

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

**" Diseño de un equipo para medir permeabilidad al vapor de
agua en películas flexibles"**

PARTE I

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Proyecto Multidisciplinario de Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Cristhian Andrés Zúñiga Ruiz

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre y a mi padre, quienes desde niño me guiaron, me motivaron a superarme y a salir adelante. A mi hermana, quien me saca una sonrisa cada día. A mis amigos y compañeros tanto dentro y fuera de la Universidad, pues fueron razón de apoyo y alegría. A mis profesores, que a lo largo de la carrera motivaron el deseo de aprender e innovar. Y a mis tutores y directores de este trabajo

DECLARACIÓN EXPRESA

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

Cristhian Zúñiga Ruiz

PhD Sandra Acosta

M. Sc. Jonathan León

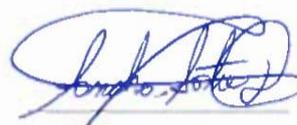
y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Cristhian Zúñiga Ruiz



M. Sc Jonathan León



PhD Sandra Acosta

RESUMEN

El uso de plásticos para la conservación de alimentos se ha incrementado en años recientes, debido a la facilidad de manejo y ventajas que ofrece, sin embargo, esto ha llevado a que la cantidad de desechos no degradables se incremente en igual proporción. Una alternativa reciente es reemplazar gradualmente los plásticos a base de petróleo con polímeros biodegradable. No obstante, para su uso en el área alimenticia se requiere que cumplan con parámetros de permeabilidad al vapor de agua para asegurar la calidad del producto. Es por esto que se plantea el diseño y futura implementación de un equipo que pueda realizar el ensayo ASTM E-95-96 y valorar si dichos polímeros pueden implementarse en envolturas de alimentos.

Mediante matrices de decisión, se llevó a cabo la selección de componentes tales como fuente de calor y medición del peso. Siguiendo las recomendaciones para este ensayo, dadas por la ASTM, se planteó la construcción de una recámara donde las muestras serían evaluados en condiciones límite como temperatura de operación 25°C, la humedad relativa 53% al 100%, y que la resolución del sistema de medición sea de 1mg.

Se llevó a cabo un análisis térmico para estimar las pérdidas a través de las paredes de la estructura y por tanto determinar la potencia de la fuente de calor, la cual fue de 300W, además un análisis estático para dimensionar soportes para las muestras. Las simulaciones realizadas mostraron que la temperatura mantenía valores aceptables de variación, así como permitió un posicionamiento de las muestras y de sensores.

Palabras Clave: Permeabilidad, vapor, agua, temperatura, humedad

ABSTRACT

The use of plastics for food conservation has increased in recent years, due to its easy manipulation and different advantages, however the amount of non-degradable plastics wastes has risen in the same proportion. A recent alternative is gradually replacing the oil based plastics with biodegradable polymers. Nonetheless, for using this material in the food industry it is required to fulfill water permeability standards in order to preserve the quality of the product. Therefore, it is proposed the design and future implementation of an equipment which allows to perform the test ASTM E95-96, and evaluate if those polymers can be implemented as food enclosure.

The selection of components such as heat source and weight measuring system was carried out by using selection matrixes. Following the recommendations of the ASTM, it was proposed the building of a chamber where the samples would be evaluated in limit conditions such as operation temperature 25°C, relative humidity 53 to 100%, and system resolution 1 mg.

It was realized a thermal analysis to estimate the losses of energy through the structure and therefore determine the power of the heat source, which was 300W. Besides, it was executed a static analysis in order to dimension the supports for the samples.

The performed simulations showed that the temperature in the chamber kept acceptable values of variation, also it permitted the positioning of the samples and sensors.

Keywords: Permeability, water steam, temperature, humidity.

INDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| RESUMEN | I |
| ABSTRACT | II |
| INDICE GENERAL | III |
| ABREVIATURAS..... | VI |
| SIMBOLOGÍA..... | VII |
| INDICE DE FIGURAS | VIII |
| INDICE DE TABLAS | IX |
| INDICE DE PLANOS..... | X |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Descripción del problema..... | 1 |
| 1.2 Objetivos | 3 |
| 1.2.1 Objetivo General..... | 3 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 1.3 Marco teórico | 4 |
| 1.3.1 Permeabilidad al vapor de agua | 4 |
| 1.3.2 Medición de permeabilidad..... | 4 |
| 1.3.3 Sistema de control | 4 |
| 1.3.3.1 Sistema de lazo abierto..... | 5 |
| 1.3.3.2 Sistemas de lazo cerrado..... | 5 |
| 1.3.4 Transferencia de Calor | 6 |
| 1.3.4.1 Transferencia de calor por conducción | 6 |
| 1.3.4.2 Transferencia de calor por convección | 6 |
| 1.3.4.3 Transferencia de calor por radiación..... | 7 |
| CAPÍTULO 2 | 8 |

| | | |
|------------------|---|----|
| 2. | METODOLOGÍA DE DISEÑO | 8 |
| 2.1 | Consideraciones de Diseño | 8 |
| 2.2 | Requerimientos del proyecto..... | 8 |
| 2.3 | Alternativas de solución | 9 |
| 2.3.1 | Fuente de calor..... | 9 |
| 2.3.1.1 | Focos regulables..... | 9 |
| 2.3.1.2 | Resistencia eléctrica en contacto al aire | 10 |
| 2.3.1.3 | Calentamiento mediante placa metálica | 10 |
| 2.3.1.4 | Evaluación de alternativas de fuente de calor..... | 11 |
| 2.3.2 | Sistema de medición de peso..... | 13 |
| 2.3.2.1 | Balanza electrónica | 13 |
| 2.3.2.2 | Balanza hidráulica..... | 14 |
| 2.3.2.3 | Galgas extensiométricas..... | 15 |
| 2.3.2.4 | Evaluación de alternativas de sistema de medición de peso . | 15 |
| 2.4 | Metodología de diseño | 17 |
| CAPÍTULO 3 | | 19 |
| 3. | RESULTADOS..... | 19 |
| 3.1 | Análisis térmico | 19 |
| 3.1.1 | Pérdidas de calor en las paredes | 19 |
| 3.1.1.1 | Coeficiente convectivo interno | 20 |
| 3.1.1.2 | Coeficiente convectivo externo | 22 |
| 3.1.1.3 | Flujo de calor y espesor de aislante..... | 23 |
| 3.1.2 | Pérdidas en plancha de Aluminio | 25 |
| 3.1.3 | Pérdidas en esquinas y bordes | 27 |
| 3.1.4 | Energía usada en calentamiento del aire | 28 |
| 3.1.5 | Energía usada en calentamiento de la carga | 29 |
| 3.2 | Análisis estático | 30 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| 3.2.1 | Dimensionamiento del soporte de la rejilla | 32 |
| 3.2.2 | Análisis para soporte de platina..... | 33 |
| 3.3 | Simulación y modelo matemático..... | 34 |
| 3.4 | Elaboración y evaluación del prototipo..... | 38 |
| 3.5 | Análisis de Costos..... | 42 |
| 3.5.1 | Costos directos | 42 |
| 3.5.2 | Costos indirectos | 42 |
| CAPÍTULO 4 | | 44 |
| 4. | Discusión y conclusiones | 44 |
| 4.1 | Conclusiones..... | 45 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 45 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 46 |
| APÉNDICES..... | | 47 |
| ANEXO A..... | | 48 |
| PLANOS | | 52 |

ABREVIATURAS

| | |
|-------|---|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral. |
| ASTM | American Society for testing materials (Sociedad Americana de ensayos de materiales). |
| FIMCP | Facultad de ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. |
| IECA | Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones |
| AISI | American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero) |

SIMBOLOGÍA

| | |
|----|---------------|
| °C | Grado Celsius |
| °K | Grado Kelvin |
| cm | Centímetro |
| g | Gramo |
| J | Joule |
| Kg | kilogramo |
| m | Metro |
| mg | Miligramo |
| mm | Milímetro |
| N | Newton |
| Pa | Pascal |
| s | Segundo |
| u | Unidad |
| V | Voltio |
| W | Watts |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Condiciones actuales en las que se realiza el ensayo | 2 |
| Figura 1.2: Esquema de un sistema de lazo abierto. | 5 |
| Figura 1.3: Esquema de un sistema de control de lazo cerrado..... | 5 |
| Figura 1.4: Mecanismos de Transferencia de Calor..... | 6 |
| Figura 2.1: Modelo de distribución de temperatura en un bombillo | 9 |
| Figura 2.2: Ejemplo de resistencia eléctrica. | 10 |
| Figura 2.3: Balanza electrónica para laboratorio | 14 |
| Figura 2.4: Balanza hidráulica, uso industrial | 14 |
| Figura 2.5: Esquema de funcionamiento de las galgas extensiométricas | 15 |
| Figura 2.6: Flujograma de diseño del sistema..... | 18 |
| Figura 3.1: Analogía termoeléctrica para transferencia de calor | 23 |
| Figura 3.2: Pérdida de calor vs espesor de aislante..... | 25 |
| Figura 3.3: Esquema de flujo de calor para plancha de aluminio | 26 |
| Figura 3.4: Potencia perdida en placa vs espesor de placa | 27 |
| Figura 3.5: Diagrama de cuerpo libre de la rejilla, vista frontal..... | 31 |
| Figura 3.6: Esquema de análisis nodal para distribución de temperatura | 35 |
| Figura 3.7: Balance energético, nodo i,j. | 35 |
| Figura 3.8: Distribución de temperatura mediante análisis nodal. | 36 |
| Figura 3.9: Temperatura vs Altura..... | 37 |
| Figura 3.10: Distribución de temperatura en paredes del sistema | 37 |
| Figura 3.11: Distribución de temperatura, vista lateral. | 38 |
| Figura 3.12: Equipo antes de las modificaciones | 39 |
| Figura 3.13: Preparación de los desecadores | 39 |
| Figura 3.14: Pruebas del prototipo con sensores de temperatura..... | 40 |
| Figura 3.15: Etapa de corrección para muestras de temperatura | 40 |
| Figura 3.16: Evaluación de sensores de humedad | 41 |
| Figura 3.17: Versión final del prototipo..... | 42 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1: Valores de Calificación de criterios..... | 11 |
| Tabla 2.2: Matriz de ponderación para selección de fuente de calor | 12 |
| Tabla 2.3: Matriz de selección para fuente de calor | 13 |
| Tabla 2.4: Matriz de ponderación para el sistema de medición de peso | 16 |
| Tabla 2.5: Matriz de decisión para elemento de medición de peso | 17 |
| Tabla 3.1: Propiedades de materiales en la estructura | 20 |
| Tabla 3.2: Propiedades del Aire a 25°C | 20 |
| Tabla 3.3: Propiedades del Aire a 19°C | 22 |
| Tabla 3.4: Propiedades del Aire a 30°C | 26 |
| Tabla 3.5: Pérdidas a través de esquinas y bordes..... | 28 |
| Tabla 3.6: Resumen de pérdidas de calor..... | 28 |
| Tabla 3.7: Detalle de costos directos del proyecto..... | 43 |

INDICE DE PLANOS

PLANO 1: Vista explosionada

PLANO 2: Vista general

PLANO 3:Detalle de ensamblado

PLANO 4: Estructura interna

PLANO 5: Tapa frontal

PLANO 6: Resistencia eléctrica

PLANO 7: Platina de aluminio

PLANO 8: Puerta

PLANO 9: Pared lateral externa

PLANO 10: Pared superior externa

PLANO 11: Pared inferior externa

PLANO 12: Pared posterior externa

PLANO 13: Soporte en voladizo

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las necesidades de la industria alimenticia y la urgencia de reducir el uso de plásticos o bien que no permanezcan por largo tiempo en nuestro ambiente ha llevado al desarrollo de distintos polímeros, los cuales deben cumplir, aparte de las exigencias nacionales e internacionales para el manejo de alimentos, dos propiedades clave: Resistencia Mecánica y Permeabilidad al vapor de agua.

Éste último parámetro refleja la cantidad de vapor que se transmite a través de un material, con determinado espesor y área, siendo la humedad un factor importante al momento de conservar alimentos usando polímeros como envoltorio, lo que influiría directamente en el tiempo de vida y la calidad del producto.

Por ello, el desarrollo de un equipo que permita validar la calidad de films de plásticos biodegradables no solamente asegura un producto en condiciones óptimas al consumidor final, sino que además reduce pérdidas en la mayor parte de la línea de distribución, dado que se disminuye la pérdida de producto y se facilita el almacenamiento.

Es de resaltar, además, que la implementación de este equipo facilitaría de gran manera a estudiantes de la carrera de Ingeniería en Alimentos, quienes podrían mejorar su formación académica con este ensayo, e incluso, puede replicarse este proyecto en distintos institutos de educación superior.

1.1 Descripción del problema

Actualmente, en la ESPOL se cuenta con un equipo especializado en la medición de permeabilidad al oxígeno a través de films, pero no se encuentra en estado operativo, y su reparación sería muy costosa, así como con un equipo de medición de permeabilidad al vapor de agua, en igual estado.

Debido a ello, los estudiantes de Ingeniería en Alimentos han optado por improvisar este ensayo construyendo un equipo mediante distintos componentes y accesorios como se muestra en la Figura 1.1. Esta configuración permite realizar la medición de forma manual, lo que implica un aumento en tiempos de espera de las tomas de datos, así como la ampliación del margen de error en el sistema

Identificando y describiendo el equipo en su estado actual, se puede notar que no posee sensores o mecanismos de control, así como una estructura que garantice la fiabilidad del estudio a realizarse.

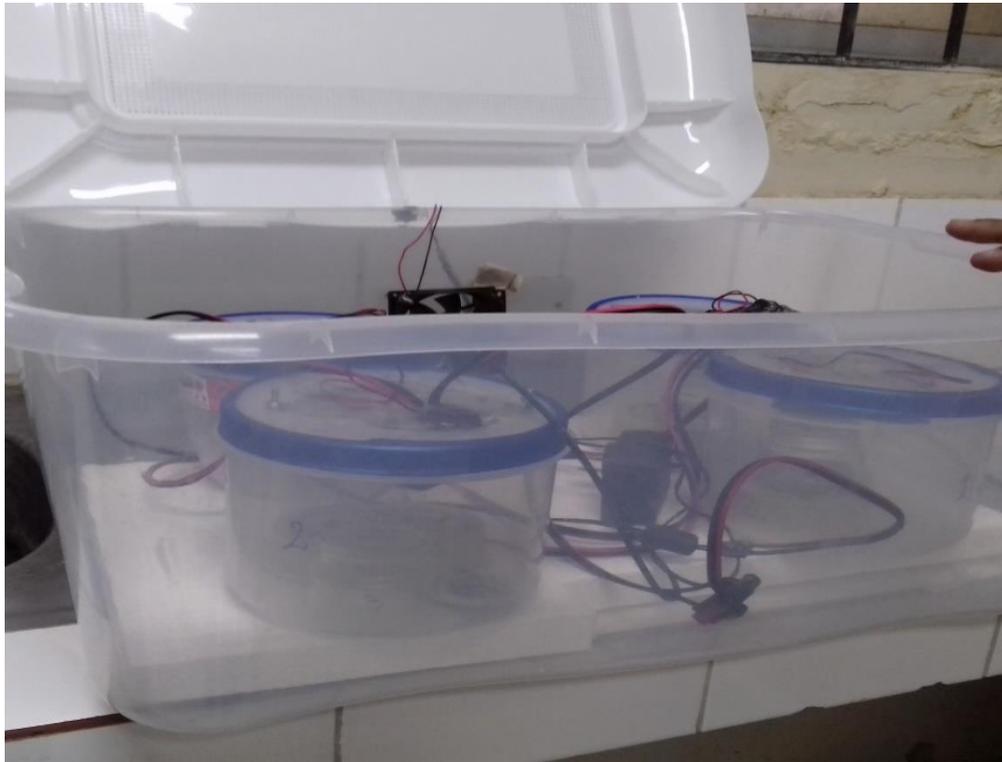


Figura 1.1: Condiciones actuales en las que se realiza el ensayo

Fuente: Elaboración propia

Posee ventiladores de computadora para obligar a circular el aire, lo cual no corresponde a lo requerido por la ASTM, y además no dispone de una balanza, por lo que las muestras deben ser trasladadas manualmente para la medición alterando los resultados.

El sistema además solo puede operar cercanamente a lo requerido en condiciones de temperatura promedio en la ciudad, pero en días demasiado soleados, o por el contrario en días lluviosos, las pruebas no pueden ser llevadas a cabo.

Por último, a pesar que el ensayo debe ser realizado en un tiempo total de 24 horas, éste debía ser monitoreado constantemente debido a que los ventiladores tendían a apagarse de improviso.

1.2 Objetivos

Una vez culminado el proyecto, los objetivos propuestos a continuación deberán satisfacer los requerimientos ya mencionados. Éstos objetivos además se enfocarán en los componentes principales del equipo.

1.2.1 Objetivo General

- Diseñar un equipo de medición de permeabilidad al vapor de agua para films plásticos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un equipo que pueda cumplir con el método modificado E96-95 de medición de permeabilidad al vapor de agua
- Diseñar la estructura, así como componentes mecánicos del equipo, los cuales permitan la medición de 3 muestras al mismo tiempo.
- Elaborar un sistema de control de regulación de temperatura, permitiendo mantener ésta última en 25°C.
- Desarrollar un sistema automático que permita llevar a cabo la medición, así como la captación y procesamiento de datos, y posteriormente comparar resultados con otro equipo.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Permeabilidad al vapor de agua

Se denota como permeabilidad al grado de transferencia de una sustancia a través de un material. Esta transferencia se produce debido a los espacios entre las moléculas del material, por ende, cualquier material sin excepción tiene cierto grado de permeabilidad.

Entonces, la permeabilidad al vapor de agua, en consecuencia, es el grado de transferencia de vapor de agua a través de un material dado. Éste va a estar limitado por distintos factores como espesor y naturaleza del material, temperatura ambiente, flujo de aire, entre otros.

1.3.2 Medición de permeabilidad

El método de medición a usarse es una variación del método gravimétrico ASTM E96-95, para un gradiente de humedad relativa entre 53 a 100%. Las muestras de film son montadas en copas o bases de aluminio, dentro de las cuales se les es agregado 5 ml de agua destilada. Cada copa es introducida dentro de desecadores, los que dentro del horno (el cual mantendría la temperatura) tendrían ventiladores en la parte superior homogeneizando la atmósfera. Cada 1,5 horas se tomaría muestras de peso con los sensores durante 24 horas. Finalmente, mediante análisis de regresión, se obtendría la pendiente de los datos de peso frente al tiempo, dividido para el área del film (McHugh, Bustillo, & Krochta, 1993).

