promediado y se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Datos de temperatura en diferentes tiempos

TEMPERATURAS (K)					
	x=0cm	x=7,5cm	x=15cm	x=22,5cm	x=30cm
t=0min	773	300	300	300	300
t=18min	635	773	400	300	300
t=36min	510	604	773	409	310
t=54min	438	500	555	773	303
t=72min	400	377	445	550	773

Fuente: Elaboración propia

La figura muestra la evolución del proceso de smoldering en los tiempos críticos, cabe recalcar que esta gráfica es válida solo para modelar una fila de termopilas.

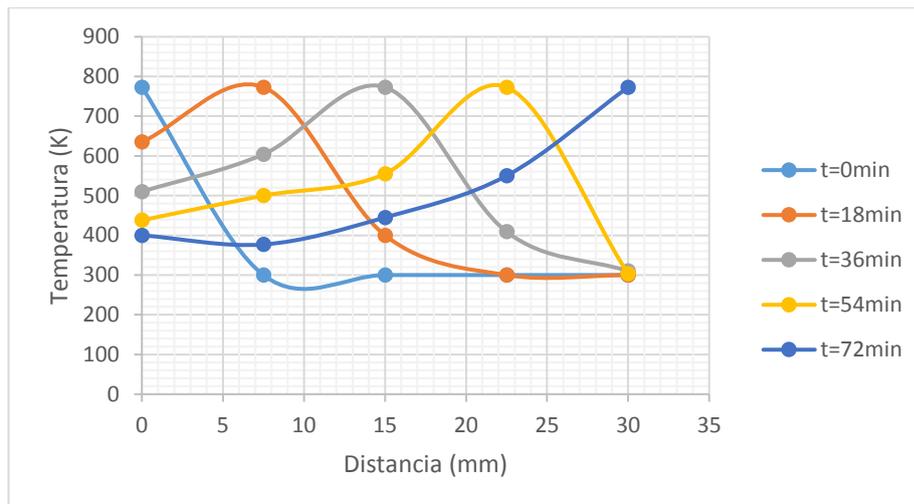


Figura 3.9 Evolución del proceso de smoldering

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar la evolución y propagación del frente de combustión a través del tiempo y las temperaturas de cada sección del banco en cada tiempo de interés. Se pueden identificar las zonas de pirolisis que son las de mayor temperatura y asimismo son identificables las zonas de carbonización.

Para un análisis más apropiado se recomienda tomar como referencia un punto cualquiera y centrar allí la atención, considerando un intervalo de tiempo de 2 horas.

Al finalizar se obtendrá entonces la evolución del punto en cada instante

Los datos obtenidos del banco de pruebas deberían tener una forma muy similar a la que se ha mostrado.

3.5. Análisis económico

Se realiza un análisis respectivo de costos, respecto a construcción del banco de pruebas, en base a los materiales y accesorios seleccionados, analizaremos también el costo de la mano de obra.

Cabe mencionar que los precios no son fijos, sino más bien referenciales debido a que pueden variar por disponibilidad y tipo de proveedor en el mercado.

3.5.1. Costos de materiales

En la siguiente tabla se detallan todos los materiales y elementos necesarios para la construcción del banco de pruebas, donde se detalla cantidad y su respectivo precio.

Tabla 3.4 Cantidad y costos de materiales

Materiales	Dimensiones	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Plancha de acero al carbono	1.22x2.44m	2	\$ 32	\$ 32
Manta cerámica	4.65 m ²	1	\$ 79.70	\$ 79.70
Alambre níquelina	7 m	1	\$ 2	\$ 14
Ladrillos refractarios	9cmx4,5cmx2,1cm	22	\$ 5.16	\$ 113.52
Saco de mortero refractario	25Kg	1	\$ 1.08	\$ 1.08
Pernos	M5x20mm	50	\$ 0.30	\$ 1.5
Pernos	M5x30mm	30	\$ 0.35	\$ 1.05
Arduino Mega	-	1	\$ 50	\$ 50
Amplificador AD620	-	5	\$ 6	\$ 30
Relé	-	15	\$ 1	\$ 15
Termopilas	-	20	\$ 5.5	\$ 110
Transistores Tip 41	-	3	\$ 0.80	\$ 2.4

Potenciómetro 5k	-	5	\$ 0.25	\$ 1.25
Resistencias 1k	-	5	\$ 0.05	\$ 0.25
Capacitores 0.1µf	-	5	\$ 0.05	\$ 0.25
Diodos rectificadores	-	3	\$ 0.10	\$ 0.30
Borneros	-	20	\$ 0.20	\$ 4.0
Baquelita	-	1	\$ 1.50	\$ 1.50
Cable jumper	-	20	\$ 0.15	\$ 3.0
Cable usb	-	1	\$ 1	\$ 1
Fuente 12V	-	1	\$ 22	\$ 22
Total				\$ 484

Fuente: Elaboración propia

Al precio de materiales se le suma el costo de diseño y mano de obra que se consideró \$ 500.

Precio del banco de pruebas: \$ 484 + \$ 500 = \$ 984

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El banco de pruebas tiene un diseño totalmente portátil, debido a que es fácil de armar y desarmar, además presenta una mayor facilidad de limpieza y mantenimiento. Este diseño nos brinda seguridad respecto a temperatura superficial ya que está completamente aislado, y logra reducir la temperatura interna de 500° a una temperatura superficial de 40°C.

Todas sus paredes son compuestas entre acero al carbono, manta cerámica y acero, a excepción de una, que posee ladrillo refractario en una de sus paredes laterales, donde está ubicado la niquelina para provocar la ignición de los combustibles.

En una de sus paredes existen agujeros, donde se colocarán ductos que contendrán las termopilas, las cuales servirán para tomar datos de temperatura a medida que el calor se propague.

Finalmente, en la parte superior hay una tapa la cual se la puede remover para que exista mayor flujo de oxígeno durante la combustión.

Uno de los inconvenientes del banco de pruebas es que si se desea implementar un sistema de flujo de aire forzado (ventilador) a lo largo de la propagación se deberá modificar una de sus caras laterales, dándole acceso a que evacue los gases producidos por la combustión latente (smoldering).

4.1. Conclusiones

- Se diseñó un banco de pruebas el cual cumple con todos los requerimientos para evaluar el proceso de smoldering,
- El diseño es capaz de otorgar información suficiente para analizar el fenómeno.
- Las paredes del banco de pruebas a construir cumplen con la función de aislar a las placas superficiales del calor generado internamente.
- También se presenta un modelo de datos a obtener mediante una simulación básica y simplificada.
- Finalmente con el análisis de costos respectivo se obtuvo un valor relativamente bajo para la construcción del banco de pruebas.
- El banco de pruebas presenta una gran facilidad para armar, trasladar y realizar mantenimiento.

4.2. Recomendaciones

- Al momento de realizar las pruebas se debe tener en cuenta que tipo de fuente que se va a usar para dar inicio a la ignición, si se usa una de menor voltaje puede tardar demasiado tiempo e incluso no darse el encendido del material.
- Tener mucho cuidado con la manipulación del circuito, mantenerlo en un lugar seguro y sin humedad.
- Se recomienda implementar un sistema de ventilación (flujo de aire forzado) para que la propagación se de en menor tiempo
- Cuando se realicen las pruebas se lo debe hacer en un lugar abierto y ventilado, ya que una vez iniciada la ignición se producirá gran cantidad de gases.
- Después de cada prueba realizar la limpieza y extracción de cenizas residuales, producto de una combustión incompleta

