



Tecnológico de Monterrey

Solución de Problemas de Procesos

Gpo 401

Etapas 2: Diseño y modelación térmica

Olga Natalia Portillo Moreno A00841932
Carlos Fabian Maldonado Mariño A00840941
Luis Fernando Jimenez Ibarra A00841522
Santiago Burgueño Ortega A00838839

Mtra:
Alejandra Molina Leal & Lizette Menchaca

15/04/2026

Etapas 2: Diseño y modelación térmica

1. Introducción

La presente situación combina temas de termofluidos, principalmente por la conducción de calor y un sistema de control de temperatura. Esto en el contexto del socio formador, en este caso siendo “Pastelerías Lety”, en el que el grupo tuvo el objetivo de proponer mejoras a su sistema actual.

El proyecto tuvo como alcance el diseño y construcción de un prototipo de horno con un funcionamiento entre los 80°C y los 120°C. Además del análisis matemático para asegurar que el modelo propuesto contiene de manera adecuada el calor generado por la resistencia eléctrica, es decir, que se minimizan las pérdidas de calor.

Para esta primera etapa se tiene como objetivo el diseño y construcción del prototipo, justificando el mismo por las ecuaciones de transferencia de calor por medio de conducción y convección. Además, de comparar los datos supuestos obtenidos por medio de cálculos matemáticos con los datos obtenidos ya con el funcionamiento del prototipo.

2. Marco Teórico

2.1. Conducción de calor

La conducción de calor se refiere a la transferencia de calor por medio de un contacto directo entre partículas, en el que se encuentra un flujo de energía de mayor temperatura hacia la zona con menor temperatura. Este mismo se modela a partir de la Ley de Fourier, en el que iguala la razón de cambio de energía a la sección transversal de contacto, el gradiente negativo de temperatura, una constante de conductividad propia del material todo sobre el ancho del material

$$q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Un dato importante que se menciona en [1] es que la constante de conductividad térmica de un material varía a partir de la temperatura que se encuentra. En el caso de este proyecto se hará la asunción que este valor es constante a lo largo de todas las pruebas realizadas para simplificar cálculos. Esto se justifica por el corto rango de operación en el que se harán las pruebas por lo que se puede asumir que no será significativo el cambio de esta constante.

2.2. Convección de calor

Se refiere a la transferencia de calor por un mecanismo de movimiento o circulación de un fluido como estipula [3]. Esta puede llegar a ocurrir de forma natural por el cambio de densidades a causa del cambio de temperatura o puede ser forzada al impulsar al fluido como por ejemplo con un ventilador. El modelo que lo define es el siguiente:

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

Es decir, el producto del coeficiente de convección, el área de contacto y la diferencia de temperatura ambiente y la del objeto en cuestión.

2.3. Resistencia térmica

La resistencia térmica se entiende como la oposición al flujo de calor por parte de un material en el caso de la conducción o por un fluido en movimiento como ocurre en la convección.

$$R_{Cond} = \frac{L}{kA}$$

En conducción es la división del grosor de un material sobre el producto del área con el coeficiente de conductividad térmica del material.

$$R_{Conv} = \frac{1}{hA}$$

En el caso de la convección, la resistencia térmica es el inverso del producto de área de contacto por el coeficiente de transferencia de calor por convección. Este varía dependiendo del fluido y si este está en movimiento o no inicialmente.

3. Modelado Matemático

3.1. Analisis Inicial y Supuestos

Por la naturaleza del prototipo ocurre un fenómeno de transferencia de calor, en el que el calor generado por la resistencia eléctrica fluye de un entorno con mayor temperatura, siendo este el interior del horno, a un entorno con menor temperatura fuera del mismo. En este sentido, se tiene que asegurar usar materiales aislantes adecuados para asegurar la eficiencia energética en la transferencia de energía eléctrica a calor interno y asegurarse que la temperatura externa del horno es adecuada y no peligrosa en caso de tacto directo. Esto teniendo en cuenta el contexto del socio formador al haber un flujo continuo de trabajadores en la planta.