1.3.3 Sistema de control

Se denomina sistema de control al conjunto de subsistemas o procesos que tiene como finalidad regular la salida de dichos procesos, esto es, produciendo la salida para una entrada o estímulo dado.

El uso de sistemas de control ha avanzado conforme el paso del tiempo, y ha facilitado de sobremanera los procesos en la industria, no solo reduciendo la interferencia humana en el ciclo, sino que además se

consigue precisiones que de otra forma serían imposibles, así como un aumento en la eficiencia del proceso (Nise, 2004).

En general los sistemas de control pueden separarse en dos clases:

1.3.3.1 Sistema de lazo abierto

Son comandados por la entrada del sistema, y son incapaces de corregir perturbaciones(Figura 1.2). Ejemplos de esto son sistema de masa resorte, tostadores, etc.

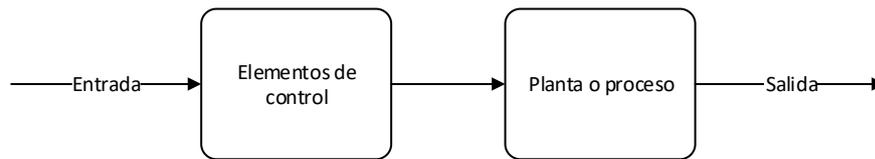


Figura 1.2: Esquema de un sistema de lazo abierto.

Fuente: Elaboración propia

1.3.3.2 Sistemas de lazo cerrado

Es capaz de compensar perturbaciones mediante la medición de la respuesta de salida, y comparando con la entrada. En caso de haber diferencia la planta actuaría para realizar la corrección(Figura 1.3).

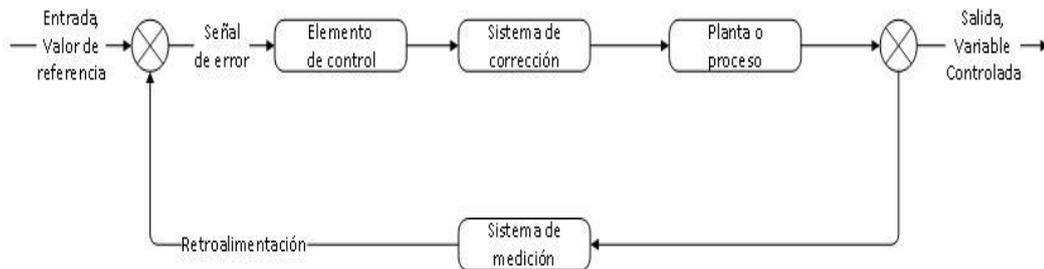


Figura 1.3: Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.

Fuente: Elaboración propia

De forma ideal, un sistema de control debería ser capaz de:

- Garantizar estabilidad y soportar perturbaciones.
- Llegar a la mayor eficiencia posible, de tal forma que la acción sobre la variable de entrada no sea de forma irreal o brusca.
- Ser fácil de implementar y de uso cómodo. (Universidad Politécnica de Cataluña).

1.3.4 Transferencia de Calor

Como se ha mencionado, uno de los requisitos para el ensayo es mantener la temperatura del aire en el desecador donde se encuentre la muestra en 25°C, por lo que será necesario una fuente de calor. Sin embargo, el calor no llegará inmediatamente al aire, sino que primero atravesará distintos mecanismos de transferencia de calor, los cuales se pueden esquematizar en la Figura 1.4 a continuación.

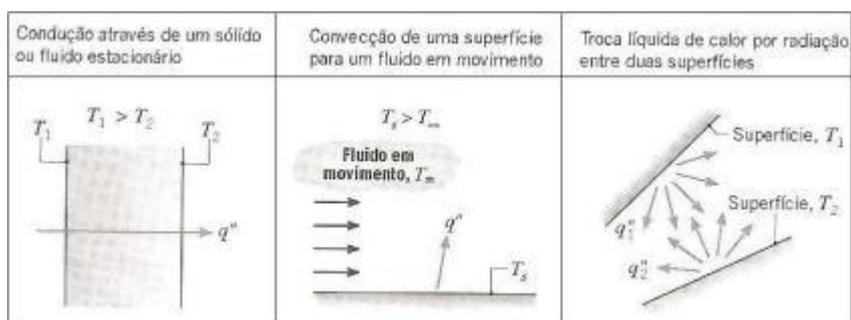


Figura 1.4: Mecanismos de Transferencia de Calor.

Fuente: Incropera, 1999

La transferencia de calor se puede definir como la energía en tránsito o circulación debido a un cambio o diferencia de temperaturas. Dadas las condiciones en las cuales se produce el paso de energía, se puede tener:

1.3.4.1 Transferencia de calor por conducción

Es la transferencia de energía entre partículas que interactúan mediante contacto directo, la misma que se da desde partículas más energéticas hacia las menos energéticas. (Incropera, 1999) Generalmente es más representativa en los sólidos, dado que es el estado en el que los átomos se encuentran más unidos entre sí.

1.3.4.2 Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección es el traslado de energía debido a la interacción y al movimiento global de las partículas de un fluido. Al haber una diferencia de temperatura, ésta provoca que el fluido altere su densidad, por lo que las moléculas se trasladarían, provocando movimiento general y a la vez transporte de energía.

1.3.4.3 Transferencia de calor por radiación

La radiación térmica es la liberación de energía por la materia, la cual se encuentra a una determinada temperatura finita. Esta forma de transferencia de energía no precisa de un medio material, diferenciándose de la conducción o la convección, debido a que la energía es transportada en forma de ondas electromagnéticas. (Incropera, 1999).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

En esta sección se detallan las alternativas de solución, dados los antecedentes planteados en el capítulo anterior. Se lleva a cabo además la selección de alternativas mediante matrices de decisión, con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos.

2.1 Consideraciones de Diseño

- Capacidad para operar con 3 muestras al mismo tiempo.
- El sistema debe ser capaz de regular, distribuir y mantener la temperatura indicada por el ensayo.
- Sistema de medición de peso suficientemente sensible
- Capacidad para registrar las lecturas de cada muestra independientemente.
- Debe asegurarse además la integridad de las muestras, y permanecer operativo más de 24 horas.

2.2 Requerimientos del proyecto

- Estructura de Acero inoxidable, en respuesta a la corrosión.
- Sistema de control de temperatura, incluyendo una fuente de calor, manteniendo la temperatura del aire en las muestras en 25°C.
- Espacio suficiente para colocar y manipular 3 muestras de films a la vez, las cuales irán dentro de desecadoras de 15 cm de diámetro cada una.
- Sensores de temperatura.
- Sistema de medición de peso (+/-0,001g).
- Programa de captura y proceso de las lecturas tomadas.

2.3 Alternativas de solución

2.3.1 Fuente de calor

Dado que no en todo el año tendremos la temperatura requerida para el ensayo en el ambiente, y que además en general los laboratorios de prueba la temperatura bordea los 18°C, se requerirá el uso de una fuente de calor. Además, ya que el sistema debe permanecer aislado, se requiere de una fuente de calor interna. Se propone las siguientes alternativas.

2.3.1.1 Focos regulables

En esta alternativa se utilizaría focos incandescentes para la generación de calor dentro del equipo, se utilizaría un bombillo para cada uno de los desecadores. Esto conlleva a su vez que para cada bombillo debe realizarse un proceso de control por separado, permitiendo teóricamente una regulación individual y más exacta.

Aunque pueda tener un aceptable tiempo de respuesta, en general los focos poseen un rango de error de +/- 2°C. Otra desventaja radica en el tiempo de vida de los bombillos, y dado que además existe transferencia por convección tanto dentro como fuera del foco (Figura 2.1), si se necesitase modelarlo sería un modelo en cierta forma complejo (Fric, 2010).

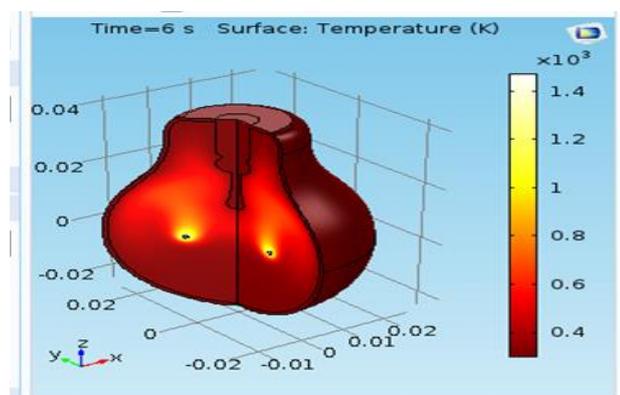


Figura 2.1: Modelo de distribución de temperatura en un bombillo

Fuente: (Emaze, 2015)

2.3.1.2 Resistencia eléctrica en contacto al aire

Para esta alternativa, se implementaría una resistencia eléctrica en el centro del equipo, la cual generaría calor para las tres desecadoras. Regulando el paso de corriente a la misma podemos variar su potencia y a su vez el calor.

Es un elemento de instalación sencilla, además que prácticamente toda la potencia que consume será convertida en calor. En general las resistencias eléctricas (Figura 2.2) como elemento de corrección de un sistema de control poseen un rango de error de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, permitiéndonos una regulación más exacta.

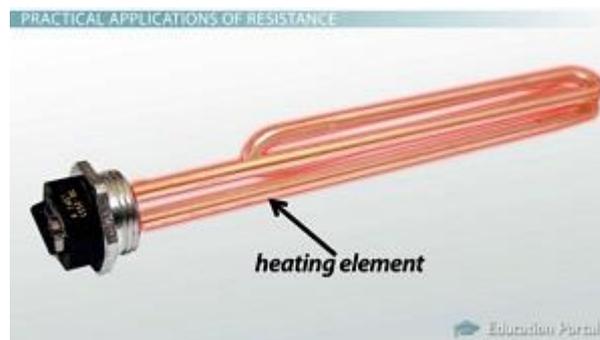


Figura 2.2: Ejemplo de resistencia eléctrica.

Fuente: (Study, 2017)

2.3.1.3 Calentamiento mediante placa metálica

Para esta opción, se ocuparía una resistencia eléctrica para calentar una placa metálica, la cual a su vez calentaría el aire, y éste llegaría a las muestras mediante la circulación de aire de los ventiladores a usarse.

Nótese que en esta configuración la resistencia no tiene contacto directo con las muestras, y a su vez la radiación emitida por este elemento no afectaría el ambiente.

A pesar que el tiempo de respuesta no es instantáneo en esta configuración, es un detalle que puede ser corregido mediante el sistema de control.

2.3.1.4 Evaluación de alternativas de fuente de calor

Para seleccionar nuestra fuente de calor, se tendrá en cuenta distintos factores como:

- **Tiempo de respuesta:** Este parámetro determina qué tan rápido el sistema puede corregir y estabilizar la temperatura.
- **Costo:** Dado que los demás componentes del sistema tienen un elevado precio, como los sensores o los desecadores, Se calificará 1 como el más costoso y 5 el más barato.
- **Tamaño:** Un equipo demasiado grande implicaría aumentar la cantidad de material a utilizar para la estructura.
- **Facilidad de instalación:** Un elemento que sea demasiado complejo para su implementación ocasionaría problemas al momento del mantenimiento.
- **Tiempo de Vida:** Permitiría tener el equipo final el mayor tiempo posible operando. Dado que el equipo requiere operar en intervalos largos, se espera sea elevado.

Para evaluar los criterios, se comienza asignando valores acordes a la importancia de los mismos en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Valores de Calificación de criterios

| Valoración | Descripción |
|------------|---------------------|
| 1 | Igual de importante |
| 2 | Más importancia |
| 3 | Mayor importancia |

Fuente: Elaboración propia

La ponderación de cada criterio, acorde a su importancia se muestra a continuación en la Tabla 2.2

Tabla 2.2: Matriz de ponderación para selección de fuente de calor

| Criterio | Tiempo de respuesta | Costo | Tamaño | Facilidad de instalación | Tiempo de vida | Total parcial | Ponderación |
|--------------------------|---------------------|-------|--------|--------------------------|----------------|---------------|-------------|
| Tiempo de respuesta | - | 2 | 2 | 2 | 1 | 7 | 32% |
| Costo | 0.5 | - | 1 | 2 | 1 | 4.5 | 20% |
| Tamaño | 0.5 | 1 | - | 1 | 1 | 3.5 | 16% |
| Facilidad de instalación | 0.5 | 0.5 | 1 | - | 1 | 3 | 14% |
| Tiempo de vida | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 4 | 18% |
| Total | | | | | | 22 | 100% |

Fuente: Elaboración propia

Se seleccionó como parámetros más relevantes al tiempo de respuesta y costo, dado que, siendo un ensayo con un control de temperatura lo suficientemente delicado, es importante que nuestro sistema reaccione de forma rápida.

El costo también fue un factor clave, pues si bien, aunque ninguna de las opciones tenga un costo exorbitante, otros elementos del proyecto como son los sensores o las balanzas, e incluso las desecadoras y las copas de aluminio ya de por sí son de alto costo.

Ya definidos los factores y cómo se realizaría la calificación, se procede a evaluar las alternativas de solución, lo cual es mostrado en la Tabla 2.3. La alternativa ganadora para la fuente de calor sería la cámara de aire precalentado, con un 75% de puntaje.

Tabla 2.3: Matriz de selección para fuente de calor

| Criterio | Focos | Resistencia (aire) | Resistencia (placa) |
|---------------------------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|
| Tiempo de respuesta (32%) | 25% | 15% | 28% |
| Costo (20%) | 15% | 15% | 10% |
| Tamaño (16%) | 13% | 10% | 10% |
| Facilidad de instalación (14%) | 13% | 13% | 10% |
| Tiempo de Vida (18%) | 5% | 12% | 17% |
| Total | 71% | 65% | 75% |

Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Sistema de medición de peso

El método gravimétrico modificado E96-95 se basa en la diferencia de peso que ocurre a lo que el vapor de agua atraviesa las muestras, por lo que es vital un adecuado sistema de medición de peso. Como se mencionó, éste debe ser sensible a los cambios de peso de las muestras, y además debe proporcionar lecturas fieles a la temperatura de trabajo

Se propone las siguientes alternativas:

2.3.2.1 Balanza electrónica

Las Balanzas electrónicas, como la que se muestra en la Figura 2.3, son elementos de medición de peso de alta precisión, en muchos casos pueden alcanzar décimas de miligramos y cuentan incluso con conexión a un ordenador, facilitando la captación de datos. Presentan, sin embargo, un costo elevado localmente.



Figura 2.3: Balanza electrónica para laboratorio

Fuente: (Blog de Instrumentos de Laboratorio, 2017)

2.3.2.2 Balanza hidráulica

Estas balanzas funcionan mediante diferencia de presiones y áreas en un sistema con un fluido y plataformas. Útiles para cargas elevadas, aunque pueden acondicionarse de ser necesario para cargas pequeñas, sin embargo, puede ser dificultosa su instalación al ser de tamaño considerable. En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de este tipo de balanzas.



Figura 2.4: Balanza hidráulica, uso industrial

Fuente: (Blog de Balanzas industriales, 2012)

2.3.2.3 Galgas extensiométricas.

Las galgas extensiométricas, cuyo esquema se muestra en la Figura 2.5, son elementos que permiten medir la deformación: al alterarse la distancia entre ellas, se genera una diferencia de voltaje (MB instrumentos, 2014). Usando este principio, se puede diseñar un elemento de medición exclusivo para nuestro proyecto, pero antes de su aplicación deben ser debidamente probado y calibrado.

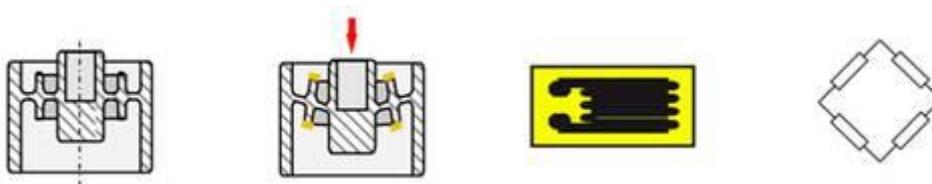


Figura 2.5: Esquema de funcionamiento de las galgas extensiométricas

Fuente: (MB instrumentos, 2014)

2.3.2.4 Evaluación de alternativas de sistema de medición de peso

Se considerará los siguientes parámetros para la selección del sistema de medición de peso:

- **Sensibilidad:** Este factor indica que la señal más pequeña que puede detectar o reaccionar un cambio o estímulo. Para cambios de carga menores, se requiere un dispositivo de alta sensibilidad.
- **Costo:** Se busca un dispositivo con el menor costo, de ser posible, dado que en general este tipo de sistemas tienen un costo elevado
- **Resolución:** Se denomina como la mínima variación que puede provocar una respuesta perceptible. Se requiere para este ensayo una resolución verdaderamente significativa.
- **Tamaño:** un dispositivo de gran tamaño implicaría un aumento en el tamaño de la estructura, así como elevación de costo y disposición de otros componentes.
- **Tiempo de vida:** indica en qué medida podremos seguir usando el dispositivo, sin tener que reemplazarlo, lo que involucraría re inversión y parada innecesaria del sistema.

Con la misma valoración presentada en la Tabla 2.1, procedemos a realizar la matriz de ponderación. Acorde a la Tabla 2.4, el parámetro

que representa mayor peso es la resolución, dado que los cambios de peso a medirse están en el rango de 0.001g, lo que además va de la mano con el segundo parámetro más representativo, que es la sensibilidad del sistema. El tiempo de vida del dispositivo también resultó prioritario, para evitar recaer en reinversiones y mantenimiento.

Tabla 2.4: Matriz de ponderación para el sistema de medición de peso

| Criterio | Sensibilidad | Costo | Tamaño | Resolución | Tiempo de vida | Total parcial | Ponderación |
|------------------------------------|---------------------|--------------|---------------|-------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Sensibilidad | - | 1 | 2 | 1 | 1 | 5 | 22% |
| Costo | 1 | - | 2 | 0.5 | 0.5 | 4 | 17% |
| Tamaño | 0.5 | 0.5 | - | 0.5 | 0.5 | 2 | 9% |
| Resolución | 1 | 2 | 2 | - | 1 | 6 | 26% |
| Facilidad de implementación | 1 | 2 | 2 | 1 | - | 6 | 26% |
| Total | | | | | | 23 | 100 |

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la ponderación, procedemos a calificar las distintas opciones de solución.