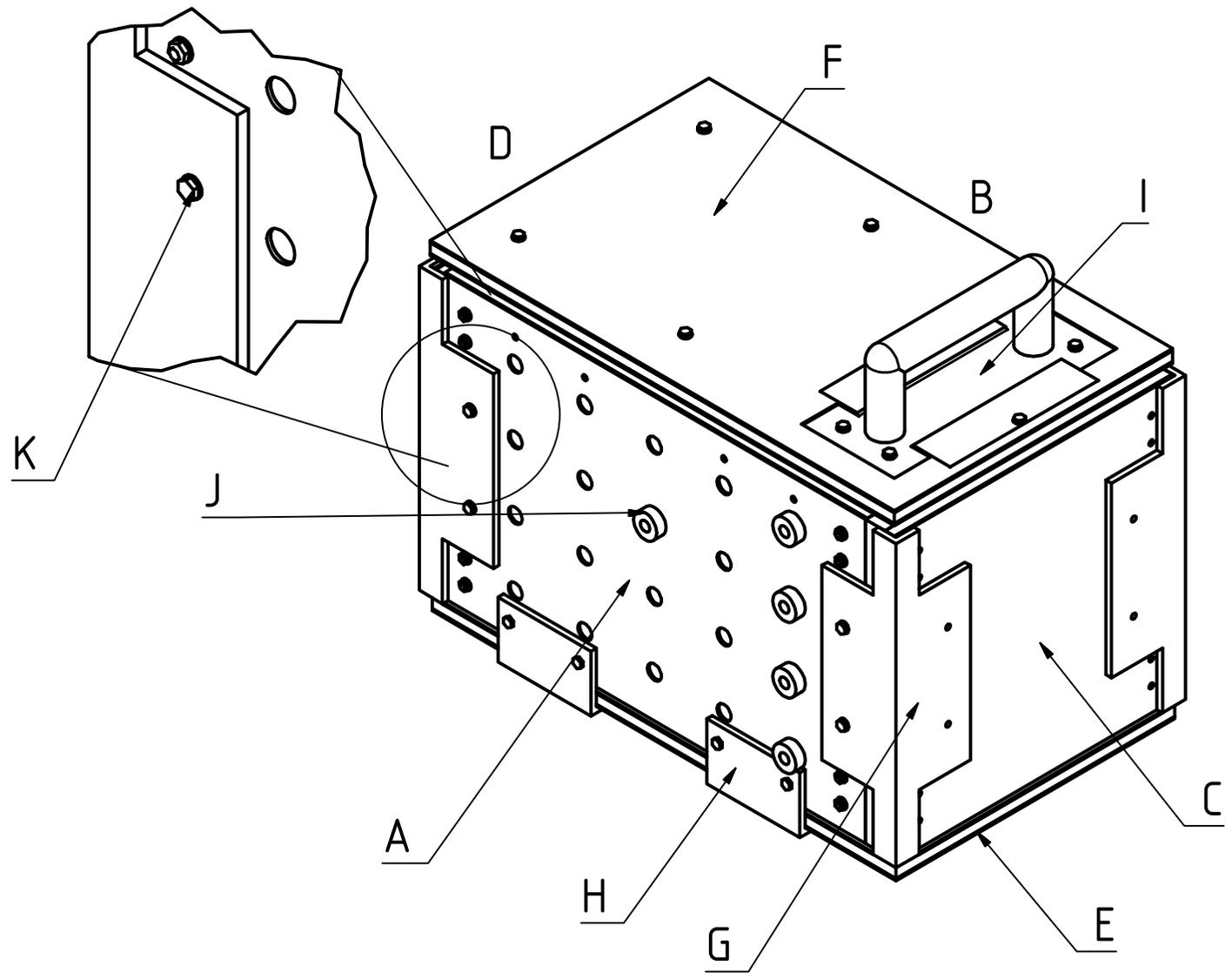
BIBLIOGRAFÍA

1. (Rein, Estudio Numerico de Combustión Latente en Flujo Directo, 2002)
2. (Rein, Smouldering Combustion Phenomena in Sciency and Tecnology , 2009)
3. Penalva Antonio Galán, Porque son peligrosos los incendios debido a Smoldering, 2015. Ciencias-Madrid.
4. F.P Incropera y D.P. Dewitt fundamentals of heat and mass transfer, 4ta edición, Jhon Wiley and songs (1990)
5. G Mulholland y T.J. Ohlemilleg Aerozol caracterizacion of a smoldering source, Aerosol sience and Tecnology. Vol 1 pag 59-71 (1982)
6. J.R. Hall, National Fire Protection Association Journal, Vol. 92, N° 1, pg 56-62, (1998).
7. T.J. Ohlemiller, Modeling of smoldering combustion propagation, Progress in Energy and Combustion Science Vol. 11 Pg 277-310, (1985).
8. J.E.J. Staggs, A theory for quasi-steady single step thermal degradation of polymers, Fire and Materials 22 (1998)
9. S.I.Stoliarov,S.Crowley,R.E.Lyon,G.T.Linteris,Predictionoftheburningrates of non-charringpolymers,CombustionandFlame156(2009)1068–1083.
10. C.Lautenberger,C.Fernandez-Pello,Generalizedpyrolysismodelforcombustible solids,FireSafetyJournal44(2009)819–839.
11. C.Lautenberger,C.Fernandez-Pello,Generalizedpyrolysismodelforcombustible solids,FireSafetyJournal44(2009)819–839.
12. T.Kashiwagi,T.J.Ohlemiller,A study of oxygen effects on flaming transient gasification of PMMA and PE. During thermal irradiation,Proceedings of the Symposium (International) onCombustion19(1982)815–823.

APÉNDICES

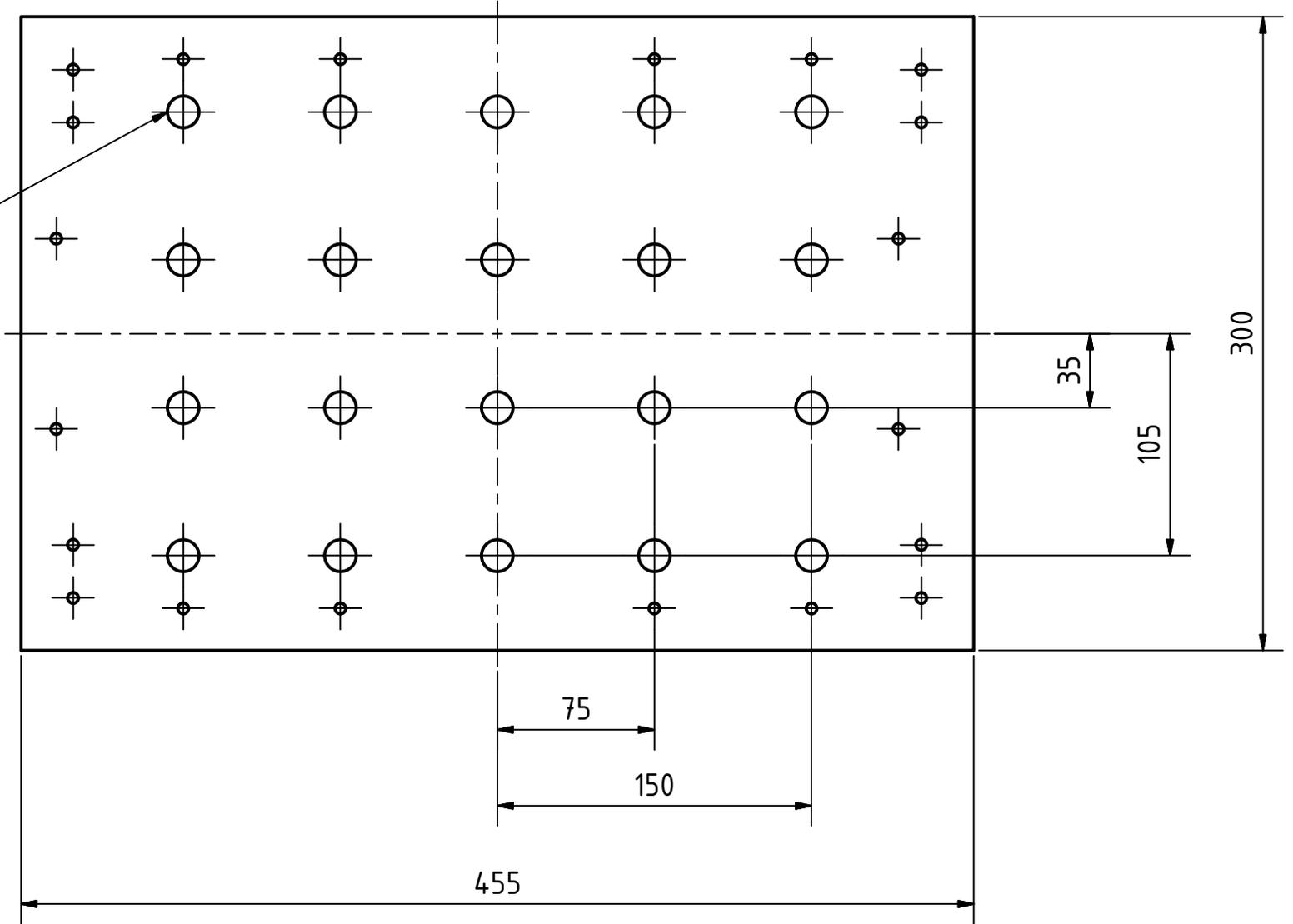
APÉNDICE A
Planos Esquemáticos

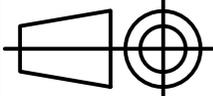
TABLE	
Column 1	Column 2
A	PARED COMPUESTA 45,5X30
B	PARED COMPUESTA 45,5X30 SIN AGUJEROS PARA TERMOPILAS
C	PARED COMPUESTA 30X30 (LADRILLO)
D	PARED COMPUESTA 30X30
E	BASE
F	TAPA GENERAL
G	ANGULOS PARA ESQUINAS
H	ANGULOS INF. Y SUP
I	TAPA
J	DUCTOS PARA TERMOPILAS
K	PERNOS M5