En este sentido, es necesario hacer un modelado adecuado para determinar el aislamiento correcto y asegurar que la temperatura externa sea segura aun con el horno con una temperatura interna de 100°C. En nuestro caso, se planea incluir una pantalla LCD para visualizar fácilmente la temperatura objetivo y la temperatura leída, este tipo de pantallas operan de manera adecuada hasta un máximo de 70°C de acuerdo a [4], teniendo un factor de seguridad del 30%, se tiene como objetivo tener la temperatura externa menor a 49 °C.

En este caso se tienen dos fenómenos presentes de transferencia de calor, tanto por conducción como por convección. En el caso de la conducción, el calor interno pasará por tres materiales de distintos grosores en el prototipo planeado, la cámara interna de aluminio

de 1.21 mm de grosor, la capa de fibra de vidrio de 2 cm y un case externo de MDF de 3 mm de grosor. En el caso de la convección, este fenómeno ocurre en la parte exterior del horno, donde habrá una diferencia de temperatura entre el aire a temperatura ambiente y el exterior del horno a una mayor temperatura.

Para poder simplificar el análisis realizado se pueden hacer distintas asumpciones. Para empezar, se asume que la temperatura interna dentro de la cámara interna del horno se distribuye de manera uniforme, es decir que no hay diferencias internas de temperatura al interior de la cámara interna, evitando así un fenómeno de convección interno en el que la temperatura ambiente cambia constantemente. Esto, se asume ya que el análisis presente tiene como objetivo analizar el sistema al estabilizarse a la temperatura objetivo.

Para el caso de las áreas de contacto de material se encontraron con los siguiente cálculos:

$$A_1 = A_{Al} = 6 \times (0.22m)^2 = 0.290 m^2$$

$$A_2 = A_{Fibra} = 6 \times (0.22121m)^2 = 0.294 m^2$$

$$A_3 = A_{MDF} = 6 \times (0.24m)^2 = 0.346 m^2$$

3.2. Analisis de conduccion

Se tiene que encontrar la resistencia térmica de cada uno de los materiales. En este caso, los datos que se usarán para estos cálculos vienen en la siguiente tabla:

Dato	Magnitud	Unidad
Grosor del aluminio	1.21	<i>mm</i>
Coefficiente de conductividad térmica del aluminio	200	$\frac{W}{K m}$
Área de contacto con el aluminio	0.290	m^2
Grosor de la fibra de vidrio	2	<i>cm</i>
Coefficiente de conductividad térmica de la fibra de vidrio	0.04	$\frac{W}{K m}$
Área de contacto con la fibra de vidrio	0.294	m^2

Grosor del MDF	3	mm
Coefficiente de conductividad térmica del MDF	0.12	$\frac{W}{K m}$
Área de contacto con MDF	0.346	m^2

Tabla 1: Datos sobre la conductividad térmica del prototipo

A partir de estos datos, se puede obtener la resistencia térmica de cada uno de los materiales

$$R_1 = R_{Al} = \frac{0.00121 m}{(200 \frac{W}{K m}) (0.290 m^2)} = 0.0000209 \frac{K}{W}$$

$$R_2 = R_{Fibra} = \frac{0.02 m}{(0.04 \frac{W}{K m}) (0.294 m^2)} = 1.701 \frac{K}{W}$$

$$R_3 = R_{MDF} = \frac{0.003 m}{(0.12 \frac{W}{K m}) (0.346 m^2)} = 0.072 \frac{K}{W}$$

Es claro que la resistencia térmica ofrecida por el muro de aluminio es baja, principalmente por dos factores, la delgadez de la lámina utilizada cercana a un milímetro y el alto coeficiente de conductividad térmica. Es notorio que el mayor valor de resistencia lo tiene el aislante utilizado de fibra de vidrio, en el caso del MDF este es utilizado con objetivo de construir el caso, o necesariamente aislar calor, por eso es su resistencia térmica es menor a la de la fibra de vidrio.