Como alternativa ganadora, tenemos la balanza electrónica, con un valor de 86%, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla A3 de la sección Anexos. Si bien es cierto que su costo es elevado localmente, pueden ser importadas con el debido tiempo; además, facilitan de sobremanera el desarrollo del proyecto, puesto que sólo es necesario ubicarlas y conectar al sistema de adquisición de datos.

Si bien el sistema mediante galgas extensiométricas reduciría los costos y además tiene una excelente precisión, así mismo es relativamente complicado de ejecutar, pues se requiere de tolerancias diminutas.

Por último, la balanza hidráulica no cumple con los requisitos del proyecto

El detalle de las calificaciones se muestra en la Tabla 2.5

Tabla 2.5: Matriz de decisión para elemento de medición de peso

| Criterio | Balanza electrónica | Balanza hidráulica | Galgas extensiométricas |
|--|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Sensibilidad (22%) | 22% | 0% | 22% |
| Costo (17%) | 5% | 10% | 15% |
| Tamaño (9%) | 7% | 3% | 9% |
| Resolución (26%) | 26% | 0% | 24% |
| Facilidad de implementación (26%) | 26% | 15% | 15% |
| Total | 86% | 28% | 85% |

Fuente: Elaboración propia

2.4 Metodología de diseño

Detallando el flujograma de la Figura 2.6, las etapas a seguir son las siguientes:

- **Definición:** En esta etapa se inicia con la identificación de la planta, se prosigue con la recolección de información y la definición de requerimientos, limitantes y condiciones.
- **Diseño preliminar:** Con los requerimientos y especificaciones ya definidos, se procede a seleccionar posibles alternativas de diseño, las cuales son evaluadas y calificadas, con el fin de escoger la más adecuada. Se realiza además distintos bocetos del posible equipo, con las distintas opciones de solución.
- **Diseño detallado:** Con la solución seleccionada, se procede a determinar y calcular tamaño y espesor de la estructura del equipo,

elementos de corrección para el sistema de control, sistema de medición de peso, entre otros.

- **Evaluación:** Se prepara el prototipo del equipo, y se realizan distintas pruebas para certificar su correcto funcionamiento. En caso de no cumplirse de forma exitosa se realizan correcciones y calibraciones.
- **Documentación:** Al tener resultados satisfactorios, procedemos a detallar y archivar la experiencia, así como la debida presentación del proyecto.

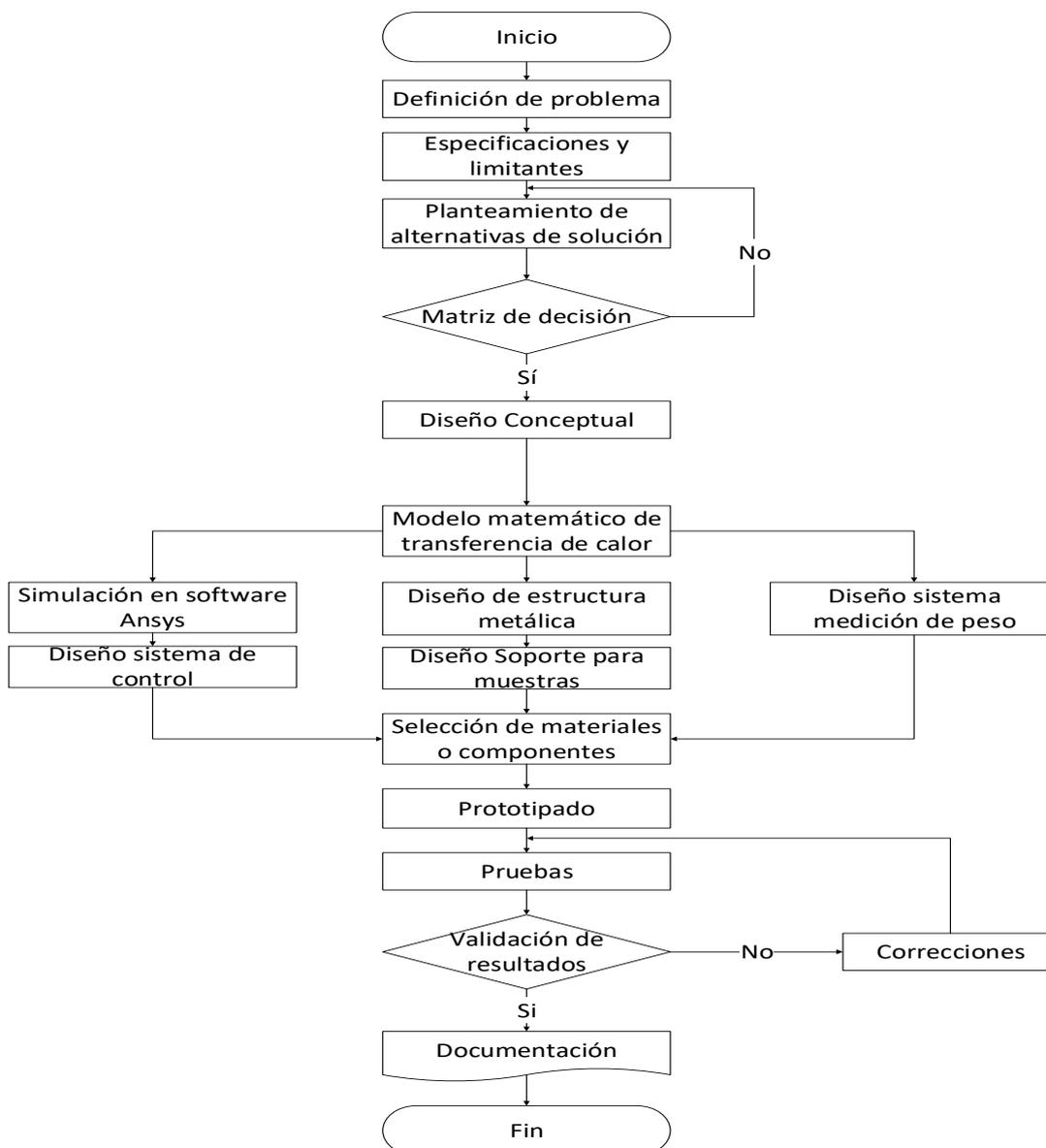


Figura 2.6: Flujograma de diseño del sistema

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Análisis térmico

Para la selección de la resistencia eléctrica, es necesario determinar las pérdidas de calor a través de la estructura metálica, así como la energía por unidad de carga, lo que se muestra en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$P_{total} = \dot{Q}_{pérdidas} + \dot{Q}_{aire} + \dot{Q}_{carga} \quad (3.1)$$

Donde:

- $\dot{Q}_{pérdidas}$: Calor perdido a través de las paredes, esquinas, etc.
- \dot{Q}_{aire} : Energía necesaria para calentar el aire dentro del ambiente hasta la temperatura necesaria.
- \dot{Q}_{carga} : Energía necesaria para calentar el agua y los desecadores.

Para este análisis se tiene las siguientes consideraciones:

- Estado estable
- Conducción unidireccional
- Coeficientes convectivos constantes y uniformes

3.1.1 Pérdidas de calor en las paredes

Para calcular las pérdidas de calor a través de las paredes se considera la temperatura interior en 25°C, mientras que la temperatura del ambiente en 18°C. Se asume además una temperatura exterior de 20°C. Este análisis consiste en determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección, siendo el interno considerado como convección forzada y el exterior como convección natural.

En la Tabla 3.1 se expone la conductividad térmica de los componentes de las paredes del sistema. Dichos valores serán usados para cálculos posteriores.

Tabla 3.1: Propiedades de materiales en la estructura

| Elemento | Material | Conductividad Térmica $\left[\frac{W}{m * K} \right]$ |
|---------------|---------------------------|---|
| Pared Interna | Acero inoxidable AISI 316 | 16,3 |
| Aislante | Poliuretano | 0,023 |
| Pared Externa | Acero inoxidable AISI 316 | 16,3 |

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.1 Coeficiente convectivo interno

En estos cálculos se aplicará ecuaciones de convección forzada, debido a que existe un ventilador que obliga al aire a moverse en el lugar. Siendo la temperatura interna 25°C, se asume un descenso de 2°C al entrar en contacto con la pared, por lo que obtendríamos la temperatura de película (T_{m1}) para evaluar las propiedades térmicas del aire. Se tiene entonces:

$$T_{m1} = \frac{25 + 23}{2} = 24^{\circ}C = 297.15^{\circ}K$$

A dicha temperatura se obtiene las propiedades mostradas en la Tabla 3.2

Tabla 3.2: Propiedades del Aire a 25°C

| Propiedad | Unidades | Valor |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Conductividad Térmica | $\frac{W}{m * K}$ | $26,3 * 10^{-3}$ |
| Viscosidad cinemática | $\frac{m^2}{s}$ | $15,89 * 10^{-6}$ |
| Número de Prandtl | - | 0.7 |

Fuente: Elaboración propia

Asumiendo el entorno como un ducto rectangular, se procede a calcular el diámetro hidráulico, representado por la ecuación (3.2, donde p es el perímetro y A_c es el área.

$$D_H = \frac{4A_c}{p} \quad (3.2)$$

$$D_H = \frac{4(0.4 * 0.9)}{(2)(0.4 + 0.9)} = 0.55m$$

Se toma la velocidad promedio del aire, V_{prom} , como 2.53 m/s, debido a las indicaciones del ensayo, y junto con los valores de diámetro hidráulico D_H y la viscosidad cinemática ν en la ecuación (3.3, se procede a determinar el número de Reynolds.

$$Re = \frac{V_{prom}D_H}{\nu} \quad (3.3)$$

$$Re = \frac{2.53 * 0.55}{15.89 * 10^{-6}} = 87570.8$$

Siendo el número de Reynolds mayor a 10^5 , se considera como flujo turbulento, por lo que, para un ducto con flujo turbulento con flujo completamente desarrollado, en el cual exista enfriamiento, se utiliza la correlación representada por la ecuación (3.4, obtenida de la tabla A2, Anexo A.

$$\overline{Nu}_D = 0,023Re^{4/5}Pr^{0,3} \quad (3.4)$$

$$\overline{Nu}_D = 0,023 (87570.8)^{4/5}(0.7)^{0.3} = 186.4$$

Con el número de Nusselt (\overline{Nu}_D), que representa el gradiente de temperatura adimensional en la superficie, procedemos a estimar el coeficiente convectivo interior (\bar{h}_i), mediante la ecuación (3.5:

$$\bar{h}_i = \frac{k * \overline{Nu}_D}{D_H} \quad (3.5)$$

$$\bar{h}_i = \frac{(26,3 * 10^{-3})(186.4)}{0.55} = 8.9 W/m^2 * K$$

3.1.1.2 Coeficiente convectivo externo

Para el análisis del exterior de la pared, se considera una temperatura promedio de 18°C en el laboratorio, y que se presenta convección natural asumiendo además que el aire tiende a estar en reposo.

Evaluando la temperatura a la temperatura de película T_{m2} , siendo ésta la temperatura promedio entre la superficie (suponiendo 20°C) y el ambiente, obtenemos las propiedades térmicas del aire, las que se pueden apreciar en la tabla 3.3

$$T_{m2} = \frac{20 + 18}{2} = 19^{\circ}\text{C} = 292.15^{\circ}\text{K}$$

Tabla 3.3: Propiedades del Aire a 19°C

| Propiedad | Unidades | Valor |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Conductividad Térmica | $\frac{W}{m \cdot K}$ | 0.02581 |
| Viscosidad cinemática | $\frac{m^2}{s}$ | $13.22 \cdot 10^{-6}$ |
| Número de Prandtl | - | 0.7271 |

Fuente: Elaboración propia

Para este caso, determinamos el número de Grashof, que relaciona las fuerzas de empuje con las fuerzas viscosas, mediante la ecuación (3.6:

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})L^3}{\nu^2} \quad (3.6)$$

Donde:

- g : aceleración gravitacional ($\frac{m}{s^2}$), se asume 9.81
- β : coeficiente de expansión volumétrica ($\frac{1}{K}$), idealizando para gases ideales $\beta = \frac{1}{T}$
- T_s : Temperatura superficial o de pared ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{∞} : Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
- L : Longitud característica de la pared (m)
- ν : Viscosidad cinemática ($\frac{m^2}{s}$)

Calculando, se obtiene:

$$Gr_L = \frac{9.81 * \frac{1}{292.15} (20 - 18)(0.45)^3}{(13.22 * 10^{-6})^2}$$

$$Gr_L = 35016097.54$$

Siendo Grashof menor a 10^9 , se considera al aire en reposo como fluido en estado laminar, procediendo a determinar el número de Rayleigh (Ecuación (3.7)) y posteriormente a aplicar la correlación de este parámetro con el número de Nusselt (Ecuación (3.8)).

$$Ra_L = Gr_L * Pr \tag{3.7}$$

$$Ra_L = (3.5 * 10^7)(0.7271) = 2.55 * 10^7$$

$$\overline{Nu}_D = 0.1Ra_L^{1/3} \tag{3.8}$$

$$\overline{Nu}_D = 0.1(2.55 * 10^7)^{1/3} = 29.41$$

Finalmente, relacionamos el coeficiente de convección externo con el número de Nusselt, indicado en la ecuación (3.9).

$$\bar{h}_o = \frac{k * \overline{Nu}_L}{L} \tag{3.9}$$

$$\bar{h}_o = \frac{(25.8 * 10^{-3})(29.41)}{0.45} = 1.68 \text{ W/m}^2 * K$$

3.1.1.3 Flujo de calor y espesor de aislante

Para determinar el espesor de aislante necesario, se modela las paredes del equipo como se muestra en la Figura 3.1.

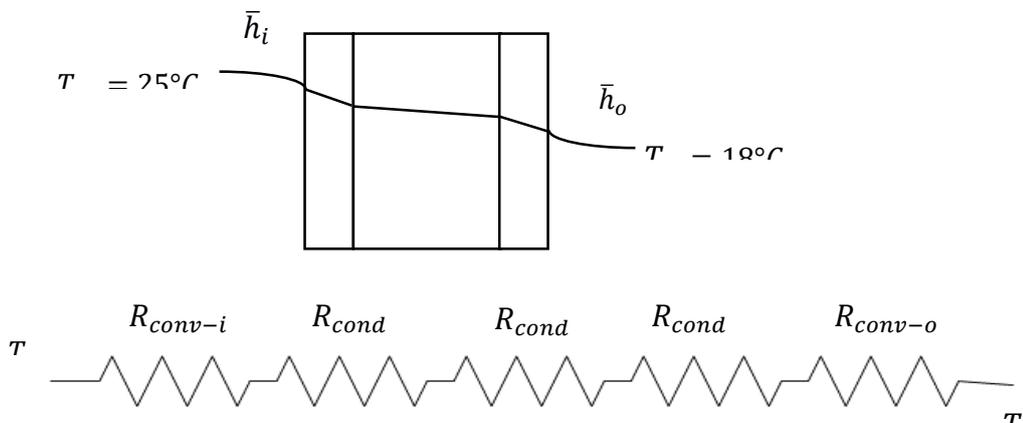


Figura 3.1: Analogía termoeléctrica para transferencia de calor

Fuente: Elaboración propia

El flujo de calor a través de la pared será, acorde a la ecuación (3.10):

$$Q = \frac{T_{op} - T_{\infty}}{\frac{1}{A} \left(\frac{1}{\bar{h}_i} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{\bar{h}_o} \right)} \quad (3.10)$$

Donde:

- T_{op} : Temperatura de operación del equipo.
- T_{∞} : Temperatura en los alrededores.
- A : Área de la pared.
- k_i : Conductividad térmica del material.
- \bar{h}_i : Coeficiente convectivo interno.
- \bar{h}_o : Coeficiente convectivo externo.
- e_1 : Espesor pared interna.
- e_2 : Espesor aislante.
- e_3 : Espesor pared externa.

Siendo las paredes internas y externas de acero inoxidable, poseerán el mismo valor de k , e_1 y e_3 tendrán un valor de 0.5mm. Por lo que la ecuación anterior puede ser expresada en función del espesor del aislante e_2 luego de reemplazar los valores previamente mencionados o calculados

$$Q = \frac{25 - 18}{\frac{1}{(0.4)(0.45)} \left(\frac{1}{8.9} + \frac{0.0005}{16.3} + \frac{e_2}{0.023} + \frac{0.0005}{16.3} + \frac{1}{1.68} \right)}$$

$$Q = \frac{7}{3.93 + 241.54e_2} \quad (3.11)$$

En la Figura 3.2 se muestra que antes de los 40 mm las pérdidas de calor a través de la pared difieren de forma brusca, mientras que luego de ese punto éstas se reducen en pequeñas proporciones. Por tanto, se selecciona el espesor de aislante como 40mm, perdiéndose con este valor 0.52 W.