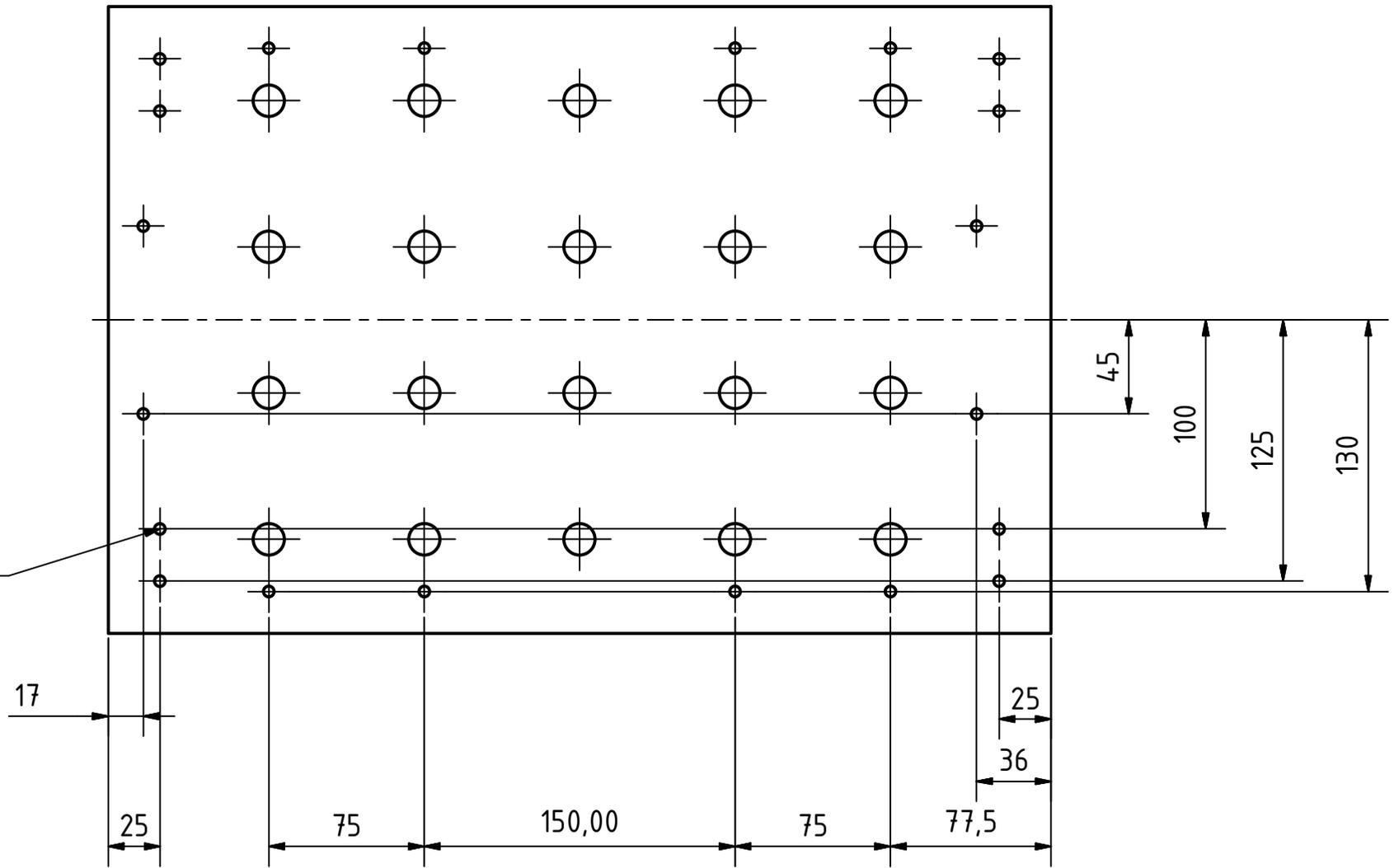
	Dibujado por:	Nombre	Fecha	E S P O L
	Dimensiones:	Jerry Panchana	14/02/2017	
Escala: 1:5	PARTES DEL BANCO DE PRUEBAS			No. 1

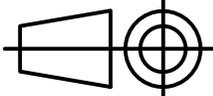
Agujeros para
termopila
x20
Ø 15 mm



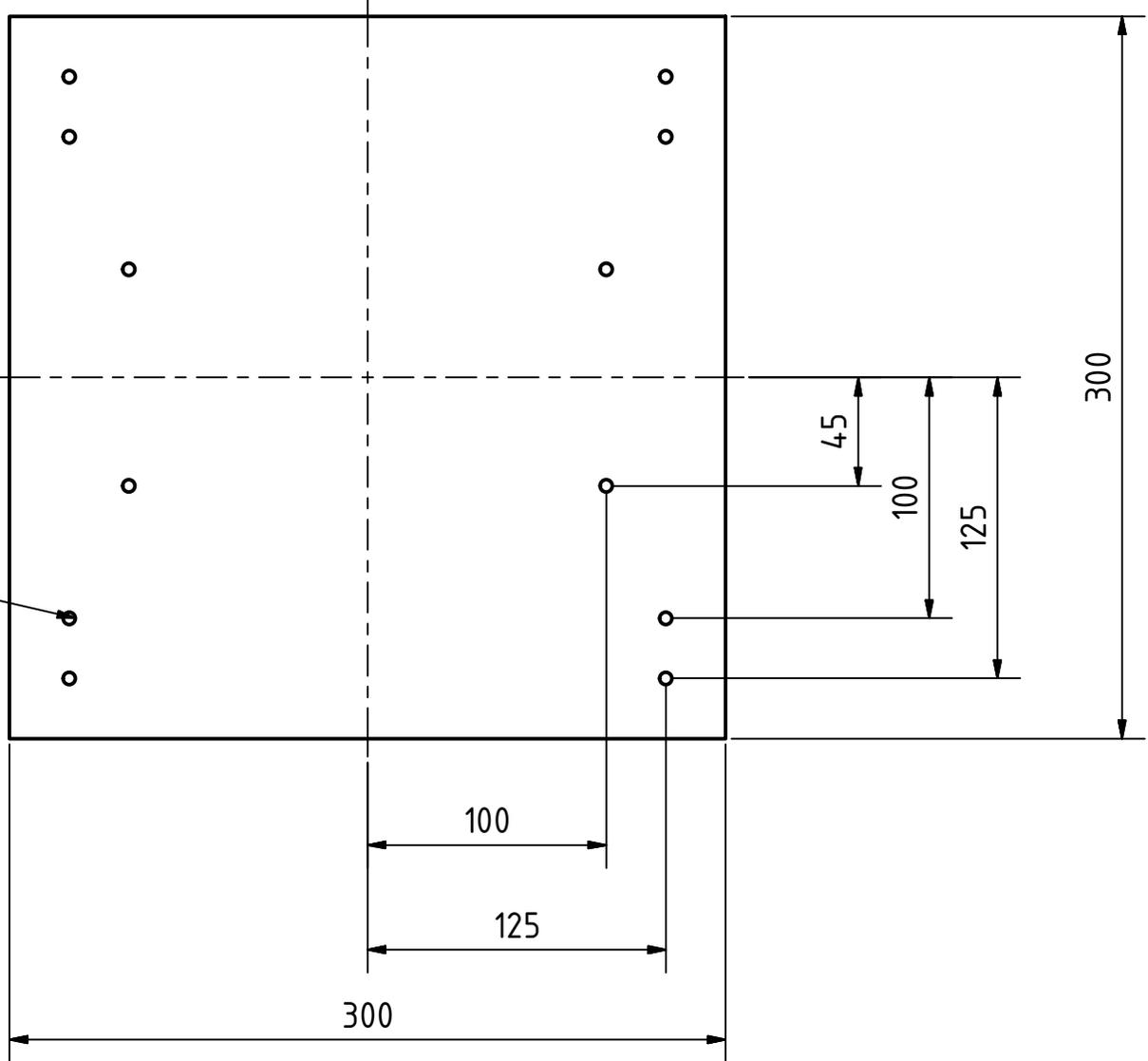
	Nombre	Fecha	E S P O L
	Dibujado por: Jerry Panchana	14/02/2017	
	Dimensiones: mm		
Escala: 1:3	PLACA GRANDE (DETALLE 1)		No. 2

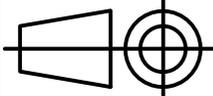
Agujeros para
pernos x20
Ø 5 mm



	Nombre	Fecha	E S P O L	
	Dibujado por:	Jerry Panchana		14/02/2017
	Dimensiones:	mm		
Escala: 1:3	PLACA GRANDE (DETALLE 2)		No. 3	