3.3. Análisis de convección

La resistencia térmica por convección se refiere a la convección generada por la diferencia de temperatura entre la superficie del prototipo y la temperatura ambiente. En este caso, se tienen los siguientes valores:

$$A_4 = A_{Ext} = 6 \times (0.243m)^2 = 0.354 m^2$$

Dato	Magnitud	Unidad
Coefficiente de convección térmica	10	$\frac{W}{K m^2}$
Área de contacto	0.354	m^2

Tabla 2: Datos sobre la convección térmica del prototipo

$$R_{Conv} = \frac{1}{hA}$$

$$R_{Conv} = \frac{1}{(10 \frac{W}{K m^2}) (0.354 m^2)} = 0.282 \frac{K}{W}$$

Es notorio que comparando la resistencia de convección con las resistencias de conducción del capítulo 3.2, la resistencia por convección es menor a la resistencia térmica de la fibra de

vidrio, pero aun así es mayor a la resistencia ofrecida por el acero de la cámara interna y del MDF del case

3.4. Análisis sistema completo

Es importante recordar que se piensa utilizar un controlador PID para el funcionamiento del horno, es decir que este no estará encendido durante todo el funcionamiento del proyecto, sino estará prendiendo y apagando para mantener una temperatura objetivo constante de 100°C, en este sentido, para el cálculo del flujo de calor, no se puede asumir que durante el funcionamiento se entregue esta potencia de 1000W, se debe calcular una potencia promedio. En este sentido, se tiene como referencias las temperaturas del interior del horno de 100°C y la temperatura ambiente, que se asumirá de 30°C. Esto al ser una temperatura promedio en la época en la que se está realizando este primer avance. Cabe recordar que a lo largo del año la temperatura ambiente va ir variando, mientras mayor sea la diferencia entre la temperatura objetivo interna del horno y la temperatura ambiente, mayor será la potencia consumida de la fuente de calor interna, esto ocurre justamente cuando las temperaturas ambiente sean menores.

Ya con todas las resistencias térmicas, se puede calcular ya la resistencia térmica total y luego con la diferencia de temperatura mencionada anteriormente, se puede encontrar la potencia promedio de la resistencia del horno a 100°C

$$R_T = 0.0000209 \frac{K}{W} + 1.701 \frac{K}{W} + 0.072 \frac{K}{W} + 0.282 \frac{K}{W} = 2.055 \frac{K}{W}$$

$$q = \frac{T_{IN} - T_{AMB}}{R_T} = \frac{100^{\circ}C - 30^{\circ}C}{2.055 \frac{K}{W}} = 34.06 W$$

Se puede observar que la potencia promedio cuando ya se haya estabilizado el sistema será de 34.06 W para compensar las pérdidas de calor por el flujo del mismo hacia afuera. Dando así que solo se usaría en promedio un 3.41 % de potencia de la resistencia eléctrica al alcanzar la estabilidad, eso sí, bajo la asunción que se toda la potencia consumida en forma de electricidad es convertida en energía calórica. Con este valor de flujo de potencia se puede calcular la temperatura al exterior del horno al estabilizarse la temperatura.

3.5. Calculo de temperatura en superficie

Con el conocimiento sobre la potencia promedio de la fuente de calor al alcanzar un estado estable y una temperatura ambiente se puede encontrar la temperatura de la superficie del horno. Esto es importante para asegurar que sea seguro para el funcionamiento correcto de los electrónicos presentes sino también de los operadores al estos pasar de forma continua cerca de los hornos como se vio en la visita a la planta del socio formador.

Para calcularlo por medio de la resistencia térmica en conducción se sigue la siguiente fórmula: $\Delta T = q R_T$, eso sí, al estar analizando la superficie del horno, no se toma en cuenta la resistencia por convección.

$$\Delta T = 36.50 \text{ W} \times (2.055 \frac{\text{K}}{\text{W}} - 0.282 \frac{\text{K}}{\text{W}}) = 64.71 \text{ K}$$

$$\Delta T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C} - T_{\text{Superficie}} = 64.71 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Superficie}} = 35.28 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

El diseño planeado logra reducir así un 64.71 % la temperatura de la superficie del horno en comparación a la temperatura interna de 100 °C.