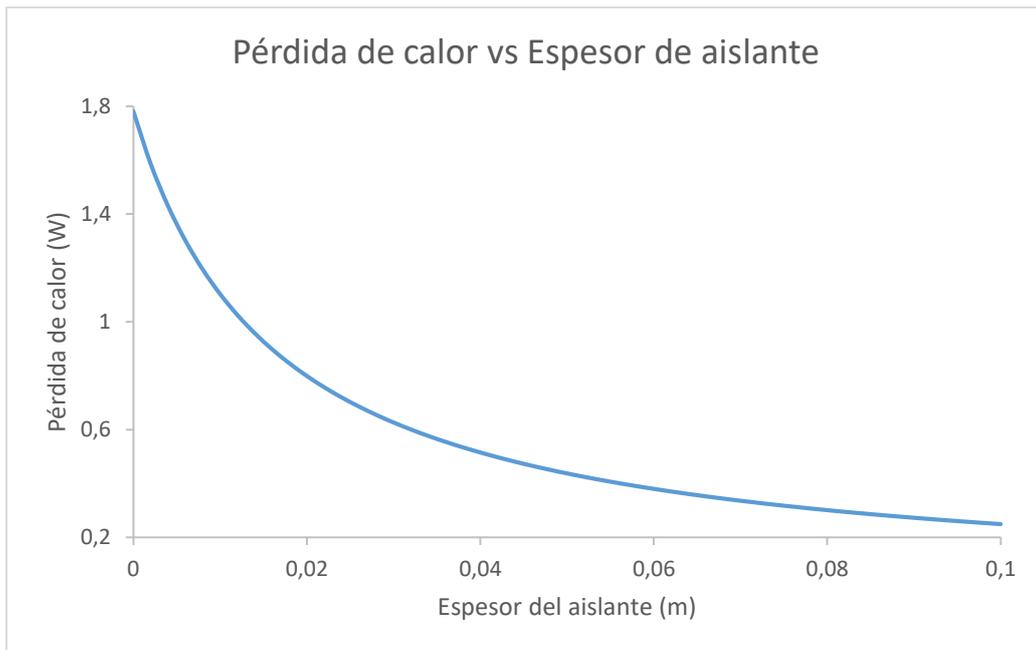


Figura 3.2: Pérdida de calor vs espesor de aislante

Fuente: Elaboración propia

Para las paredes cercanas a la resistencia eléctrica, realizando un análisis similar, y considerando el mismo espesor de aislante, se tiene pérdidas de 25W. Finalmente, las pérdidas a través de las paredes, habiendo ya considerado las superficies serían:

$$Q_{paredes} = 102.6W$$

3.1.2 Pérdidas en plancha de Aluminio

El análisis de la plancha de aluminio sobre la resistencia eléctrica será ligeramente diferente al de las paredes del dispositivo, ya que en este caso sólo habrá convección en la parte superior de ésta, mientras que en la superficie inferior se encontrará en contacto directo con la resistencia eléctrica. Asumiremos que la temperatura en ésta superficie es aproximadamente la misma, como se esquematiza en la figura 3.3.

Suponiendo la temperatura en la superficie superior como 35°C, obtenemos la temperatura de película, con la cual obtendremos las propiedades térmicas del aire, las que se mostrarán en la Tabla 3.4.

$$T_{m3} = \frac{35 + 25}{2} = 30^{\circ}C = 303.15^{\circ}K$$

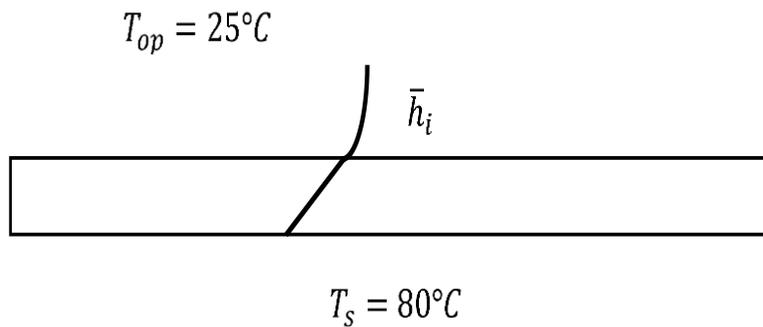


Figura 3.3: Esquema de flujo de calor para plancha de aluminio

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Propiedades del Aire a 30°C

| Propiedad | Unidades | Valor |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Conductividad Térmica | $\frac{W}{m * K}$ | 0.02634 |
| Viscosidad cinemática | $\frac{m^2}{s}$ | $16.03 * 10^{-6}$ |
| Número de Prandtl | - | 0.7174 |

Fuente: Elaboración propia

Asumiendo flujo interno, y apoyándonos en la tabla A2, usamos la ecuación (3.2 para determinar el diámetro hidráulico, y posteriormente con la ecuación (3.3 obtenemos el número de Reynolds.

$$D_H = \frac{4(0.85 * 0.35)}{(2)(0.85 + 0.35)} = 0.5m$$

$$Re = \frac{2.53 * 0.55}{16.03 * 10^{-6}} = 86806$$

El valor obtenido de Reynolds nos indica que el aire sobre la placa poseerá un flujo turbulento, entonces, con las ecuaciones (3.4 y (3.5, tenemos que:

$$\overline{Nu}_D = 0,023(86806)^{4/5}(0.7174)^{0,3} = 185.91$$

$$\bar{h}_i = \frac{(0.02634) * (185.91)}{0.5} = 9.8 W/m^2 * K$$

Con este valor de \bar{h}_i podemos estimar la potencia necesaria para transmitir calor a través de la placa de aluminio, con respecto a su espesor, siguiendo entonces la ecuación, tenemos que:

$$Q = \frac{80 - 25}{\frac{1}{(0.3)(0.35)} \left(\frac{e_2}{209} + \frac{1}{9.2} \right)}$$

$$Q = \frac{55}{0.0455e + 1.035} \quad (3.12)$$

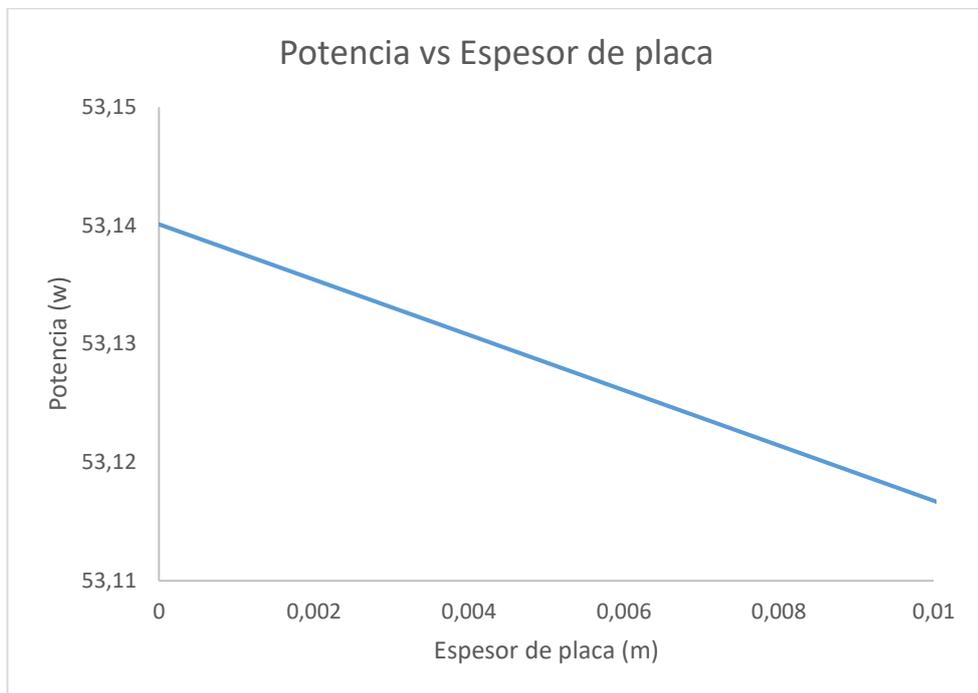


Figura 3.4: Potencia perdida en placa vs espesor de placa

Fuente: Elaboración propia

Se selecciona entonces el espesor de placa de aluminio de 3mm, con la consecuente pérdida de:

$$Q_{placa} \approx 53W$$

3.1.3 Pérdidas en esquinas y bordes

Para determinar las pérdidas en bordes y esquinas recurrimos a la ecuación, y acudimos a la tabla para obtener los valores de factor de forma.

$$Q_{esquinas,bordes} = SK(T_i - T_o)$$

Donde:

- S : Factor de longitud para conducción
- K : Coeficiente de transferencia de calor por conducción
- T_i : Temperatura interior de la pared
- T_o : Temperatura exterior de la pared

Los valores calculados se muestran en la tabla 3.5:

Tabla 3.5: Pérdidas a través de esquinas y bordes

| Elemento | Pérdida (W) |
|--|-------------|
| Bordes Superiores | 0.26 |
| Bordes inferiores | 2.36 |
| Esquinas superiores | 0.1 |
| Esquinas inferiores | 0.64 |
| Total pérdidas en bordes y esquinas | 3.36 |

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, las pérdidas a través de la estructura adquieren un valor de 158.7, como se detalla en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Resumen de pérdidas de calor

| Pérdida | Valor (W) |
|-------------------|--------------|
| Paredes | 102.6 |
| Bordes y esquinas | 3.36 |
| Plancha Aluminio | 53 |
| Total | 158.7 |

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Energía usada en calentamiento del aire

El siguiente análisis determina la cantidad de energía necesaria para calentar el aire dentro del sistema, desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de trabajo. Para usar la ecuación (3.13), es necesario antes conocer el volumen de aire a calentar, y el tiempo necesario para esta operación. Considerando que este tiempo no debe ser muy corto, para

evitar cambios bruscos de temperatura y afectar al sistema, se considerará 10 minutos. Se tiene entonces:

$$Q_{aire} = m_{aire} * cp_{aire} * (T_{op} - T_{\infty}) \quad (3.13)$$

Siendo:

- m_{aire} : Masa de aire a calentar (Kg)
- cp_{aire} : Calor específico del aire, a presión constante ($0.718 \frac{KJ}{Kg \cdot K}$)
- T_{op} : Temperatura de operación del ensayo, en este caso 25°C.
- T_{∞} : Temperatura ambiente del laboratorio, 18°C.

Sabiendo que el volumen del aire puede determinarse con:

$$V = (0.9)(0.4)(0.45) = 0.162m^3$$

y que la densidad del aire es aproximadamente igual a $1 \frac{Kg}{m^3}$, la masa tendría un valor de 0.162Kg.

Por lo tanto:

$$Q_{aire} = (0.162) * 0.718 * (25 - 18) = 0.81 KJ$$

Dividiendo este valor para el tiempo previamente mencionado se tiene que

$$\dot{Q}_{aire} = \frac{Q_{aire}}{t} = \frac{810J}{600s} = 1.35W$$

3.1.5 Energía usada en calentamiento de la carga

Para este análisis, es necesario determinar el calor necesario para calentar el agua dentro de los desecadores desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación, esto incluye tanto el contenido de las copas de como la solución salina. Ésta última será considerada en su totalidad como agua, para efectos de estudio.

Para el caso de una sola muestra, supondremos el desecador como un cilindro de 15 cm de diámetro, tenemos, y con un nivel de solución salina de 2cm sobre la base del desecador, se tiene que:

$$V_{solución} = \pi \frac{D^2}{4} h = \pi \frac{(15cm)^2}{4} (2cm) = 353.4cm^3$$

El volumen de agua dentro de la copa de aluminio será tomado de la ficha técnica de la copa, siendo éste de $15 cm^3$.

La masa de agua entonces estará dada por la ecuación, donde se considerará la densidad del agua, ρ_{H_2O} como $1000 \frac{Kg}{m^3}$

$$M_{H_2O} = 3 * (V_{solución} + V_{copa}) * \rho_{H_2O}$$

$$M_{H_2O} = 3 * (353.4 + 15)cm^3 * \frac{10^{-6}m^3}{cm^3} * 1000 \frac{Kg}{m^3} = 1.095 kg$$

A continuación , aplicamos la ecuación de manera similar, donde en este caso cp_{H_2O} será $4.18 \frac{KJ}{Kg * K}$.

$$Q_{H_2O} = m_{H_2O} * cp_{H_2O} * (T_{op} - T_{\infty})$$

$$Q_{H_2O} = (1.095 Kg) * \left(4.18 \frac{KJ}{Kg * K}\right) * (25 - 18)^{\circ}K = 32.03KJ$$

Finalmente, dividiendo para el tiempo en el cual se realizará el calentamiento obtenemos:

$$\dot{Q}_{H_2O} = 58.4W$$

Y, acorde a la ecuación, determinamos la potencia necesaria de la fuente de calor

$$P_{total} = 158.7 + 1.35 + 58.4 = 224.71 W$$

El rendimiento del equipo puede ser determinado dividiendo entre la energía necesaria para calentar la carga, y la energía total para operar el sistema, se tiene entonces:

$$\eta = \frac{59.75}{224.71} * 100\% = 27\%$$

Considerando además pérdida de calor al momento de abrir la puerta del equipo, se considera entonces una resistencia de 300W.

3.2 Análisis estático

El análisis estático a realizarse tomará en cuenta la carga o peso de las muestras, lo que nos permitiría dimensionar los topes para las rejillas, en las que no se justifica un mayor cálculo.

Idealizando cada carga como 1kg, se tiene que ejercen una fuerza de 9.81N, como se muestra en la Figura 3.5. Las muestras estarán equidistantes.

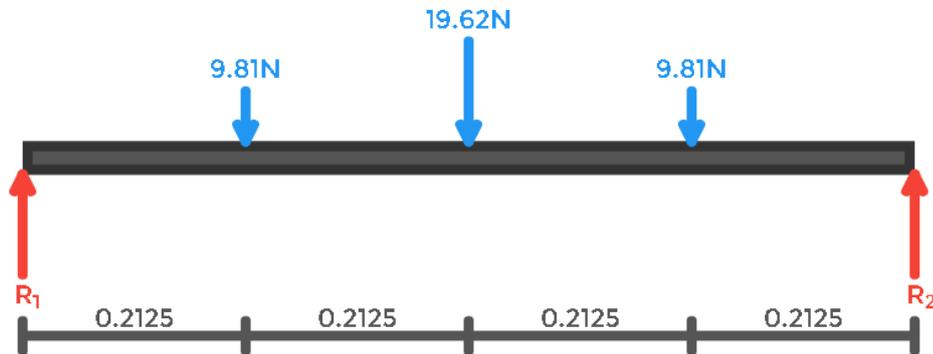


Figura 3.5: Diagrama de cuerpo libre de la rejilla, vista frontal.

Fuente: Elaboración propia

Para que el sistema se encuentre en equilibrio, debe cumplirse que las fuerzas verticales se compensen entre sí, y los momentos que éstas produzcan también sean nivelados (Hibbeler, 2004). Por lo que, mediante sumatoria de fuerzas y momentos respectivamente, reemplazando los valores obtenemos las ecuaciones 3.14 y 3.15.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + R_2 - 9.81 - 19.62 - 9.81 = 0$$

$$R_1 + R_2 = 39.24N \quad (3.14)$$

$$\sum M = 0$$

$$R_2(0.85) - 9(0.2125) - 19.62(0.425) - 9.81(0.6375) = 0$$

$$0.85R_2 = 16.667N \quad (3.15)$$

De esta última ecuación tenemos que $R_2 = 19.62N$, y reemplazando en 3.1 se da $R_1 = 19.62N$.

Esta fuerza la utilizaremos para dimensionar topes que soportarán la carga de las muestras, así como la rejilla. Para efectos prácticos, se diseñará los

topes asumiendo los mismos como vigas en voladizo del mismo material de las paredes, y con un ancho menor al de la rejilla.

3.2.1 Dimensionamiento del soporte de la rejilla

De la ecuación (3.16), obtenemos la deflexión máxima de la viga en voladizo, acorde al modelo indicado en la tabla A1 del Anexo A.

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{Fa}{6EI} (a - 3l) \quad (3.16)$$

Donde:

F : Fuerza de reacción sobre el tope (N).

a : Distancia desde el empotramiento hasta el punto de aplicación de la carga (m).

E : Módulo de Young, se considerará $200 \times 10^9 Pa$

I : Momento de Inercia de la sección transversal de la viga (m^4)

l : Longitud de la viga (m).

Entonces, considerando $y_{m\acute{a}x}$ como 10^{-7} , y tomando a como 25 mm y l como 40 mm , se tiene que:

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{(19.62)(0.025)}{6(200 \times 10^9)I} (0.025 - 3(0.04)) = \frac{-3.88 \times 10^{-14}}{I}$$

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{-3.88 \times 10^{-14}}{I} = 10^{-7}$$

$$I = 3.88 \times 10^{-8} m^4$$

Considerando el ancho b como 350 mm , para una sección transversal rectangular, la inercia se puede determinar con la ecuación (3.17)

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.17)$$

Finalmente, reemplazando valores y resolviendo para h , se obtiene

$$h = 0.011m \approx 1cm$$

3.2.2 Análisis para soporte de platina

El siguiente análisis validará si es o no necesario utilizar topes para soportar la platina de aluminio que estará en contacto con la resistencia eléctrica. Para ello, se idealizará a la resistencia eléctrica como una viga en voladizo, de perfil rectangular, con longitud 200 mm, ancho 200 mm y espesor 3/8" (9.525 mm), como se aprecia en la figura.

Para asegurar que colocar la platina sobre la resistencia eléctrica no generará efectos adversos, se determina la flexión máxima que podría darse en la misma. Acorde a la tabla A1 del Anexo A, se tiene la ecuación (3.18).

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (3.18)$$

Donde:

F : Fuerza sobre la viga, en este caso el peso concentrado de la platina (N).

E : Módulo de Young, se considerará $200 \times 10^9 Pa$.

I : Momento de Inercia de la sección transversal del conjunto (m^4)

l : Longitud de la viga (m).

Para determinar la Inercia del conjunto, se obtendría la diferencia entre la inercia de la viga idealizada menos la inercia del espacio vacío, con dimensiones.

Siendo entonces:

$$I = \frac{(B - b)H^3}{12}$$
$$I = \frac{BH^3}{12} - \frac{bH^3}{12} \quad (3.19)$$

Donde:

B : Ancho de viga (m)

b : Ancho de espacio vacío (m)

H : Espesor de viga(m)

Reemplazando los valores, se tiene que la inercia del conjunto es $1.35 \times 10^{-9} m^4$.

Volviendo a la ecuación (3.18, y reemplazando valores, se tiene que

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{23.63(0.2)^3}{3(200 \times 10^9)(1.35 \times 10^{-9})}$$
$$y_{m\acute{a}x} \approx 0.23 mm$$

Siendo este valor de deflexión despreciable, podemos justificar la ausencia de topes para esta platina.

3.3 Simulación y modelo matemático

Para el presente proyecto se requiere que la temperatura sea homogénea en el espacio donde se encontrarán los desecadores, cuyas dimensiones se muestran a continuación.

- Base: 900mm
- Altura: 420 mm
- Profundidad: 400mm

Para este análisis, se tendrá en cuenta las siguientes consideraciones:

- Coeficiente de convección constante y conocido
- Condiciones de frontera conocidas
- Transferencia de calor bidimensional.

Para las paredes se asumirá una temperatura de 23°C, mientras que la platina de Aluminio se considerará en general 80°C.