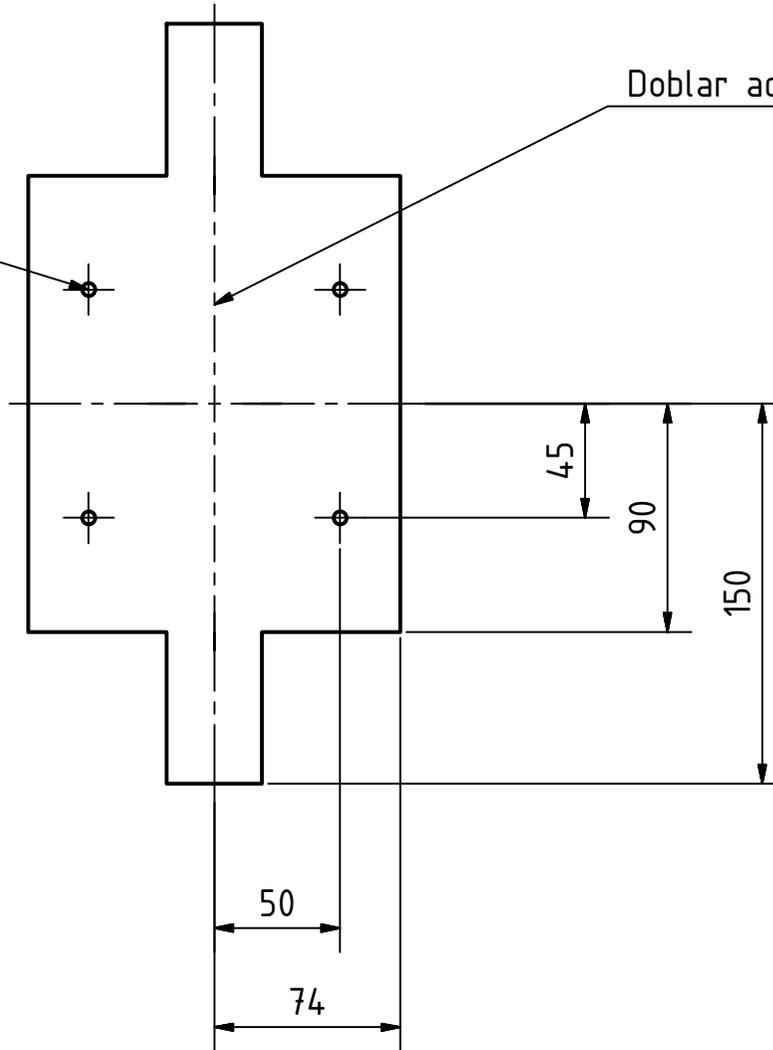
Agujeros para
perno x12
Ø 5mm



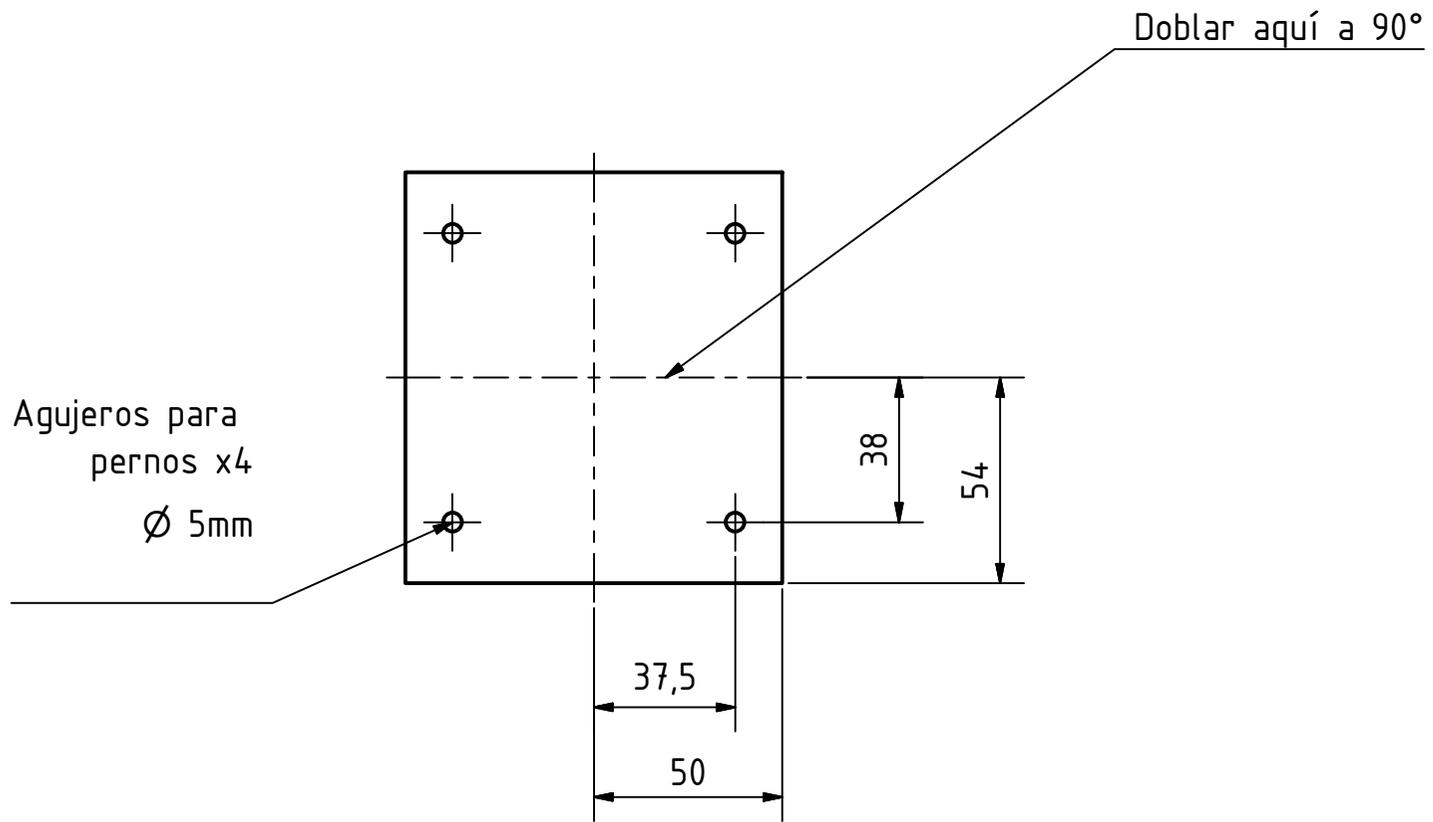
	Nombre	Fecha	E S P O L
	Dibujado por: Jerry Panchana	14/02/2017	
	Dimensiones: mm		
Escala: 1:3	PLACA PEQUEÑA		No. 4