4. Diseño y Selección de Materiales

El diseño del prototipo se hizo mediante el software “Solidworks”, en este se hizo todo el diseño del horno para evaluar la cantidad de material necesario requerido para su compra. Además de evaluar los materiales requeridos para la construcción y poder asegurar que la manufactura del prototipo se pueda hacer en el tiempo adecuado para el proyecto.

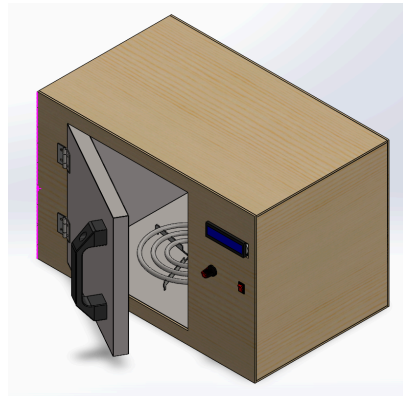


Figura 1: Diseño propio del prototipo realizado en Solidworks

En cuanto a los materiales, se utilizó fibra de vidrio como aislante térmico por su baja conductividad térmica es un material adecuado para aislar el calor interno del horno del exterior. Además, se decidió utilizar este material en comparación de otros aislantes térmicos como la fibra cerámica por un factor económico y adecuado para el rango de temperaturas de operación.

Para el sistema de sensor y generación de calor se utilizó un termopar tipo K y una resistencia de cocina para servir como fuente de calor. Se decidió optar por el termopar tipo K por su comportamiento lineal en el rango de operación y su menor costo en comparación con otras alternativas como un termopar de platino rodio. En cuanto a la resistencia utilizada se optó por esta por encima de una resistencia de horno o en forma de bobina al facilitar la

distribución de calor por el área de contacto que esta tiene ya diseñada, además de ser de menor costo en comparación a las otras alternativas mencionadas.

5. Construcción del prototipo

Primero cortamos toda la estructura con mdf, la cortamos con láser, con esto ya tendríamos lo que es el esqueleto del horno. Añadimos una bisagra para la parte de la puerta, dejamos un compartimiento para poder maniobrar todo lo que es la electrónica y no tengamos que desarmar el horno una vez que ya esté todo armado. Nosotros en la parte interna colocamos una cubierta de lamina aluminio, que tuvimos que cortar para poder hacer la forma cuadrática del horno, solamente hicimos un corte para la puerta y lo demás fueron dobleces, Entre el aluminio y el mdf colocamos la cubierta de fibra de vidrio, esta misma está cortada con dimensiones de la misma lámina de aluminio, y el mismo aluminio y mdf hacen que se mantenga en posición y no fue necesario agregar algún tipo de adhesivo. Las partes de mdf están unidas con soportes tipo L, además de tener sus pestañas para que embonen mejor. El relay de estado sólido y el termopar están unidos al mdf por medio de tornillos, al igual que el interruptor y el display de cristal liquido.

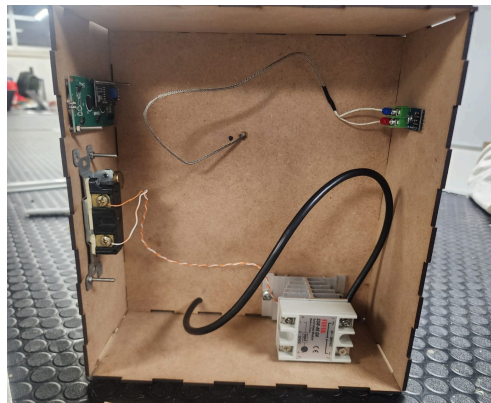


Figura 2: parte interna derecha del mdf con relay, termopar y componentes restantes instalados

En cuanto a la manufactura de la cámara interna, se utilizó una lámina de aluminio de calibre 18 como se vio planeado en el CAD. En nuestro caso, se cortó inicialmente la figura deseada para la cámara interna por medio de corte con plasma. Posteriormente, se utilizó una dobladora de láminas para el doblado a 90° de la cámara interna. Se optó por este material por su facilidad para doblar en comparación a láminas de acero, las cuales no tenían la capacidad de doblar la dobladora utilizada en el laboratorio.