Mediante un esquema nodal, mostrado en la Figura 3.6, aplicamos las temperaturas de condiciones de frontera, y la transferencia de calor se modela como se muestra en la Figura 3.7

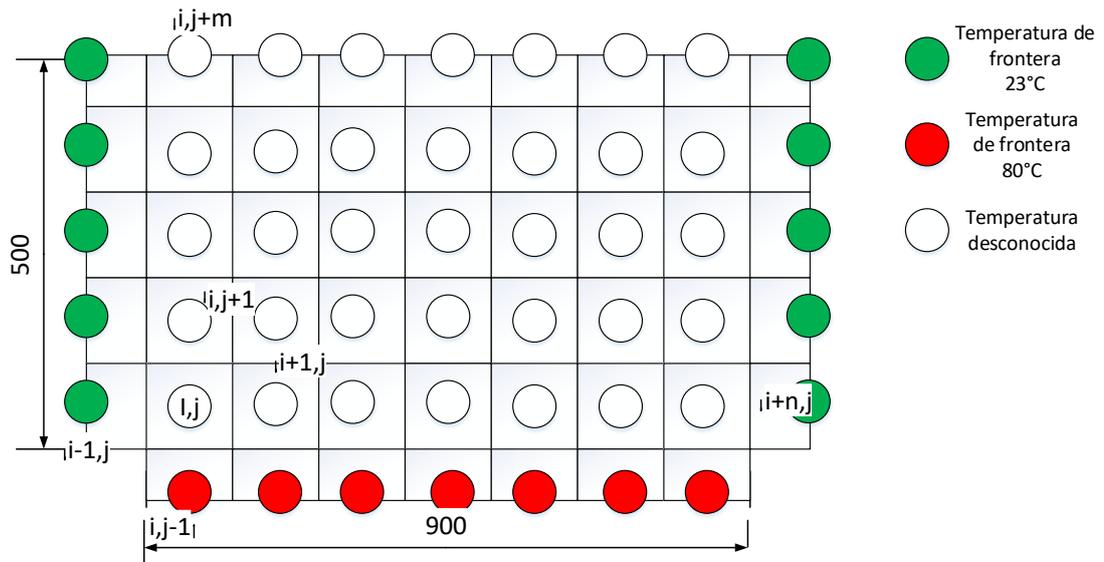


Figura 3.6: Esquema de análisis nodal para distribución de temperatura

Fuente: Elaboración propia

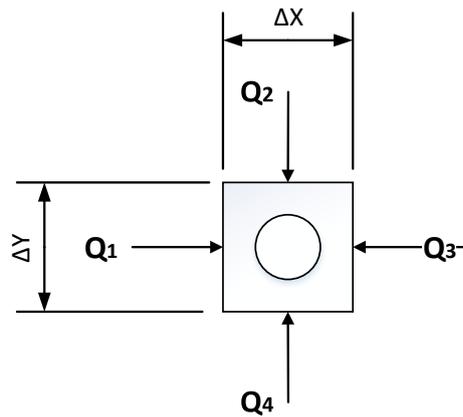


Figura 3.7: Balance energético, nodo i,j.

Fuente: Elaboración propia

La convección en cada superficie o nodo se tomaría con la ecuación (3.20), y asumiendo $\Delta Y = 2\Delta X$ al momento de realizar el balance de energía, se tiene que:

$$\begin{aligned}
 Q &= hA(T_{i\pm 1,j} - T_{i,j}) \\
 Q &= hA(T_{i,j\pm 1} - T_{i,j}) \\
 Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

$$\frac{(T_{i-1,j} - T_{i,j})}{h(W\Delta Y)} + \frac{(T_{j+1,j} - T_{i,j})}{h(W\Delta X)} +$$

$$\frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{h(W\Delta Y)} + \frac{(T_{j-1,j} - T_{i,j})}{h(W\Delta X)} = 0$$

$$T_{i,j} = \frac{2T_{i-1,j} + T_{j+1,j} + 2T_{i+1,j} + T_{j-1,j}}{6} \quad (3.21)$$

La ecuación (3.21), permitirá apreciar la distribución de temperatura para los distintos nodos planteados, esto se logra ingresando en una hoja de Excel la ecuación en cada celda por tantos nodos se tengan, obteniendo finalmente la Figura 3.8.

En la zona intermedia del diagrama, la temperatura bordea los 23,73°C, con lo que se puede inferir que en el espacio donde estarán ubicadas las muestras en general se mantiene a temperaturas similares. Además, situándose en el centro del gráfico de distribución de temperatura, es posible además graficar cómo varía la temperatura con respecto a la altura del volumen, lo que es representado en la Figura 3.9.

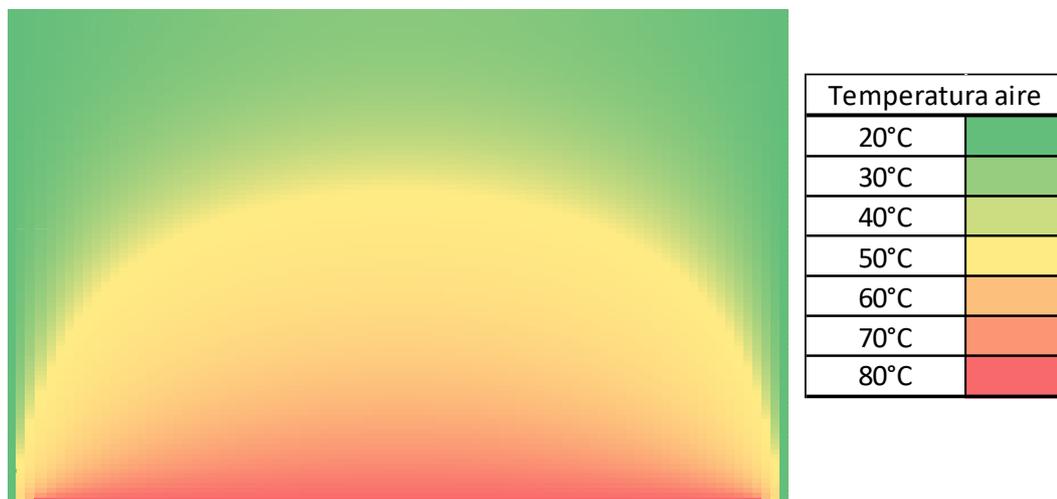


Figura 3.8: Distribución de temperatura mediante análisis nodal.

Fuente: Elaboración propia

Acorde a dicho gráfico, se decide que a partir de los 200 mm de altura es factible colocar tanto las rejillas, y además a 300 mm es sugerible instalar los sensores de temperatura, ya que a partir de esta altura la temperatura oscila entre los 22 a 25°C.

De manera similar, llevando el sistema a simulación en Flow Simulation, complemento de Soliworks 2016 (Figura 3.10), se obtuvo distribución de temperatura en distintos planos, como se muestra en la Figura 3.11.

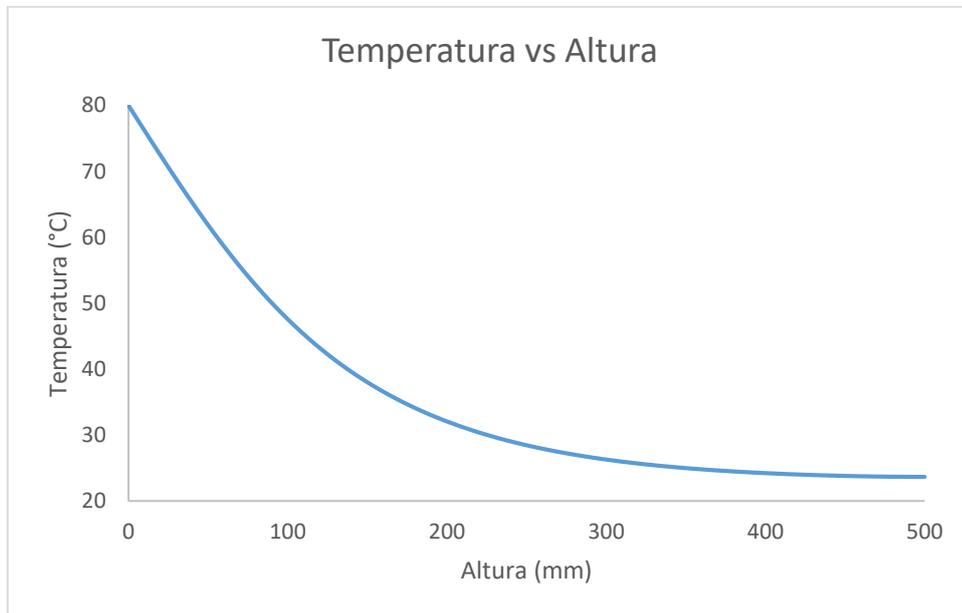


Figura 3.9: Temperatura vs Altura

Fuente: Elaboración propia

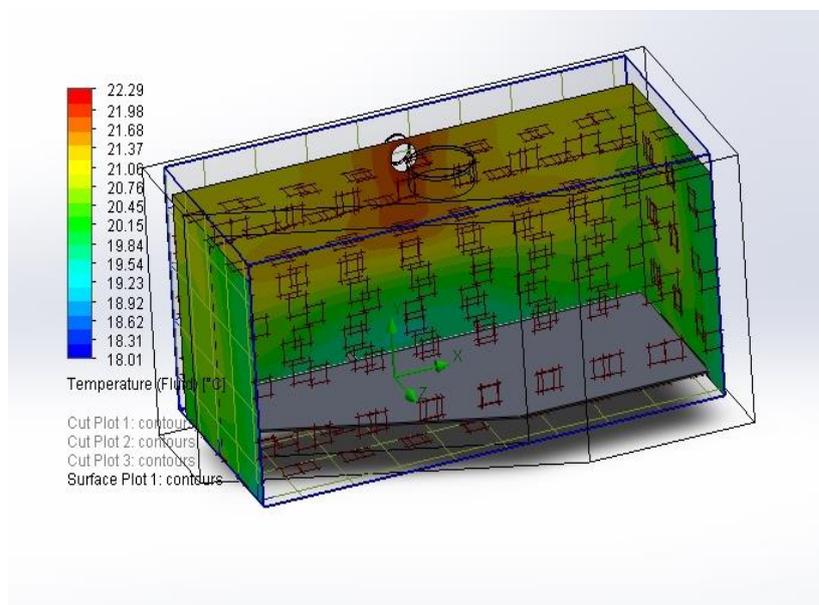


Figura 3.10: Distribución de temperatura en paredes del sistema

Fuente: Elaboración propia

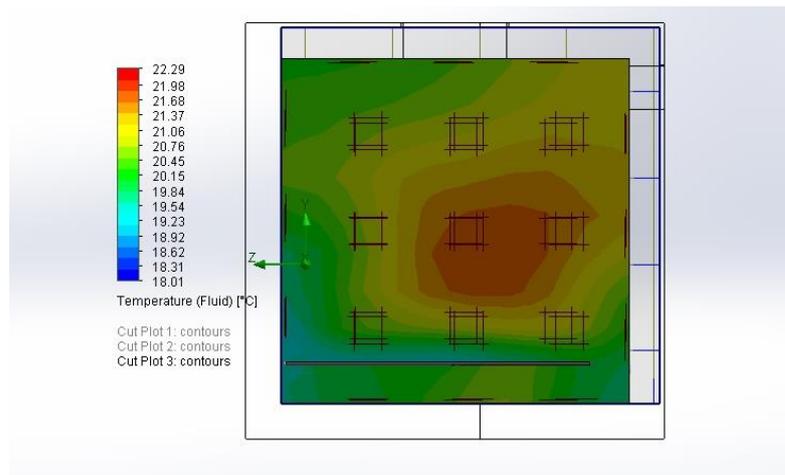


Figura 3.11: Distribución de temperatura, vista lateral.

Fuente: Elaboración propia

3.4 Elaboración y evaluación del prototipo

Con las consideraciones y resultados anteriores, se procede a realizar un prototipo del equipo (Figura 3.17: Versión final del prototipo), con el que se validará la función de control de temperatura y humedad.

Para ello, se modificó el equipo en las condiciones iniciales (Figura 1.1), aplicándole lana de vidrio como aislante térmico alrededor, y asegurado con cinta de aluminio, un método similar al aislado en ductos de aire acondicionado, en reemplazo del poliuretano.

De los ventiladores que poseía, uno fue reemplazado ya que se encontraba inoperativo. La tapa del envase, así como 2 de las paredes fueron perforadas para instalar sensores de temperatura y humedad en la parte superior y lateral respectivamente. El fondo del equipo también fue perforado, y se le colocó un cajón adicional donde se instalaría la resistencia eléctrica.



Figura 3.12: Equipo antes de las modificaciones

Fuente: Elaboración propia

Se agregó además una parrilla de refrigeradora, como soporte para las desecadoras y las muestras. Las desecadoras fueron perforadas para permitir el paso de sensores de humedad y temperatura respectivamente.



Figura 3.13: Preparación de los desecadores

Fuente: Elaboración propia

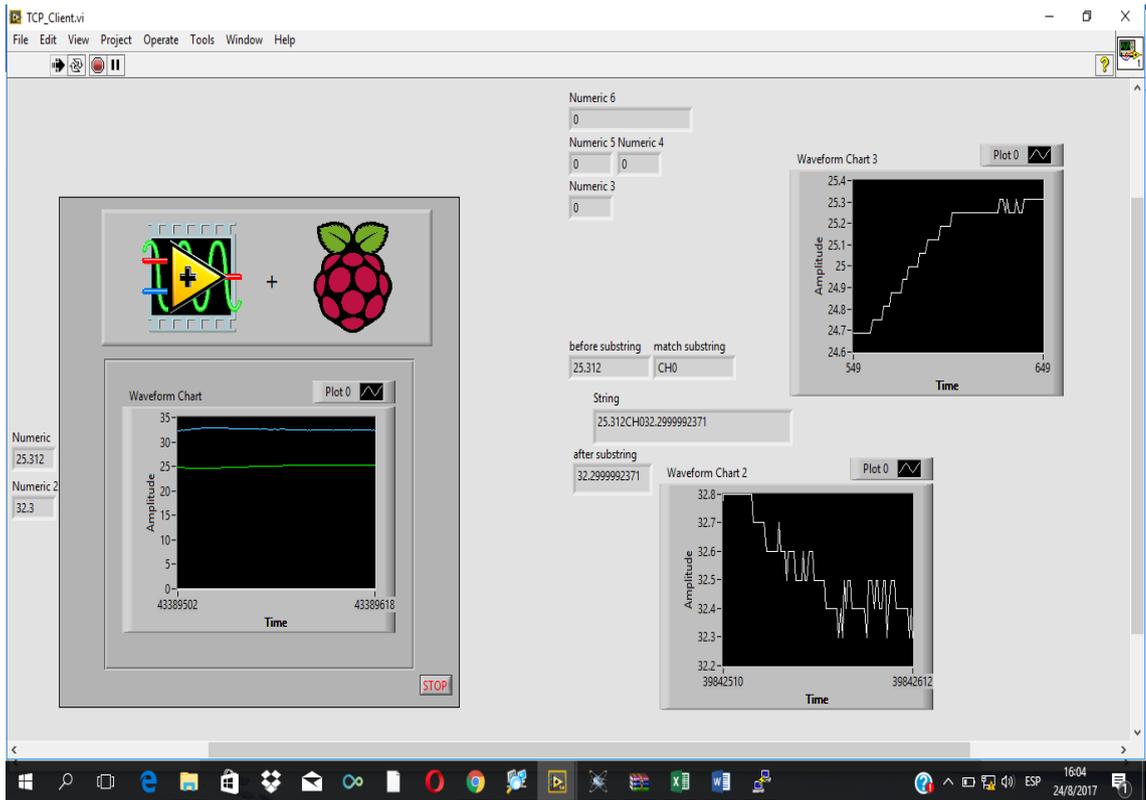


Figura 3.14: Pruebas del prototipo con sensores de temperatura

Fuente: Elaboración propia

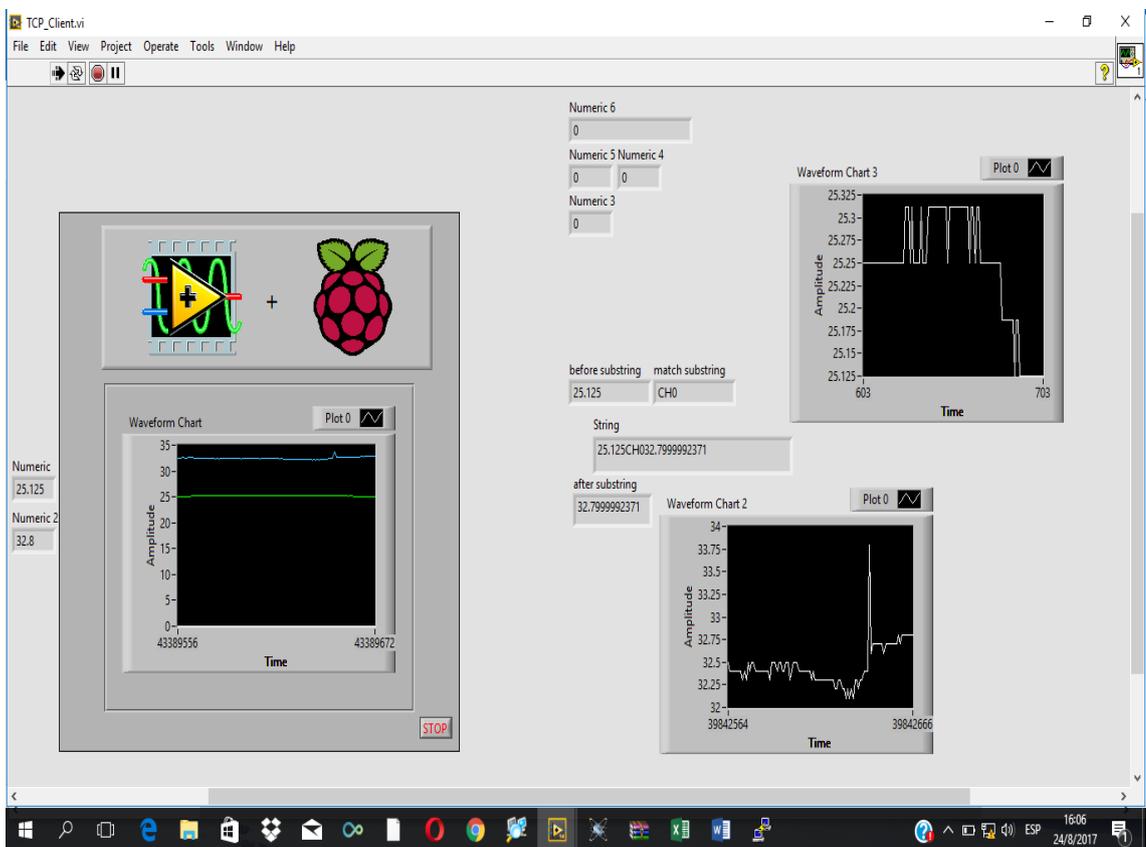


Figura 3.15: Etapa de corrección para muestras de temperatura

Fuente: Elaboración propia

Inicialmente, se planteó la idea de regular la resistencia eléctrica mediante un variador de voltaje, pero debido a la inercia térmica de la misma, es decir, que conserva energía térmica y la libera de forma progresiva (IECA, 2017), esto aumentaría de manera abrupta la histéresis del sistema, además de generar ruido en la señal de control(Figura 3.14 y Figura 3.15).