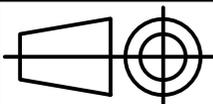
Agujeros para
pernos x4
Ø 5mm

Doblar aquí a 90°

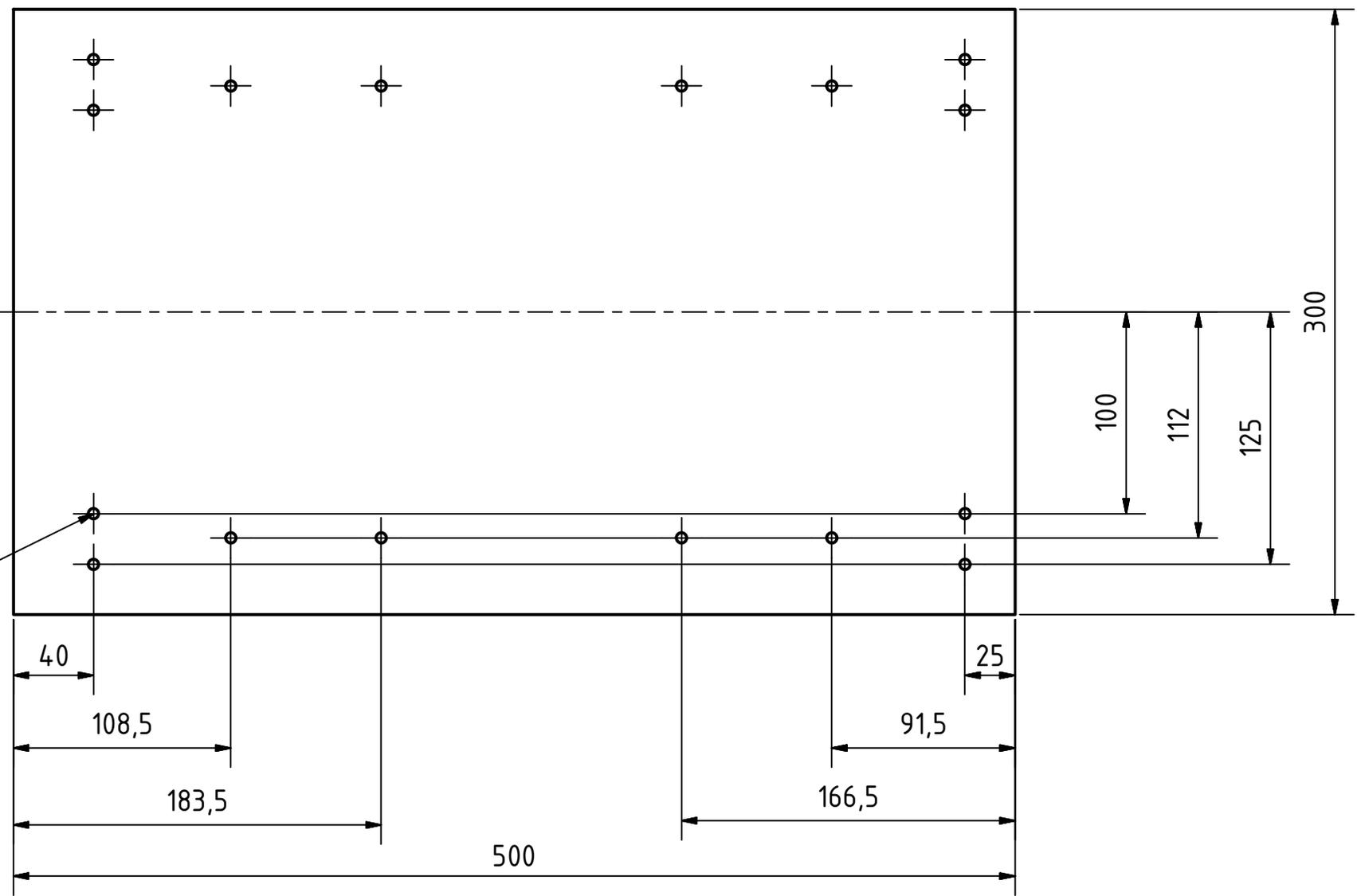


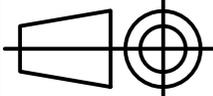
	Nombre	Fecha	E S P O L
	Dibujado por: Jerry Panchana	14/02/2017	
Escala: 1:3	Dimensiones: mm	No. 5	
ÁNGULO PARA ESQUINAS			

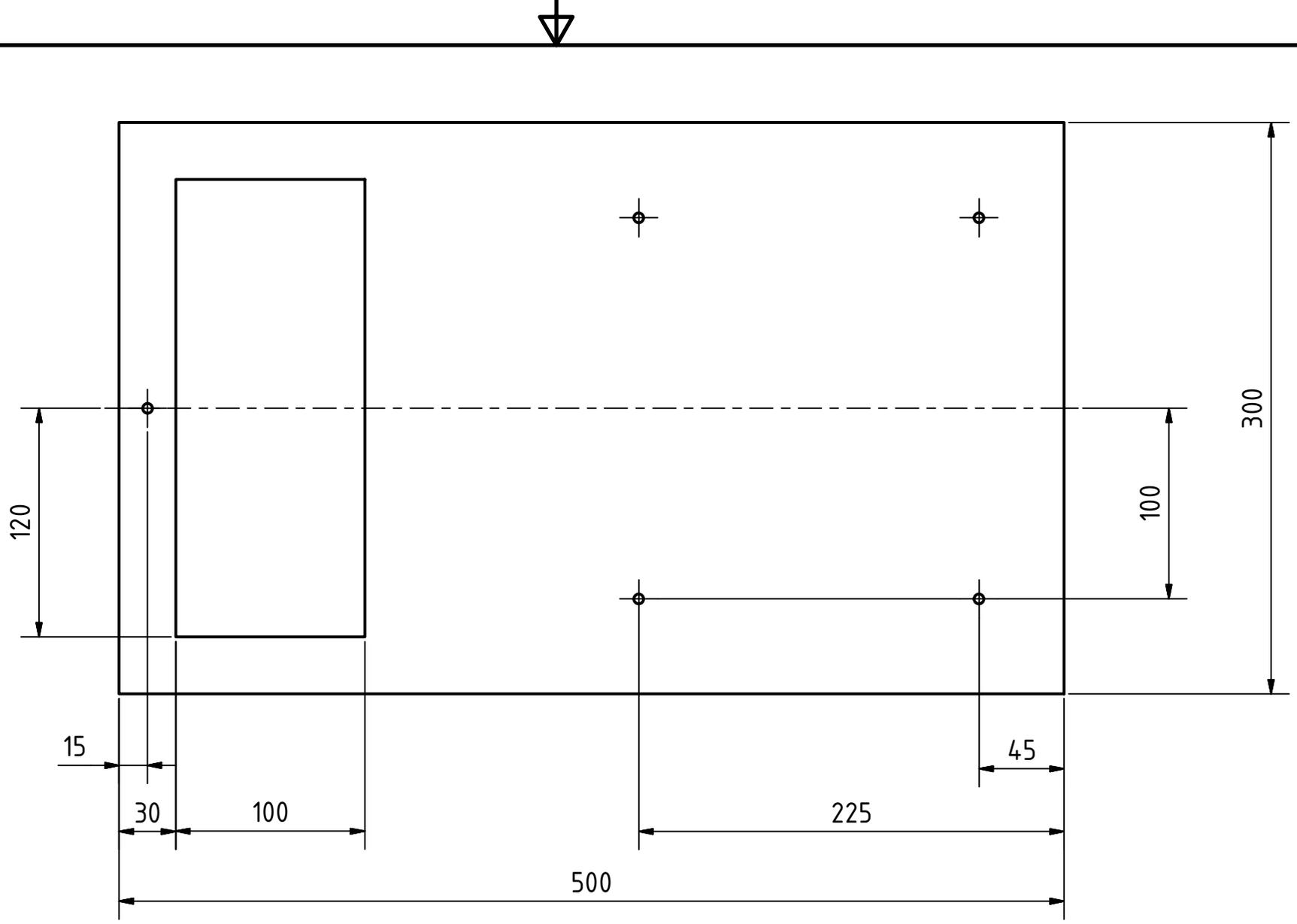


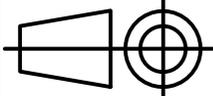
	Nombre	Fecha	E S P O L	
	Dibujado por:	Jerry Panchana		14/02/2017
	Dimensiones:	mm		
Escala: 1:2	ÁNGULO SUP. E INF.		No. 6	