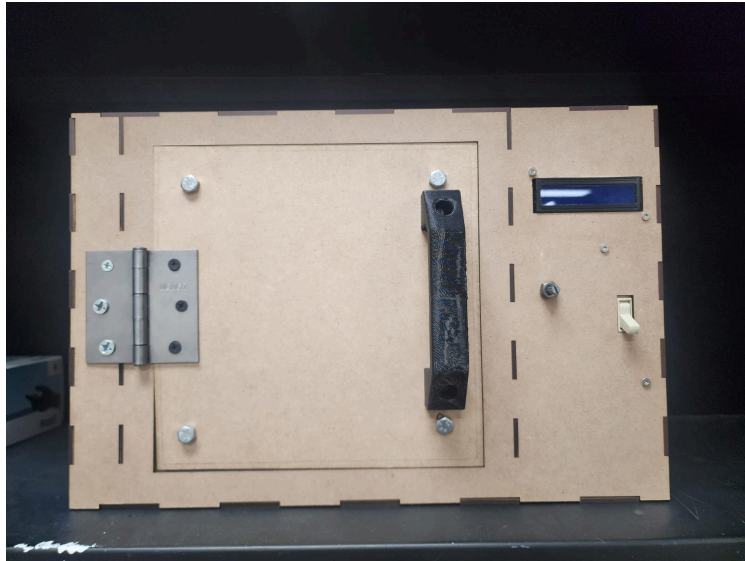


Figura 3: estructura externa del horno construido



Figura 4: estructura interna del horno construido, con resistencia, placa de aluminio, aislante y mdf formando la caja

Como se puede observar en la figura 4, las 3 capas de material (MDF, Fibra de vidrio y aluminio), Además se puede observar que se pudo integrar en la cámara interna tanto el resistor como fuente de calor y el termopar.

Las mayores limitaciones y complicaciones en la construcción del prototipo fueron las limitaciones de maquinaria y herramientas a disposición. Por ejemplo, se tenía inicialmente planeado utilizar acero para la construcción de la cámara interna. En este caso, no se pudo ya que la cortadora de plasma no podía cortar acero galvanizado por la falta de un sistema de ventilación correcto por los gases que emite este acero.

6. Conclusiones

En esta etapa 2, se el enfoque fue el de diseñar el prototipo, asegurarse por las ecuaciones de flujo de calor vistas en clase que es correcto el aislamiento utilizado y que las temperaturas de la superficie del horno sean adecuadas sin poner en riesgo componentes electrónicos ni a los operadores de la misma.

Primeramente, se hizo un diseño CAD por medio del software de Solidworks. En este se hizo una primera propuesta para el horno, enfocándonos principalmente en el diseño externo del case, el diseño de la caja interna y la distribución de elementos electrónicos para el control y funcionamiento correcto del prototipo.

El análisis de calor se utilizó para asegurarse que el diseño planteado era seguro de utilizar para el operador. Se inició encontrando primeramente los valores de resistencia térmica de cada capa de material por conducción y el del aire externo por convección. Con las resistencias térmicas, se calculó la potencia promedio necesaria de la resistencia para poder mantener una temperatura de 100 °C. Con la potencia promedio, se calculó la temperatura externa esperada a partir de este valor y una temperatura externa asumida.

En cuanto a la construcción se utilizaron diferentes técnicas para la manufactura del prototipo. Primero, se utilizó una cortadora de plasma para cortar la lámina de aluminio inicial, esto para prepararla para la dobladora. En el caso de esta máquina, solo pudo realizar dobleces de alrededor de 30° a 40°, no llegando hasta los 90° esperados, por lo que el resto de doblez se tuvo que realizar de forma manual. Para la perforación del acero, no se tuvo acceso a maquinaria especializada con este fin por lo que se tuvo que usar taladro y brocas de manera manual. Se utilizaron además técnicas de impresión 3D para la manufactura de piezas como la manija de la puerta. Se decidió utilizar el aluminio en comparación a otros metales como el acero por su ductilidad, sobre todo al ser capaz de manipularlo con la dobladora a disposición, la misma máquina no podía manipular otros metales más rígidos como el acero.