Por ello, las conexiones se hicieron mediante tarjeta Raspberry, en las que se realizó control de tipo On/Off tanto para los ventiladores dentro del recipiente, como para la resistencia eléctrica.

El control de la humedad en este caso se realizó de forma indirecta, es decir, activa el ventilador o el extractor dependiendo de la cantidad de humedad en la recámara. Las pruebas de este tipo de sensor se ilustran en la Figura 3.16.

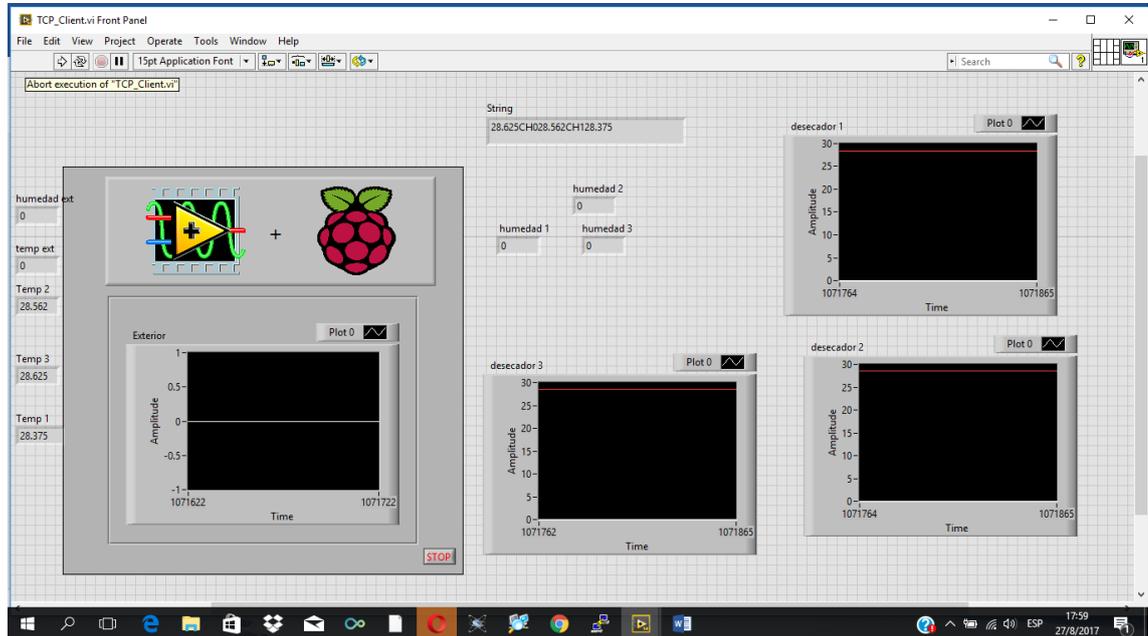


Figura 3.16: Evaluación de sensores de humedad

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.17: Versión final del prototipo

Fuente: Elaboración propia

3.5 Análisis de Costos

En este apartado se detallará los costos tanto directos e indirectos para la implementación del proyecto.

3.5.1 Costos directos

Los costos directos incluyen la materia prima, insumos y equipos a utilizar, todo esto desglosado en la Tabla 3.7.

3.5.2 Costos indirectos

Los costos indirectos radican en rubros relacionados a la producción del proyecto, como servicios básicos, sueldos, gastos administrativos, etc. Para este caso, sólo se considerará un rubro para imprevistos, el cual se asumirá como 10% de los costos directos, es decir, \$254.29.

Finalmente, se tiene que la inversión necesaria llegaría a \$2797,23. Es de mencionar que en el rubro de mano de obra se incluye también insumos necesarios para ensamblado, como cables, material de soldadura, tableros electrónicos, etc.

Tabla 3.7: Detalle de costos directos del proyecto

| No | Componente | Unidad | Cantidad | Valor Unitario | Valor Total |
|--------------|--|--------|----------|----------------|--------------------|
| 1 | Balanza de precisión 200g/1mg | u | 4 | \$400,00 | \$ 1.600,00 |
| 2 | Resistencia eléctrica, 300W. 20x20cm x3/8" | u | 1 | \$32,00 | \$ 32,00 |
| 3 | Sensor de Temperatura | u | 4 | \$10,00 | \$ 40,00 |
| 4 | Plancha Acero Inoxidable AISI 304, mate | u | 2 | \$23,68 | \$ 47,36 |
| 5 | Platina Aluminio, 850x350x3 mm | kg | 2,4 | \$1,70 | \$ 4,08 |
| 6 | Sensor de Humedad DHT 22 | u | 4 | \$10,00 | \$ 40,00 |
| 7 | Ventilador de computadora 120 mm 12 V | u | 5 | \$10,00 | \$ 50,00 |
| 8 | Poliuretano | kg | 3 | \$6,50 | \$ 19,50 |
| 9 | Bisagra de acero inoxidable, para soldar, 40mm de espesor | u | 2 | \$5,00 | \$ 10,00 |
| 10 | Mano de obra | u | - | - | \$ 700,00 |
| Total | | | | | \$ 2.542,94 |

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente proyecto surgió del requerimiento de permitir a estudiantes de la carrera de ingeniería en alimentos de la FIMCP realizar el ensayo ASTM E95-96 mediante un equipo confiable y de fácil mantenibilidad.

El diseño incluyó la selección de una fuente de calor adecuada, así como consideraciones como impedir el efecto de la radiación y una conservación de la temperatura de forma homogénea.

Al momento del dimensionamiento se tomó en cuenta no solo el espacio para las desecadoras, sino además para las balanzas que estarían llevando a cabo la medición del cambio de peso.

El cálculo de deflexión y carga para la parrilla fue obviado, ya que ésta puede ser adquirida fácilmente en el mercado local, o bien tomada de otro equipo, y la carga que va a soportar no es masiva.

Se seleccionó poliuretano dado que es un aislante liviano, resistente, de larga vida útil. Su instalación en el sistema se realizaría como una espuma que se solidificaría, lo que ahorraría tiempo de construcción.

Hubo complicaciones al momento de construir el prototipo, dadas las especificaciones para el sistema de medición de peso. A nivel local no fue posible encontrar una alternativa de bajo costo, por lo que se realizó la compra de la balanza en el exterior.

La selección de la resistencia eléctrica fue discutida y llevada a cabo en conjunto con fabricantes a nivel local, tanto por cuestión de costos como de simplicidad.

4.1 Conclusiones

- Se realizó el diseño y construcción del prototipo de un medidor de permeabilidad al vapor de agua para plásticos, con capacidad para 3 muestras en desecadores de 150mm de diámetro.
- El material seleccionado es Acero AISI 304 -2B, mate pulido, debido a que, al ser equipo que trabaja con porcentajes de humedad significativos, debe de ser resistente a la corrosión, tanto para preservar las muestras como para aumentar la vida útil del equipo.
- La potencia necesaria en la resistencia eléctrica se estimó en base a las pérdidas en las paredes, y la energía para calentar el aire en el ambiente, teniendo como resultado una resistencia tubular de 300W, con dimensiones de 20x20cm y 3/8" de diámetro.
- El costo final del proyecto llegó a \$2542. Se considera como un equipo accesible para la universidad.
- Acorde a las simulaciones, la temperatura mantuvo un rango entre 22 a 25°C, variando de forma lenta, y la humedad se mantuvo entre 53 al 100% que es lo requerido para el ensayo.

4.2 Recomendaciones

- El equipo no debe ser abierto durante largos periodos mientras está en operación, ya que el cambio térmico podría alterar los resultados.
- Este equipo está diseñado para operar dentro de un laboratorio, con condiciones de temperatura de 18°C y humedad de 50%.
- Al momento de inyectar el poliuretano y al llevar a cabo la soldadura es recomendable utilizar equipo de protección personal adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

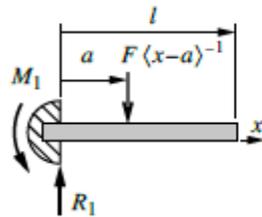
1. Blog de Balanzas industriales. (2012). *Tipos de Balanzas*. Obtenido de http://industriadebalanzas.blogspot.com/2012/09/tipos-de-balanzas_6.html
2. Blog de Instrumentos de Laboratorio. (2017). *Balanza de laboratorio*. Obtenido de <http://instrumentosdelaboratorio.org/balanza-de-laboratorio>
3. Emaze. (2015). *Convección en bombilla*. Obtenido de <https://www.emaze.com/@ACOCLZCI/CONVECCI%C3%93N-EN-BOMBILLA>
4. Fric, R. (8 de Diciembre de 2010). Light source thermal analysis II – Incandescent Lamp. Obtenido de <http://www.posterus.sk/?p=9400>
5. Hibbeler, R. C. (2004). *Mecánica Vectorial para ingenieros. Estática* (Décima ed.). México: Pearson Educación.
6. IECA. (2017). *¿Qué es la inercia térmica?* Obtenido de IECA: https://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=692
7. Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (Cuarta ed.). México: Prentice Hall.
8. MB instrumentos. (2014). *¿Sensores piezoeléctricos o transductores de fuerza con galgas extensiométricas?* Obtenido de Simplemente mide bien: <http://www.midebien.com/consejos-practicos-para-medir-bien/sensores-piezoelctricos-o-transductores-de-fuerza>
9. McHugh, T. H., Bustillo, R. A., & Krochta, J. M. (1993). Hydrophilic Edible Films: Modified Procedure for Water Vapor Permeability and Explanation of Thickness Effects. *Journal of food science*, 58.
10. Nise, N. S. (2004). *Sistemas de Control para Ingeniería*. México.
11. Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas. Un enfoque integrado*. México: Pearson.
12. Study. (2017). *Electrical Resistance: Definition, Unit & Variables*. Obtenido de <http://study.com/academy/lesson/electrical-resistance-definition-unit-variables.html>
13. Universidad Politécnica de Cataluña. (s.f.). *Sistemas de Control*. Cataluña, España. Obtenido de <http://upcommons.upc.edu>

APÉNDICES

ANEXO A

Tabla A1.- Ecuaciones para viga en voladizo con carga concentrada

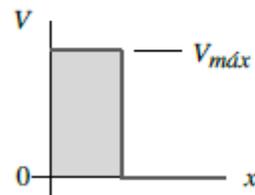
(a) Viga en voladizo con carga concentrada



$$R_1 = F$$

$$M_1 = Fa$$

Carga $q = M_1 \langle x \rangle^{-2} + R_1 \langle x \rangle^{-1} - F \langle x - a \rangle^{-1}$

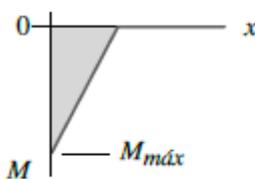


$$V_{m\acute{a}x} = R_1 = F$$

$$V = M_1 \langle x \rangle^{-1} + R_1 - F \langle x - a \rangle^0$$

$$= F(1 - \langle x - a \rangle^0)$$

Cortante



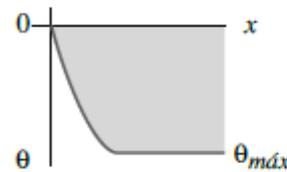
$$M_{m\acute{a}x} = -Fa$$

cuando $a = l$: $M_{m\acute{a}x} = -Fl$

$$M = -M_1 + R_1 x - F \langle x - a \rangle^1$$

$$= F(-a + x - \langle x - a \rangle^1)$$

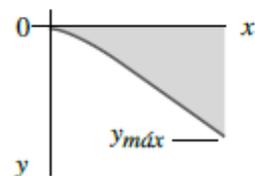
Momento



$$\theta = \frac{1}{EI} \left(\begin{array}{l} -M_1 x + \frac{R_1}{2} x^2 \\ -\frac{F}{2} \langle x - a \rangle^2 \end{array} \right)$$

$$\theta = \frac{F}{2EI} (-2ax + x^2 - \langle x - a \rangle^2)$$

Pendiente



$$y_{m\acute{a}x} = \frac{Fa^2}{6EI} (a - 3l)$$

cuando $a = l$: $y_{m\acute{a}x} = -\frac{Fl^3}{3EI}$

$$y = \frac{1}{EI} \left(-\frac{M_1}{2} x^2 + \frac{R_1}{6} x^3 - \frac{F}{6} \langle x - a \rangle^3 \right)$$

$$= \frac{F}{6EI} (x^3 - 3ax^2 - \langle x - a \rangle^3)$$

Deflexi3n

Fuente: Norton, 2011

Tabla A2.- Correlaciones de convección para flujo en un tubo circular

| TABLA 8.4 Resumen de correlaciones de convección para flujo en un tubo circular ^{a, b, e} | | |
|--|----------------------|---|
| Correlación | | Condiciones |
| $f = 64/Re_D$ | (8.19) | Laminar, completamente desarrollado |
| $Nu_D = 4.36$ | (8.53) | Laminar, completamente desarrollado, q_s'' uniforme, $Pr \geq 0.6$ |
| $\bar{Nu}_D = 3.66$ | (8.55) | Laminar, completamente desarrollado, T_s uniforme, $Pr \geq 0.6$ |
| $\bar{Nu}_D = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0.04[(D/L)Re_D Pr]^{2/3}}$ | (8.56) | Laminar, longitud de entrada térmica ($Pr \gg 1$ o una longitud inicial no calentada), T_s uniforme |
| $\bar{Nu}_D = 1.86 \left(\frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$ | (8.57) | Laminar, longitud de entrada combinada $\{ [Re_D Pr / (L/D)]^{1/3} (\mu/\mu_s)^{0.14} \} \geq 2$, T_s uniforme, $0.48 < Pr < 16,700$, $0.0044 < (\mu/\mu_s) < 9.75$ |
| $f = 0.316 Re_D^{-1/4}$ | (8.20a) ^y | Turbulento, completamente desarrollado, $Re_D \leq 2 \times 10^4$ |
| $f = 0.184 Re_D^{-1/5}$ | (8.20b) ^y | Turbulento, completamente desarrollado, $Re_D \geq 2 \times 10^4$ |
| $f = (0.790 \ln Re_D - 1.64)^{-2}$ | (8.21) ^y | Turbulento, completamente desarrollado, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$ |
| $Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$ | (8.60) ^d | Turbulento, completamente desarrollado, $0.6 \leq Pr \leq 160$, $Re_D \geq 10,000$, $(L/D) \geq 10$, $n = 0.4$ para $T_s > T_m$ y $n = 0.3$ para $T_s < T_m$ |
| $Nu_D = 0.027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$ | (8.61) ^d | Turbulento, completamente desarrollado, $0.7 \leq Pr \leq 16,700$, $Re_D \geq 10,000$, $L/D \geq 10$ |
| $Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$ | (8.63) ^d | Turbulento, completamente desarrollado, $0.5 < Pr < 2000$, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$, $(L/D) \geq 10$ |

Fuente: Incropera, 1999

Tabla A3.- Data Sheet de Balanza WTC- 200

PRECISION BALANCES SERIES WTC

ref. issue date 02-03-2017







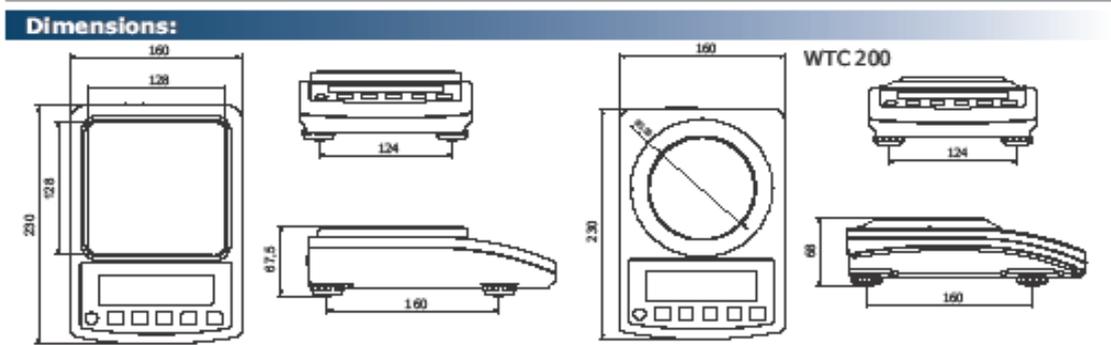

WTC balances are designed for fast and precise determination of mass in laboratory conditions.

They can be used in locations with no access to (240V) as they feature internal rechargeable battery.

Balances are equipped with: weighing pan made of stainless steel, RS 232, USB-A and USB-B connectors and backlit LCD ensuring clarity of the result.