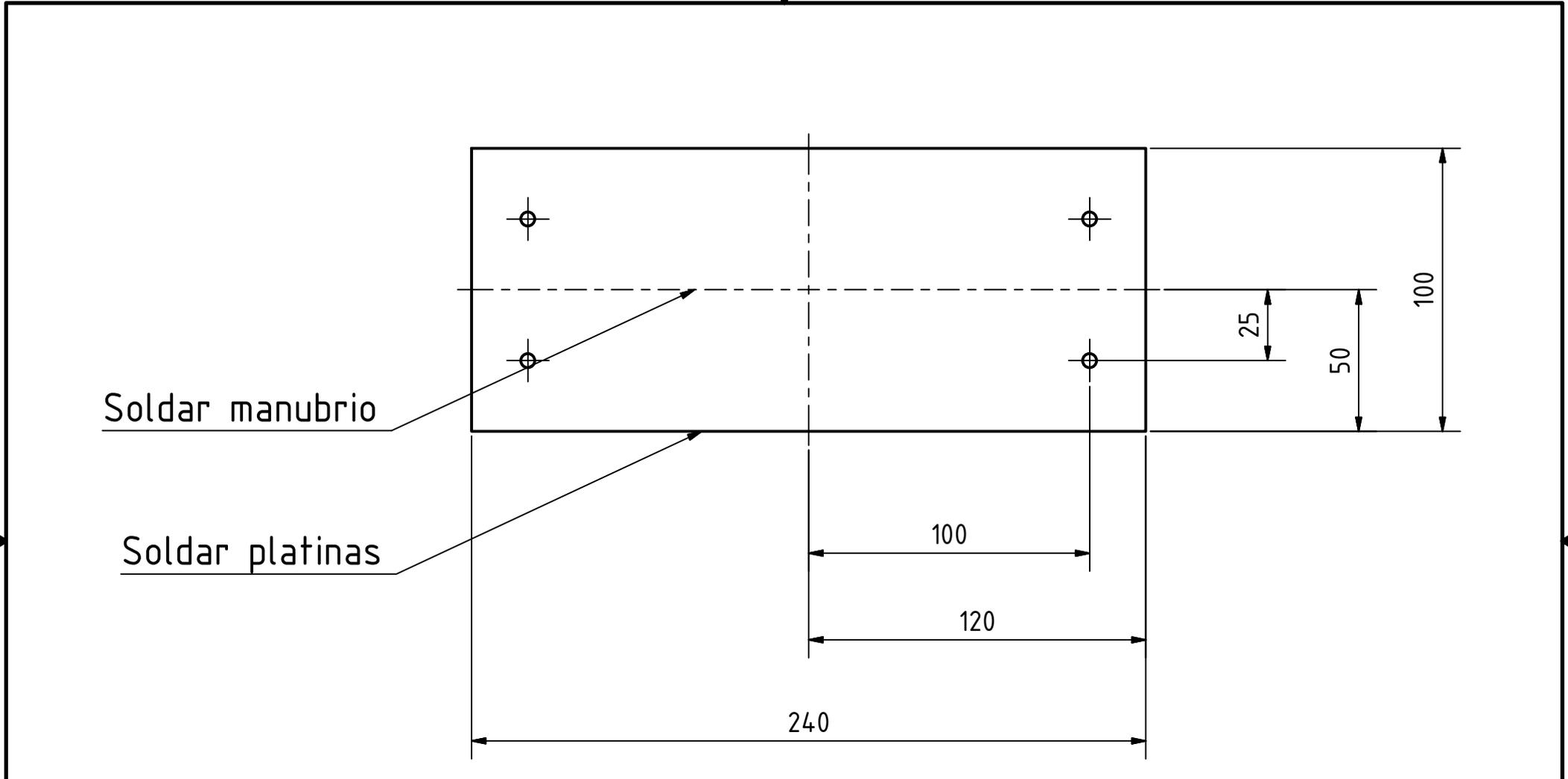
Agujeros para
pernos x16
Ø 5mm

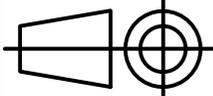


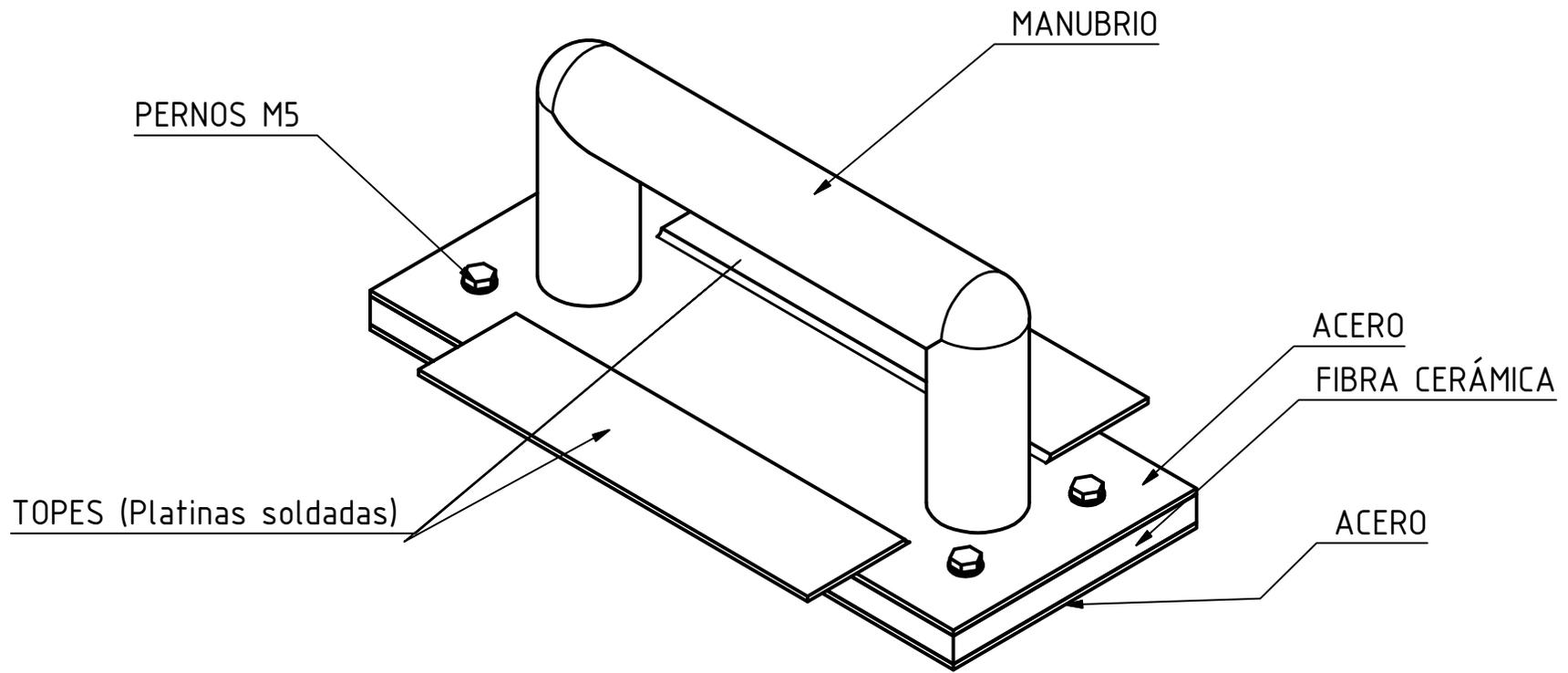
	Nombre	Fecha	E S P O L
	Dibujado por: Jerry Panchana	14/02/2017	
	Dimensiones: mm		
Escala: 1:3	PLACA DE BASE		No. 7

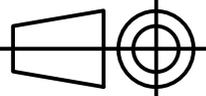


	Nombre	Fecha	E S P O L
	Dibujado por: Jerry Panchana	14/02/2017	
	Dimensiones: mm		
Escala: 1:3	PLACA SUPERIOR		No. 8



	Nombre	Fecha	E S P O L
	Dibujado por: Jerry Panchana	14/02/2017	
	Dimensiones: mm		
Escala: 1:2	TAPA DE LA PLACA SUPERIOR		No. 9



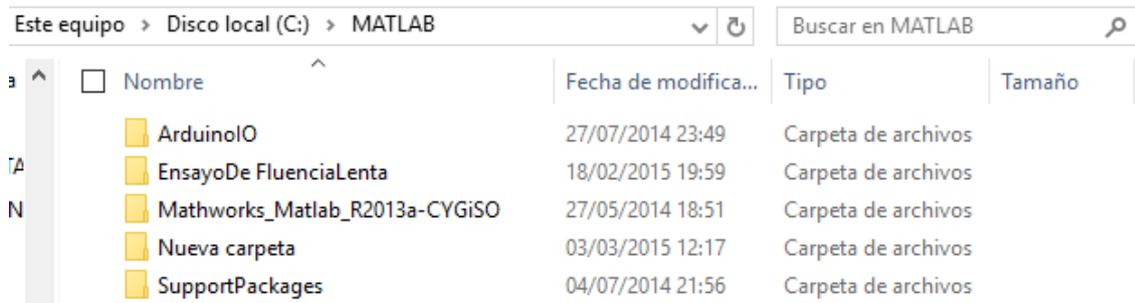
	Nombre	Fecha	E S P O L
	Dibujado por: Jerry Panchana	14/02/2017	
	Dimensiones: mm		
Escala: 1:2	TAPA DE LA PLACA SUPERIOR (DETALLE 2)		No. 10

APÉNDICE B

Enlace entre el sistema de adquisición de datos y el software

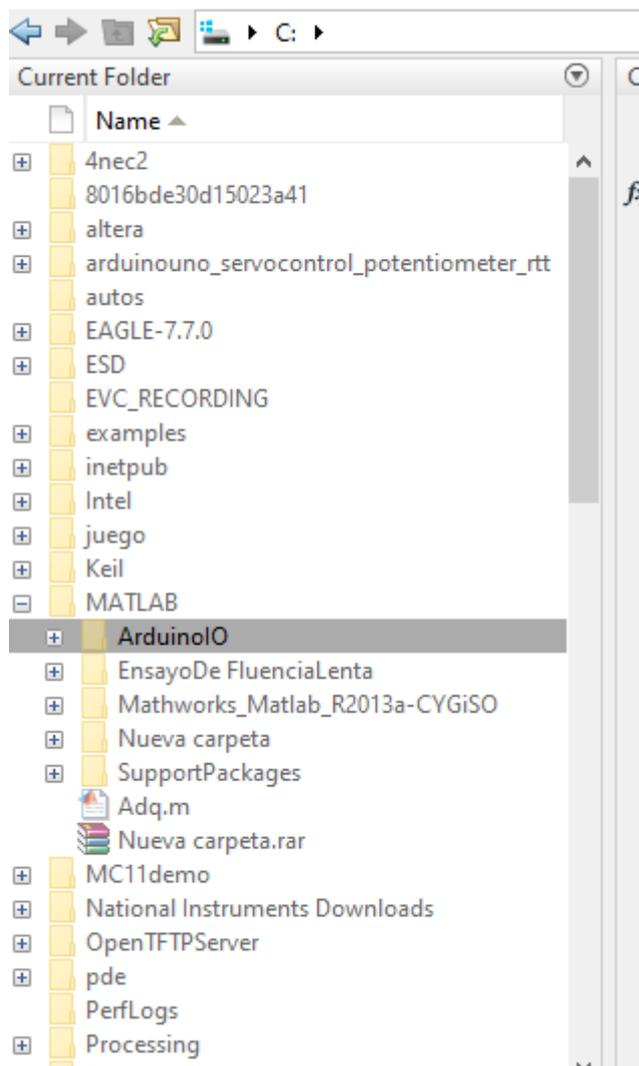
Procedimiento para enlazar el software al circuito