Con esta etapa se pudo diseñar y construir el horno prototipo para la implementación de un sistema de control como lo exige el reto. Además, ya con la estructura y conexiones del horno hechas, el enfoque está en la programación del microcontrolador para el funcionamiento correcto del horno para que pueda mantener una temperatura objetivo.

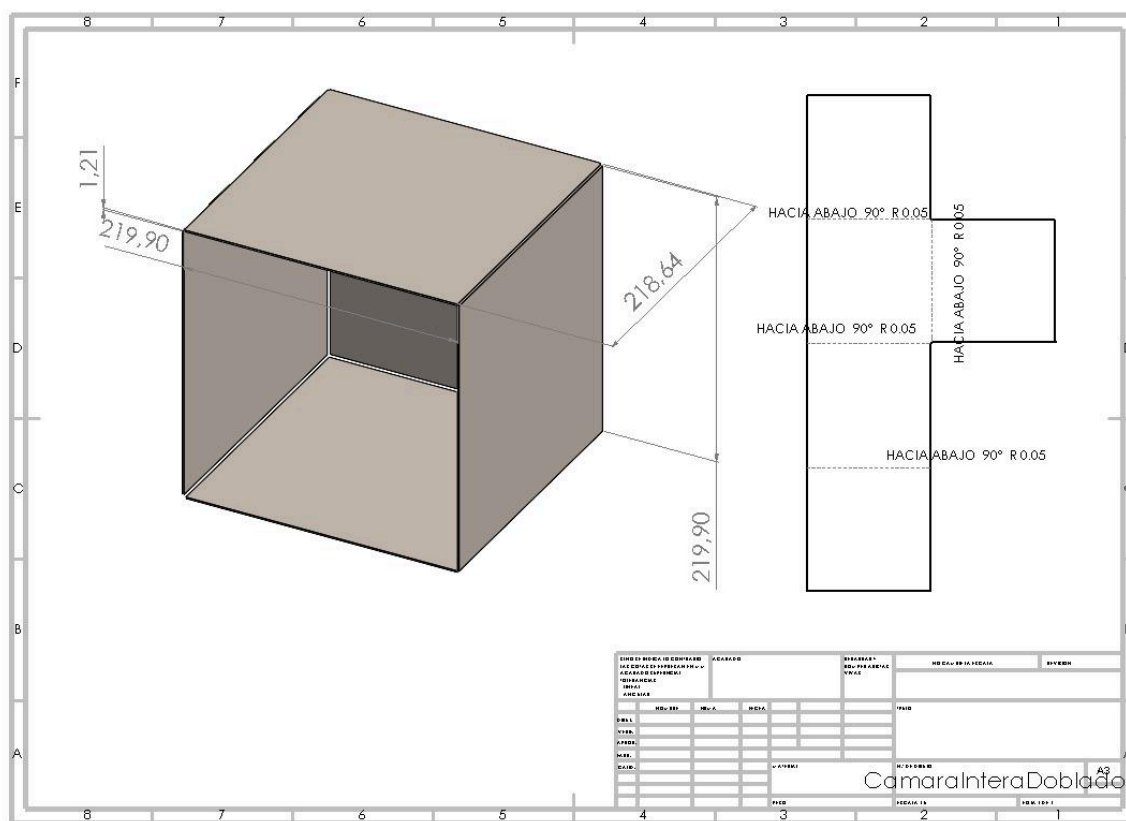
Referencias

- [1] Camaraza Medina, Y. (2020). Transferencia de calor por conducción: (ed.). Editorial Universitaria. Pg. 13 - 25. <https://elibro.net/es/ereader/consorcioitesm/126028?page=3>
- [2] Cifuentes Rubio, L., Vargas Henriquez, L., & Rodríguez Peña, A. (2019). Simulación del flujo de calor para el re-diseño de un horno de cocción de pan. Revista Politécnica, 15(28), 97–106. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n28a9>
- [3] Conesa, J. A. (2013). Mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección, radiación). Experimentación en Ingeniería Química I.
- [4] Vishay (2013) LCD-016N002B-CFH-ET / 16 x 2 Character LCD. <https://www.vishay.com/docs/37484/lcd016n002bcfh-et.pdf>