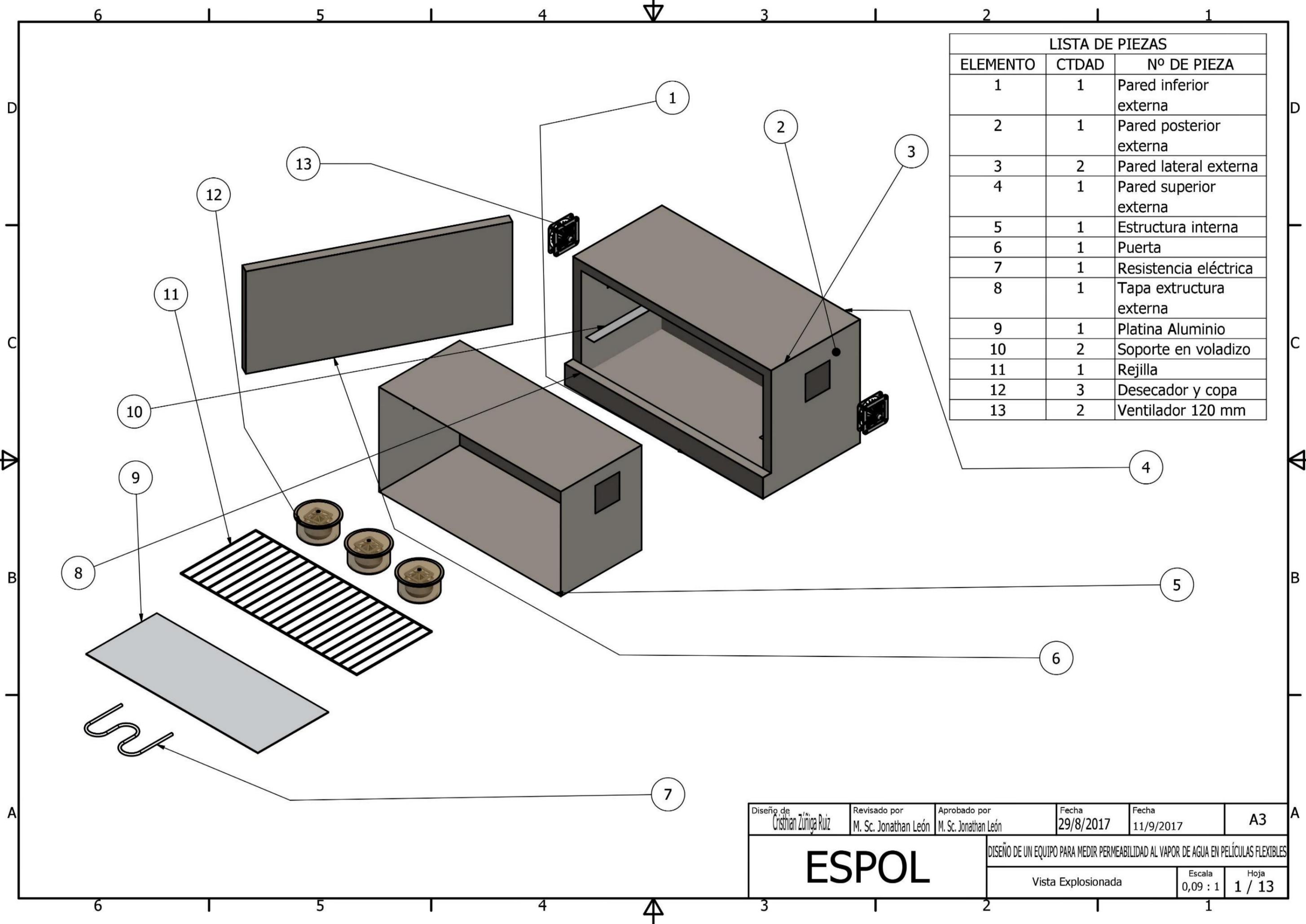
-  Parts counting
-  Percent deviations
-  Totalizing
-  Plus/Minus Control
-  Internal battery
-  Peak hold

| Technical specification: | WTC 200 | WTC 600.1 | WTC 2000 | WTC 3000 |
|---------------------------|---|--------------|----------------------|--------------|
| Maximal capacity | 200 g | 600 g | 2000 g | 3100 g |
| Minimal load | - | - | - | - |
| Readability [d] | 0,001 g | 0,01 g | 0,01 g | 0,1 g |
| Verification unit [e] | - | - | - | - |
| Tare range | -200 g | -600 g | -2000 g | -3100 g |
| Repeatability | 0,002 g | 0,01 g | 0,01 g | 0,1 g |
| Linearity | ±0,004 g | ±0,02 g | ±0,03 g | ±0,3 g |
| Stabilization time | 2 s | 2 s | 2 s | 2 s |
| OIML class | - | - | - | - |
| Working temperature | +15° + +30° C | | | |
| IP rating | IP 43 | | | |
| Power supply | 100 + 240 V AC 50 + 60 Hz / 12 V DC + battery | | | |
| Adjustment | external | | | |
| Battery operating time | 33 hours | | | |
| Pan size | Ø 100 | 128 × 128 mm | 128 × 128 mm | 128 × 128 mm |
| Display | LCD (backlit) | | | |
| Interface | RS 232, USB-A, USB-B | | RS 232, USB-A, USB-B | |
| Net weight / Gross weight | 1,2 kg / 1,7 kg | | 1,3 kg / 2 kg | |
| Packaging dimensions | 33 × 22 × 14 cm | | | |



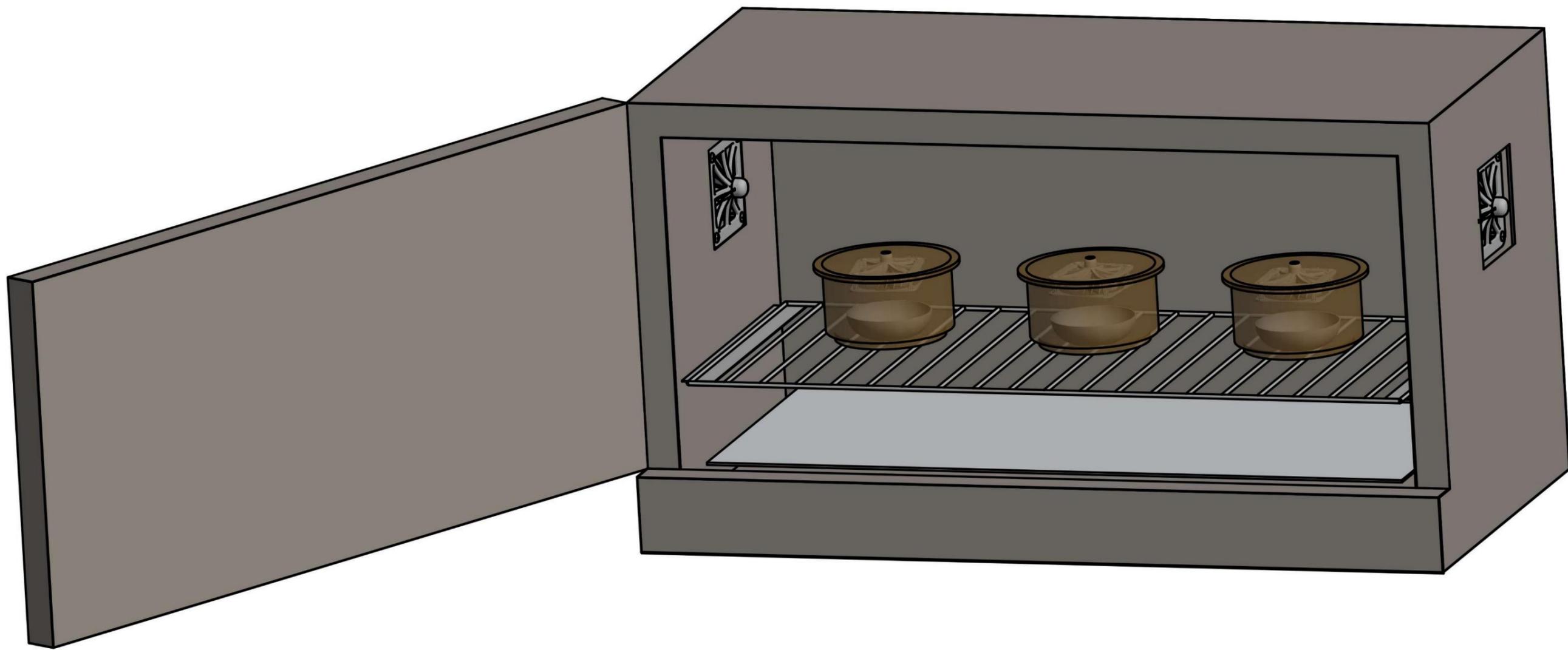
| Additional equipment: | |
|------------------------------------|-------------------------|
| IMPACT "EPSON" PRINTER | RS 232/RS 485 CONVERTER |
| TABLE FOR SCALE | POWER LOOP AP-2 |
| COMPUTER SOFTWARE: PW-WIN, RAD-KEY | |

PLANOS

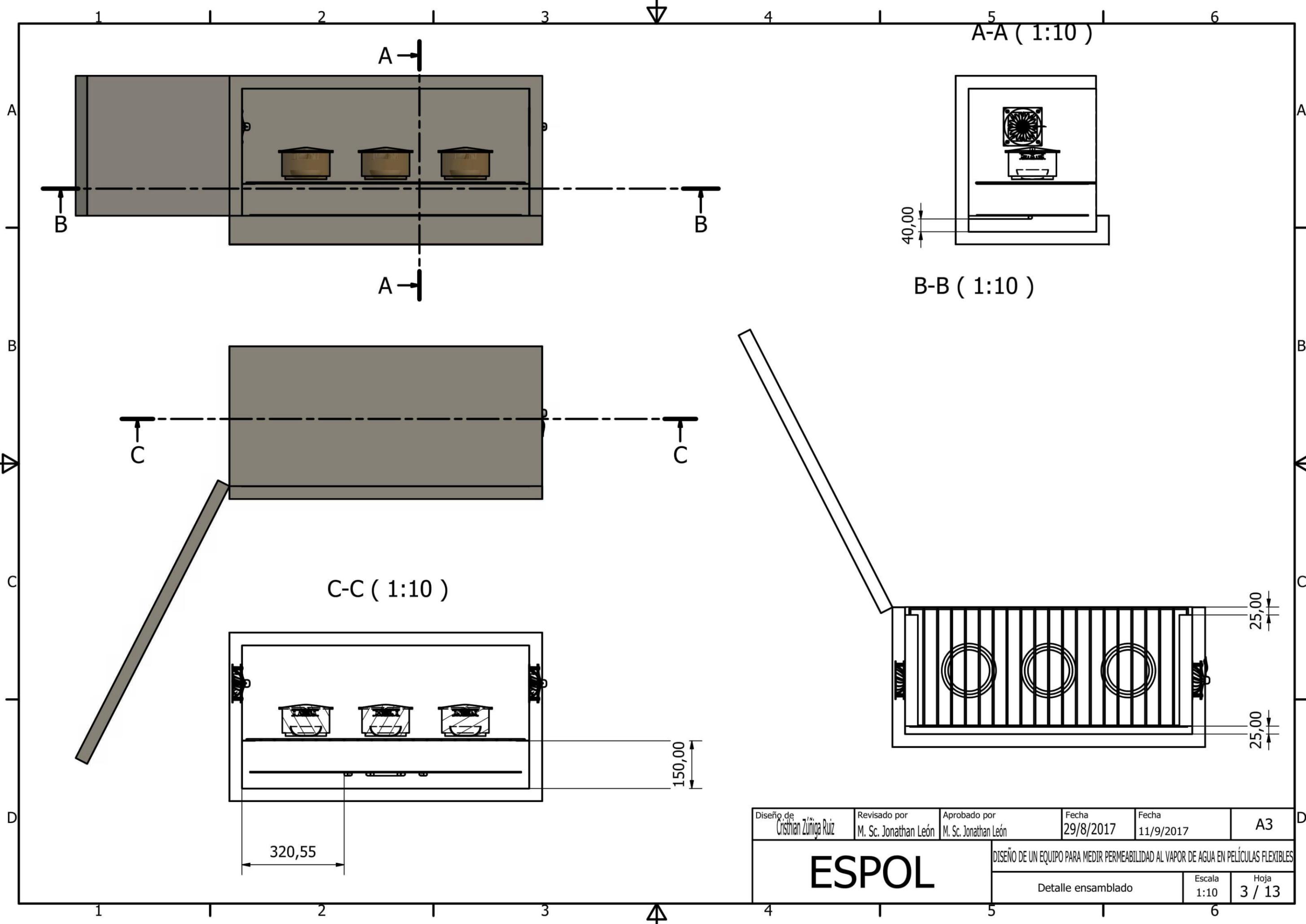


| LISTA DE PIEZAS | | |
|-----------------|-------|-------------------------|
| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA |
| 1 | 1 | Pared inferior externa |
| 2 | 1 | Pared posterior externa |
| 3 | 2 | Pared lateral externa |
| 4 | 1 | Pared superior externa |
| 5 | 1 | Estructura interna |
| 6 | 1 | Puerta |
| 7 | 1 | Resistencia eléctrica |
| 8 | 1 | Tapa estructura externa |
| 9 | 1 | Platina Aluminio |
| 10 | 2 | Soporte en voladizo |
| 11 | 1 | Rejilla |
| 12 | 3 | Desecador y copa |
| 13 | 2 | Ventilador 120 mm |

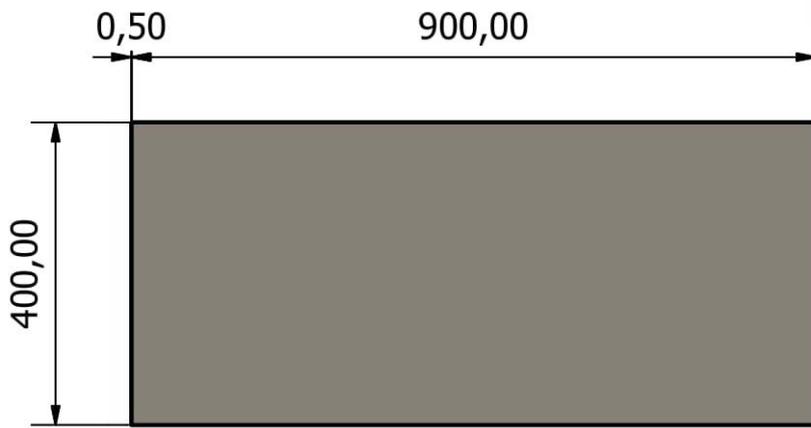
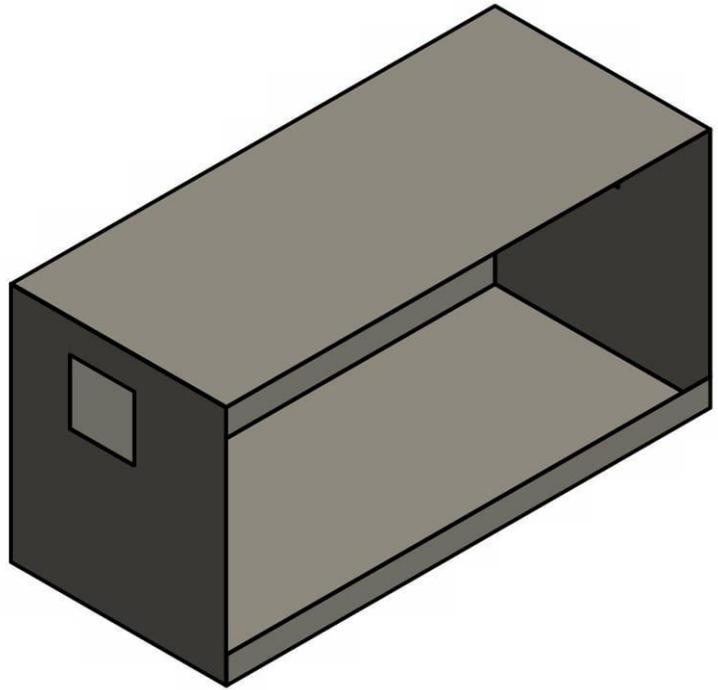
| | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|----------------|
| Diseño de Cristian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A3 |
| ESPOL | | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | |
| | | | Vista Explosionada | Escala 0,09 : 1 | Hoja 1 / 13 |



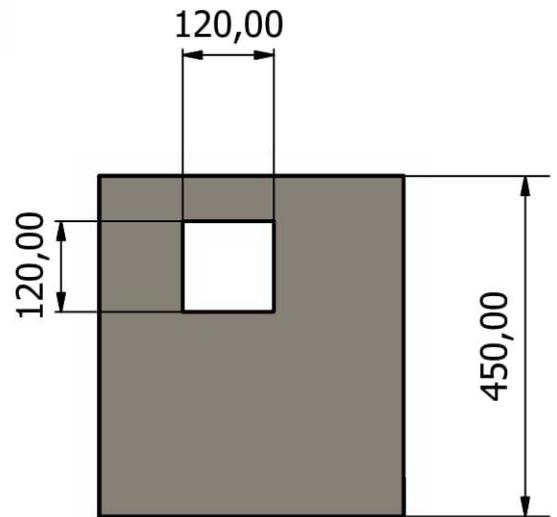
| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|---------------|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A3 |
| ESPOL | | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | |
| | | | Vista General | | Escala 1:5 |



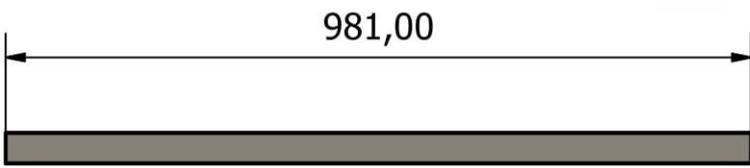
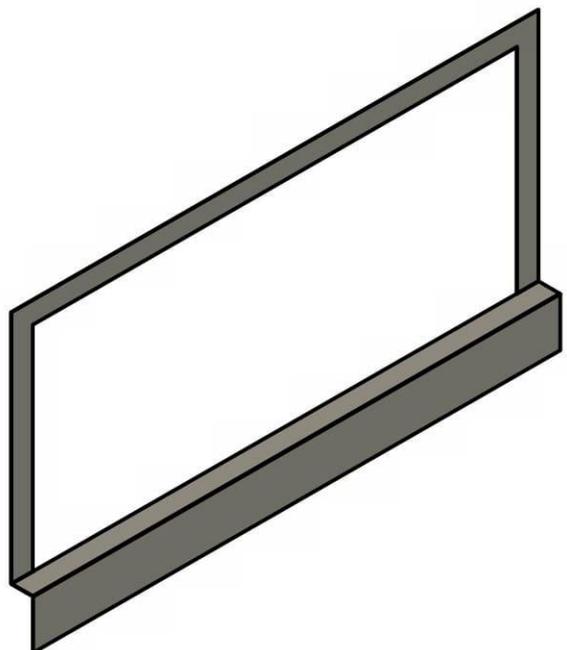
| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|----------------|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A3 |
| ESPOL | | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | |
| | | | Detalle ensamblado | Escala 1:10 | Hoja 3 / 13 |