Descomprimir la carpeta ArduinoIO y guardarla en el directorio de matlab que se ubica en el disco C

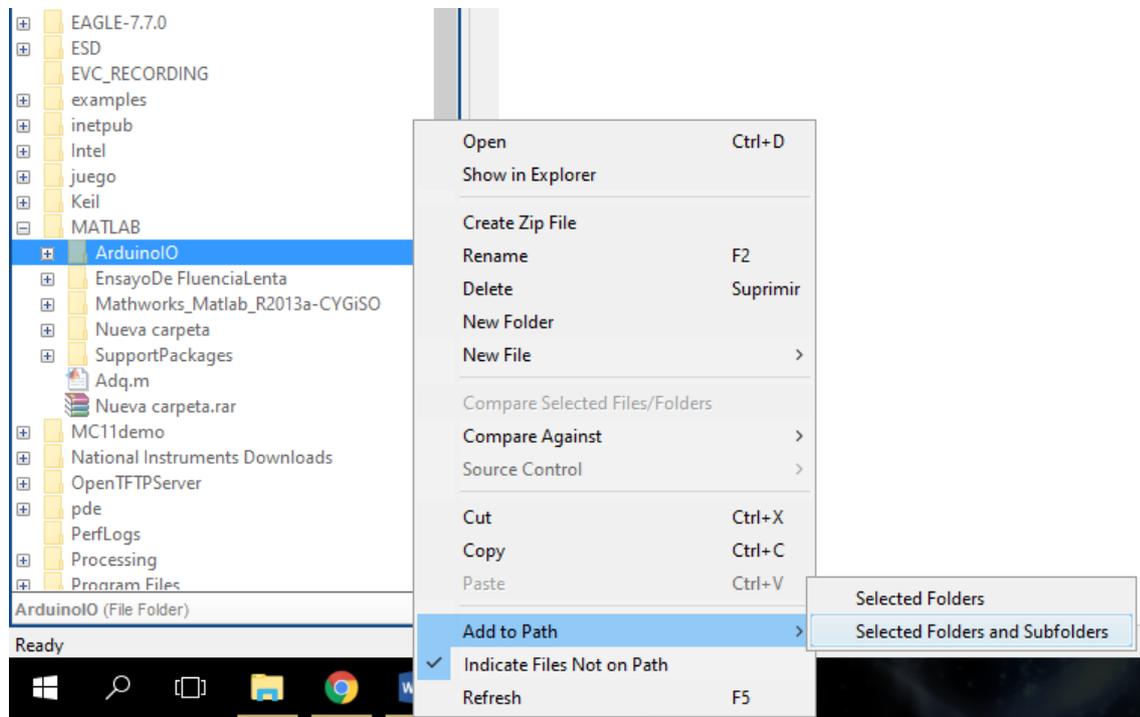


Luego abrir matlab

En el workspace de matlab buscar en el directorio la carpeta Arduino.

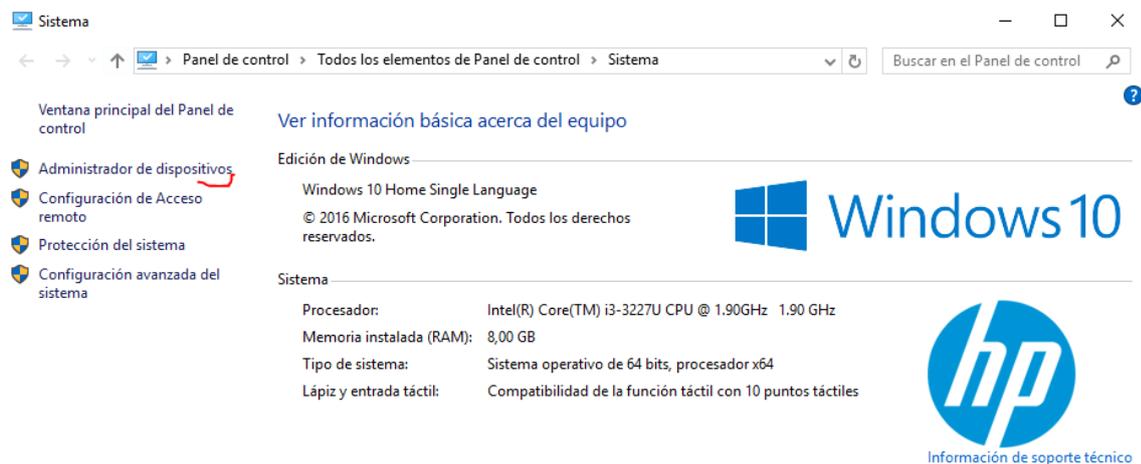


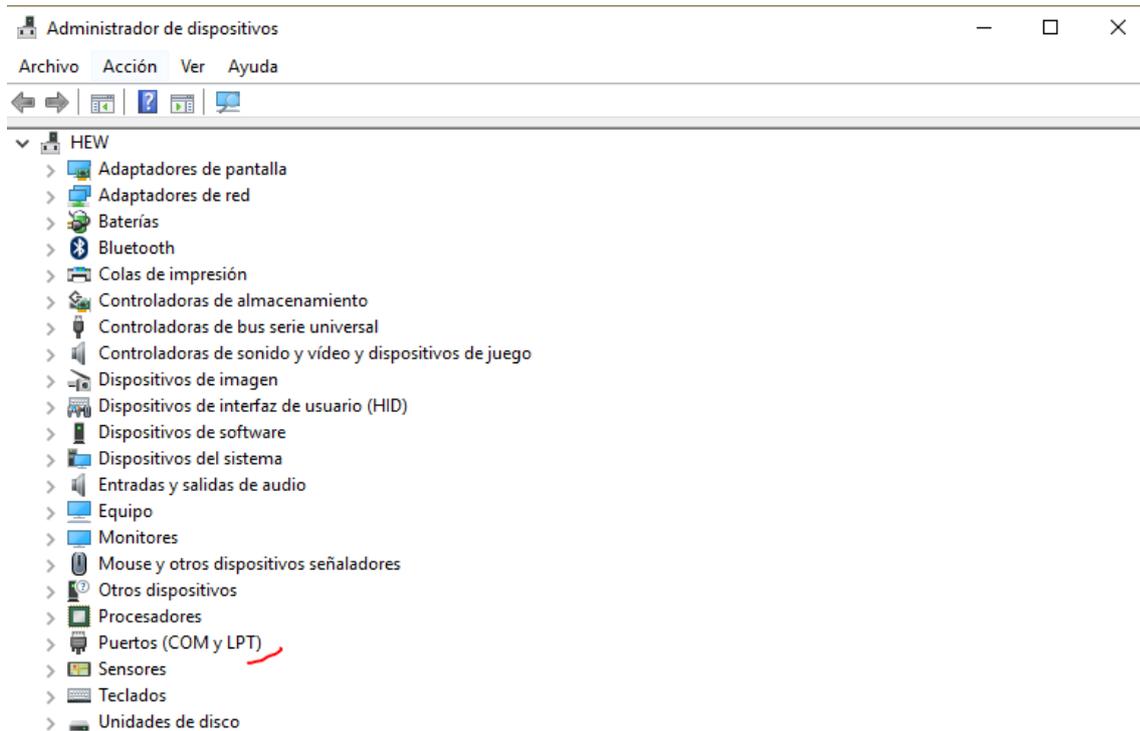
Clic derecho sobre la carpeta y elegir la opción Add to path,



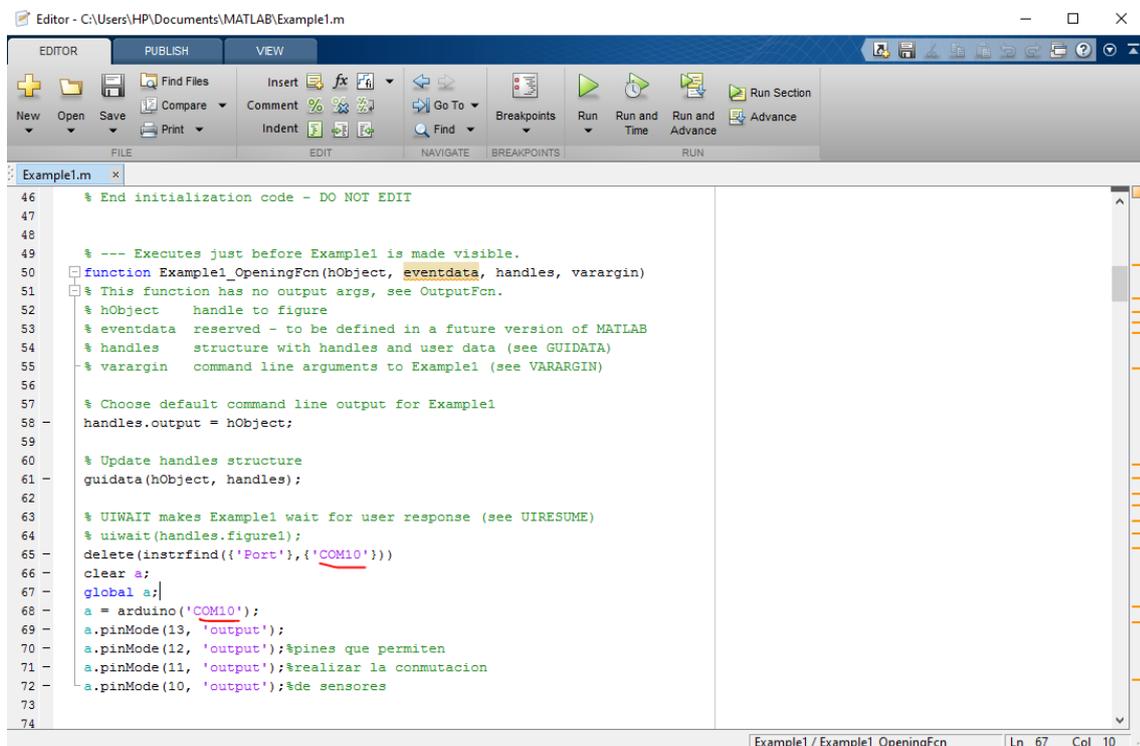
Luego

En el administrador de dispositivos buscar el puerto COM al que corresponde la tarjeta Arduino.