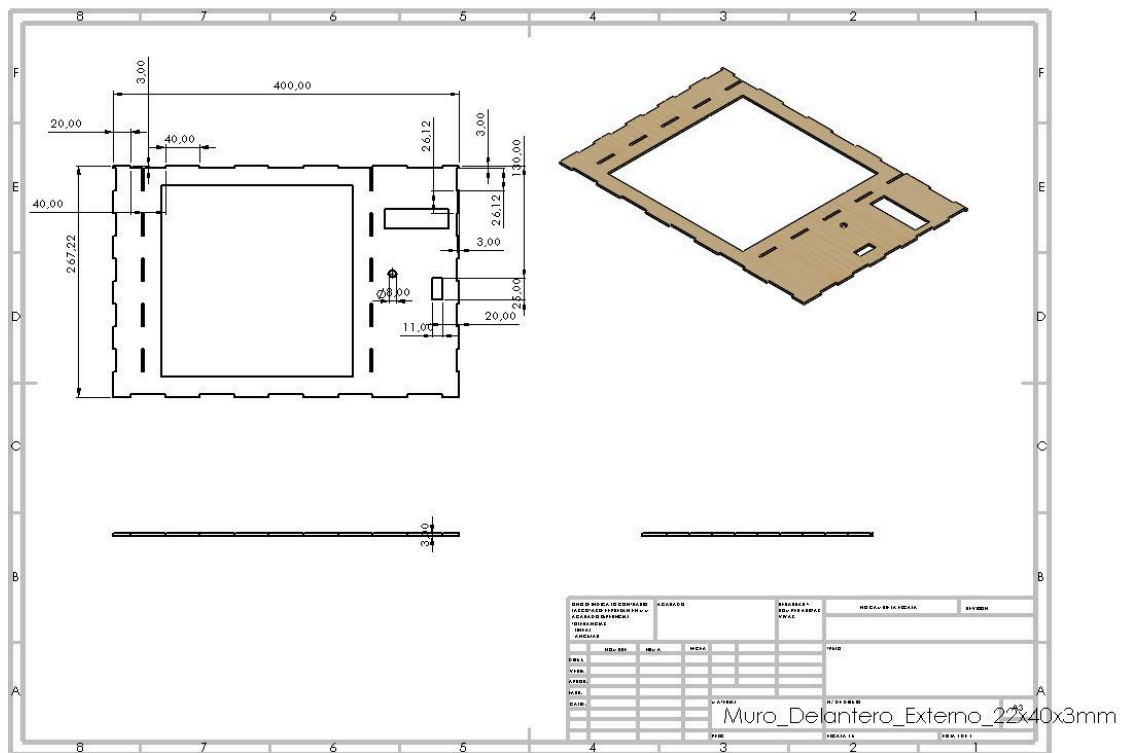
Apéndice

A. Planos de Piezas

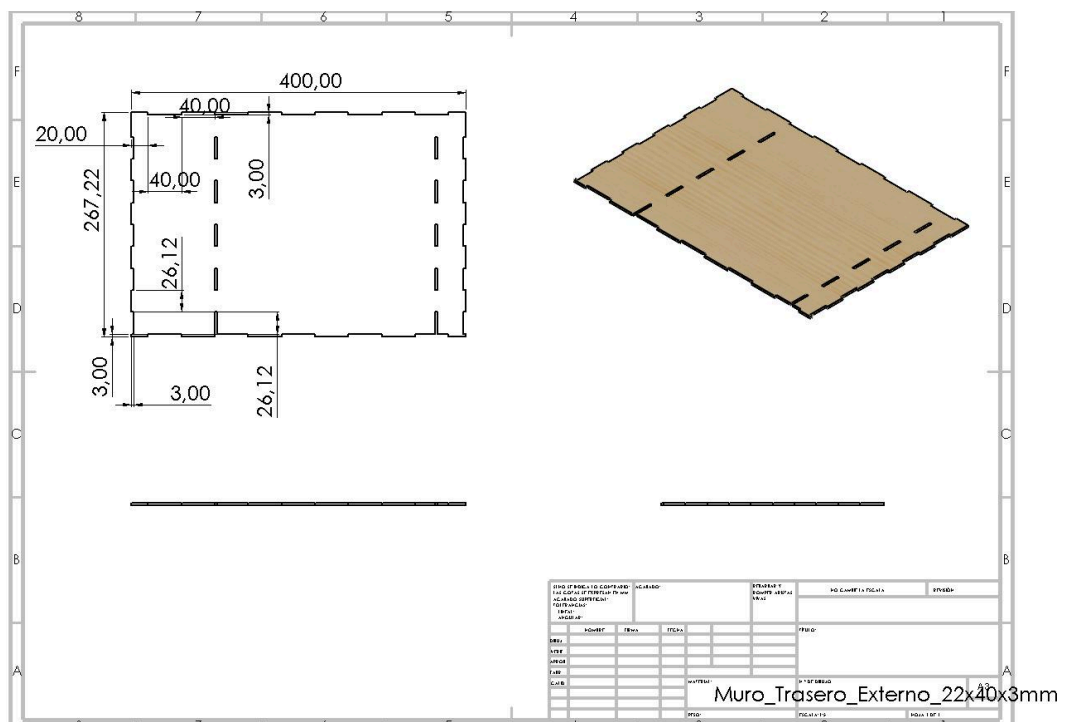
A.1. Plano caja interna de aluminio



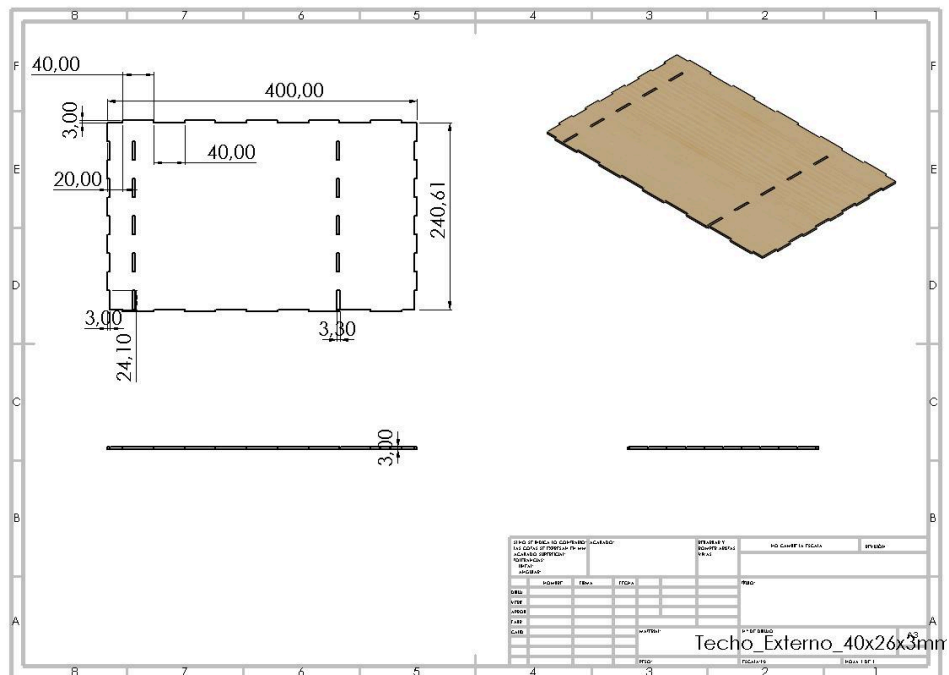
A.2. Plano muro delantero externo



A.3. Plano muro trasero externo



A.4. Plano techo externo



A.5. Plano muro lateral