Ese puerto debe reemplazarse en el archivo .m del proyecto



Ahora en el workspace, ya se puede llamar a la función del proyecto Example1

```

function varargout = Example1(varargin)
% EXAMPLE1 MATLAB code for Example1.fig
%     EXAMPLE1, by itself, creates a new EXAMPLE1 or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = EXAMPLE1 returns the handle to a new EXAMPLE1 or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     EXAMPLE1('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in EXAMPLE1.M with the given input arguments.
%
%     EXAMPLE1('Property','Value',...) creates a new EXAMPLE1 or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%     applied to the GUI before Example1_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property application
%     stop. All inputs are passed to Example1_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Example1

% Last Modified by GUIDE v2.5 10-Feb-2017 03:52:51

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Example1_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Example1_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Example1 is made visible.
function Example1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Example1 (see VARARGIN)

```

```

% Choose default command line output for Example1
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Example1 wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
delete(instrfind({'Port'}, {'COM10'}))
clear a;
global a;
a = arduino('COM10');
a.pinMode(13, 'output');
a.pinMode(12, 'output');%pines que permiten
a.pinMode(11, 'output');%realizar la conmutacion
a.pinMode(10, 'output');%de sensores

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Example1_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in turn_on_button.
function turn_on_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to turn_on_button (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
a.digitalWrite(13,1);

% --- Executes on button press in turn_off_button.
function turn_off_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to turn_off_button (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
a.digitalWrite(13,0);

% --- Executes on button press in read_button.
function read_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to read_button (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

global i a
global t;
t=zeros();

global T1;
global T2;
global T3;
global T4;
global T5;
global T6;
global T7;
global T8;
global T9;
global T10;
global T11;
global T12;
global T13;
global T14;
global T15;
global T16;
global T17;
global T18;
global T19;
global T20;

x=0;
%y=0;
xlabel('tiempo [s]');
ylabel('Temperatura [*C]');

for i=1:300
    t(i)=i;

    %sensores 1ra pos
    T1(i)=a.analogRead(0)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T5(i)=a.analogRead(1)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T9(i)=a.analogRead(2)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T13(i)=a.analogRead(3)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T17(i)=a.analogRead(4)*0.00488/0.01; %sensor temp1

    a.digitalWrite(12,1);%conmuta al sensores 2da pos

    T2(i)=a.analogRead(0)*0.00488/0.01;%sensor temp2
    T6(i)=a.analogRead(1)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T10(i)=a.analogRead(2)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T14(i)=a.analogRead(3)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T18(i)=a.analogRead(4)*0.00488/0.01; %sensor temp1

    a.digitalWrite(11,1);%conmuta al sensores 3ra pos

    T3(i)=a.analogRead(0)*0.00488/0.01;%sensor temp3
    T7(i)=a.analogRead(1)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T11(i)=a.analogRead(2)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T15(i)=a.analogRead(3)*0.00488/0.01; %sensor temp1
    T19(i)=a.analogRead(4)*0.00488/0.01; %sensor temp1

```

```

a.digitalWrite(10,1);%conmuta al sensor 4ta pos

T4(i)=a.analogRead(0)*0.00488/0.01;%sensor temp3
T8(i)=a.analogRead(1)*0.00488/0.01; %sensor temp1
T12(i)=a.analogRead(2)*0.00488/0.01; %sensor temp1
T16(i)=a.analogRead(3)*0.00488/0.01; %sensor temp1
T20(i)=a.analogRead(4)*0.00488/0.01; %sensor temp1

a.digitalWrite(10,0);%conmuta al sensor temp4
a.digitalWrite(11,0);%conmuta al sensor temp4
a.digitalWrite(12,0);%conmuta al sensor temp4

plot(t,T1,t,T2,t,T3,t,T4,t,T5,t,T6,t,T7,t,T8,t,T9,t,T10,t,T11,t,T12,t,T13,t,T
14,t,T15,t,T16,t,T17,t,T18,t,T19,t,T20)
% x=[x,b];
%plot(x,'LineWidth',2,y,'LineWidth',2); grid on;
set(handles.t1,'string', T1(i));%temperatura
set(handles.t2,'string', T2(i));%temperatura
set(handles.t3,'string', T3(i));%temperatura
set(handles.t4,'string', T4(i));%temperatura
set(handles.t5,'string', T5(i));%temperatura
set(handles.t6,'string', T6(i));%temperatura
set(handles.t7,'string', T7(i));%temperatura
set(handles.t8,'string', T8(i));%temperatura
set(handles.t9,'string', T9(i));%temperatura
set(handles.t10,'string', T10(i));%temperatura
set(handles.t11,'string', T11(i));%temperatura
set(handles.t12,'string', T12(i));%temperatura
set(handles.t13,'string', T13(i));%temperatura
set(handles.t14,'string', T14(i));%temperatura
set(handles.t15,'string', T15(i));%temperatura
set(handles.t16,'string', T16(i));%temperatura
set(handles.t17,'string', T17(i));%temperatura
set(handles.t18,'string', T18(i));%temperatura
set(handles.t19,'string', T19(i));%temperatura
set(handles.t20,'string', T20(i));%temperatura

axis([0 30 0 300]);

pause(0.1);
end

function edit_text_samples_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_text_samples (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_text_samples as text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit_text_samples as a double
handles.data1=get(hObject,'String');
handles.xSamples=str2double(handles.data1);
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_text_samples_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_text_samples (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function temperatura_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to temperatura (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of temperatura as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of temperatura as
a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function temperatura_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to temperatura (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function tiempo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tiempo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of tiempo as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of tiempo as a
double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tiempo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tiempo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in menu.
function menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to menu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns menu contents as
cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from menu
v=get(handles.menu,'value');
switch v
    case 1 %polietileno
        if handles.xSamples==3
            set(handles.s1,'string', 160);%temperatura
            set(handles.s2,'string', 54); %tiempo
        elseif handles.xSamples==2
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 36);
        elseif handles.xSamples==1.5
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 28);
        elseif handles.xSamples==1
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 18);
        else
            set(handles.s1,'string', 'Valor inadecuado');
            set(handles.s2,'string', 'Valor inadecuado');
        end

    otherwise %poliestireno
        if handles.xSamples==3
            set(handles.s1,'string', 170);
            set(handles.s2,'string', 82);
        elseif handles.xSamples==2
            set(handles.s1,'string', 170);
            set(handles.s2,'string', 55);
        elseif handles.xSamples==1.5
            set(handles.s1,'string', 170);
            set(handles.s2,'string', 28);
        elseif handles.xSamples==1
            set(handles.s1,'string', 170);
            set(handles.s2,'string', 18);
        else
            set(handles.s1,'string', 'Valor inadecuado');

```

```

        set(handles.s2,'string', 'Valor inadecuado');
    end

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function menu_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to menu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in preparar.
function preparar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to preparar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global T1;
global T2;
global T3;
global T4;
global T5;
global T6;
global T7;
global T8;
global T9;
global T10;
global T11;
global T12;
global T13;
global T14;
global T15;
global T16;
global T17;
global T18;
global T19;
global T20;
T1=zeros();
T2=zeros();
T3=zeros();
T4=zeros();
T5=zeros();
T6=zeros();
T7=zeros();
T8=zeros();
T9=zeros();
T10=zeros();
T11=zeros();

```

```
T12=zeros();
T13=zeros();
T14=zeros();
T15=zeros();
T16=zeros();
T17=zeros();
T18=zeros();
T19=zeros();
T20=zeros();
```

```
% --- Executes on button press in ExpWorkspace.
function ExpWorkspace_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ExpWorkspace (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
prueba
```