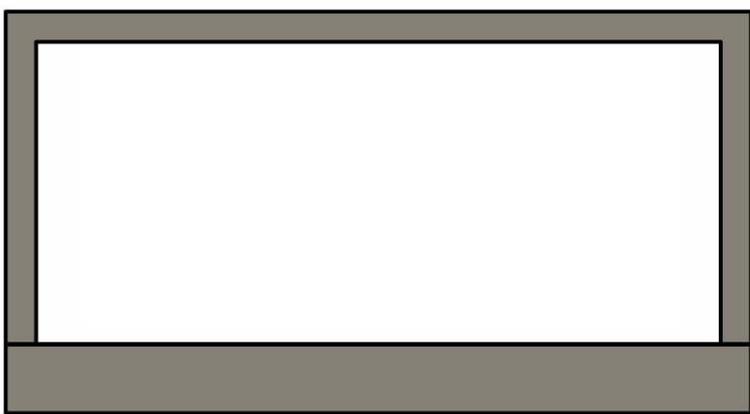
Unión de
placas
mediante
soldadura
TIG



| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|--------------------|----|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
| ESPOL | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | | |
| | | Estructura interna | Escala 1:10 | Hoja 4 / 13 | |



40,00



0,50

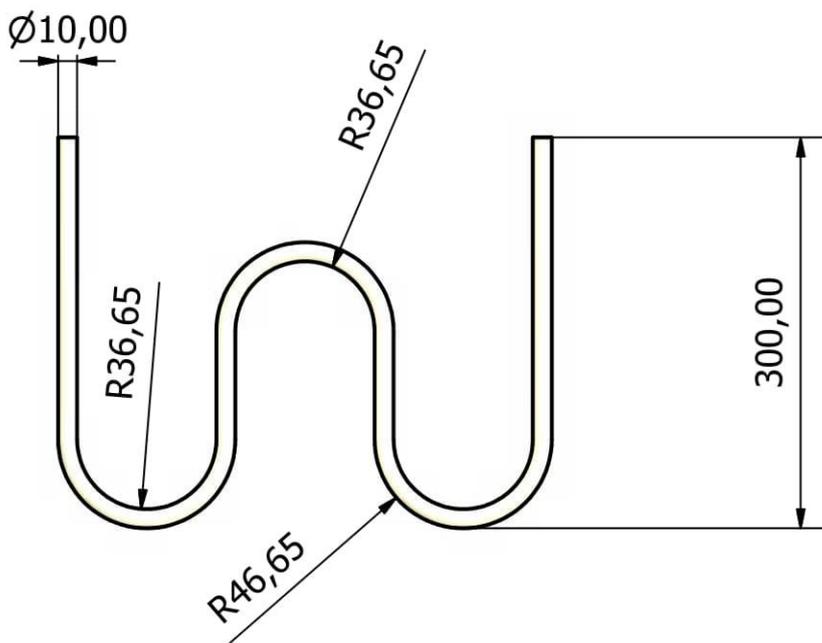
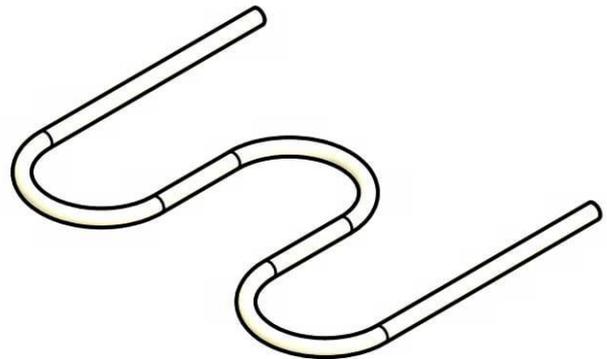
440,00

91,00

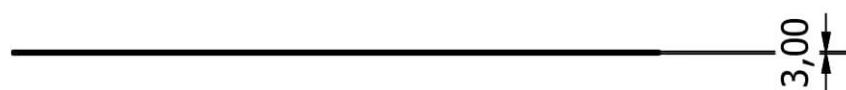
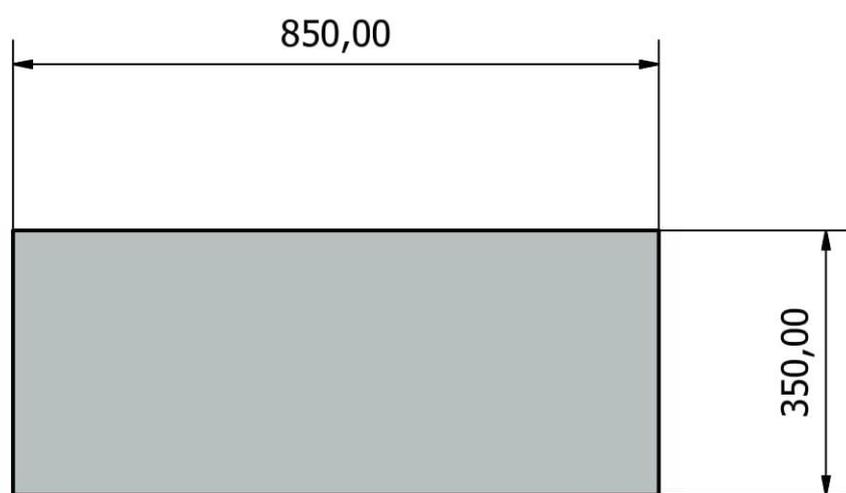
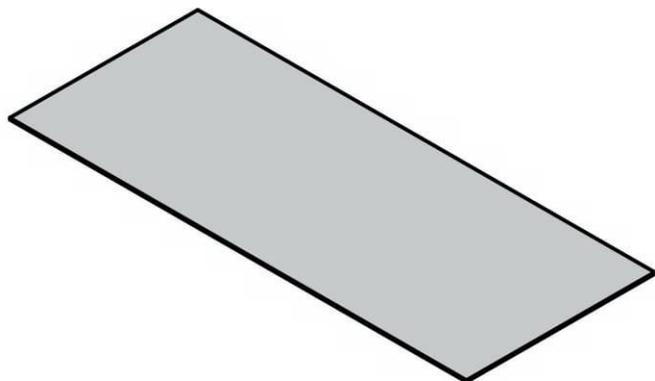


| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|--------------------|----|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
| ESPOL | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | | |
| | | Tapa frontal | Escala 1:10 | Hoja 5 / 13 | |





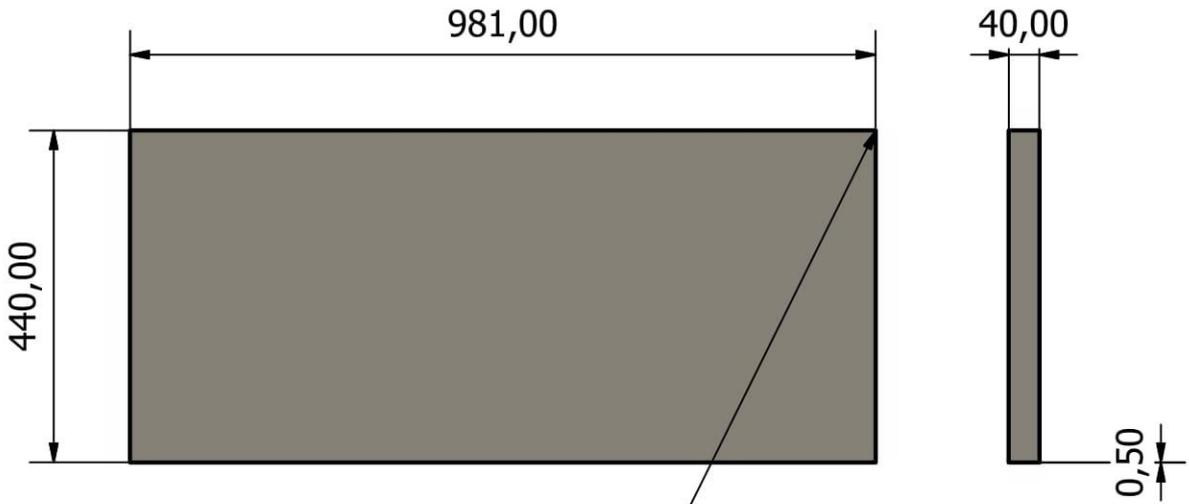
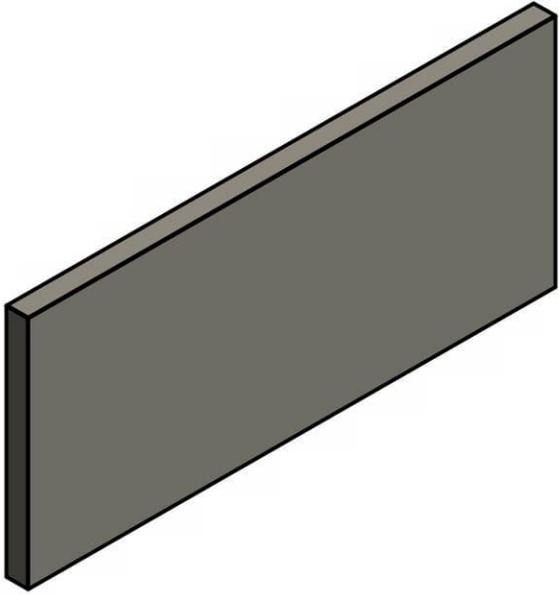
| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|----------------|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
| ESPOL | | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | |
| | | | Resistencia eléctrica | Escala 1 : 4 | Hoja 6 / 13 |



| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|----|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|----|

| | | | |
|--------------|--|----------------|----------------|
| ESPOL | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | |
| | Platina de Aluminio | Escala 1:10 | Hoja 7 / 13 |

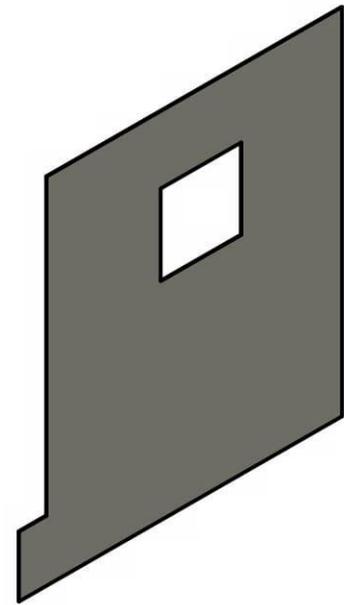
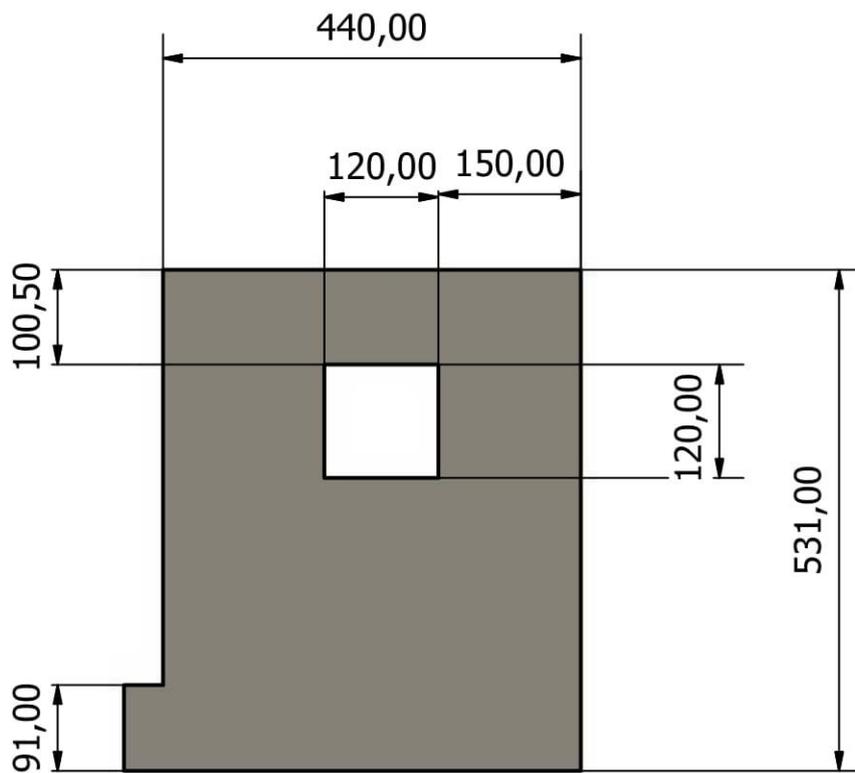




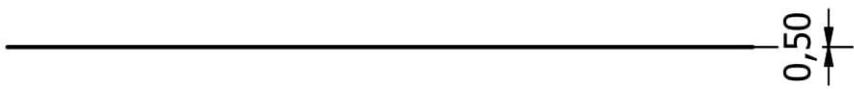
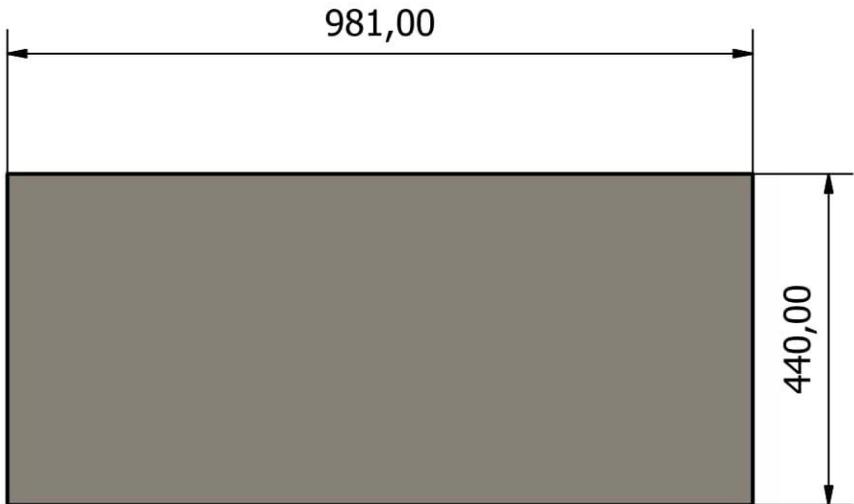
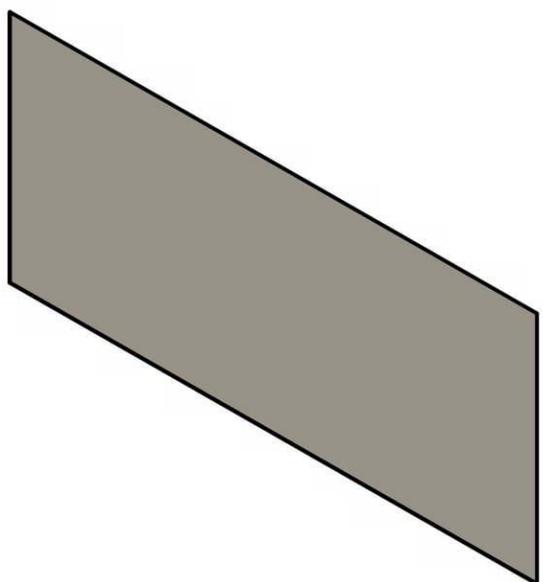
Aplicar soldadura TIG

| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|--------------------|----|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
| ESPOL | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | | |
| | | Puerta | Escala 1:10 | Hoja 8 / 13 | |

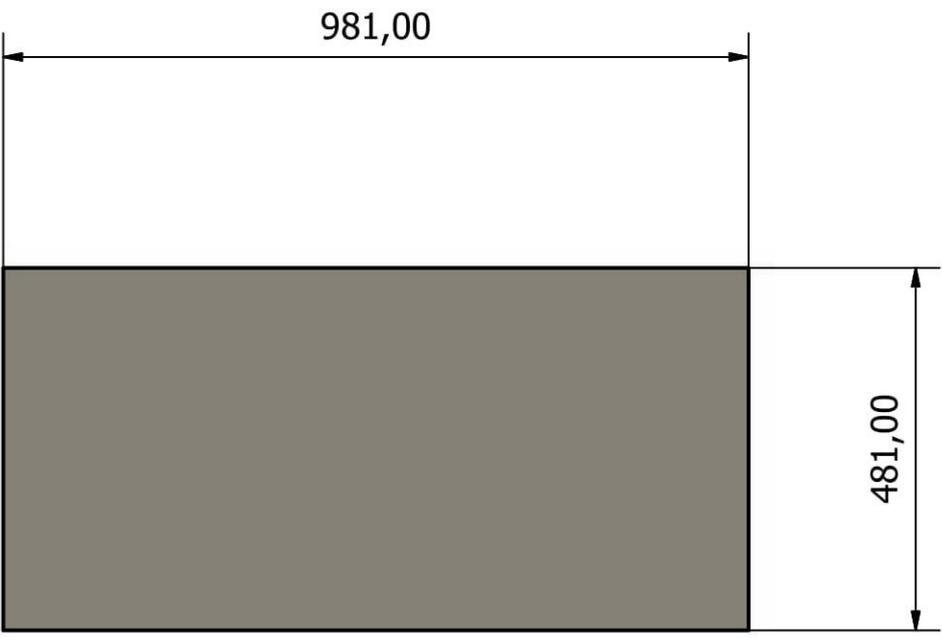
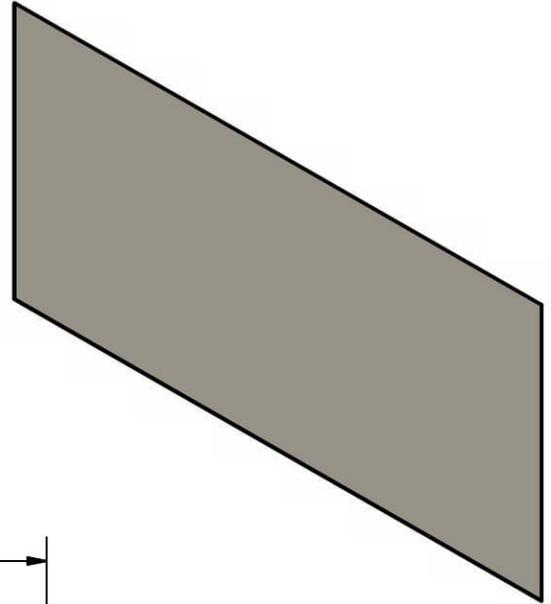




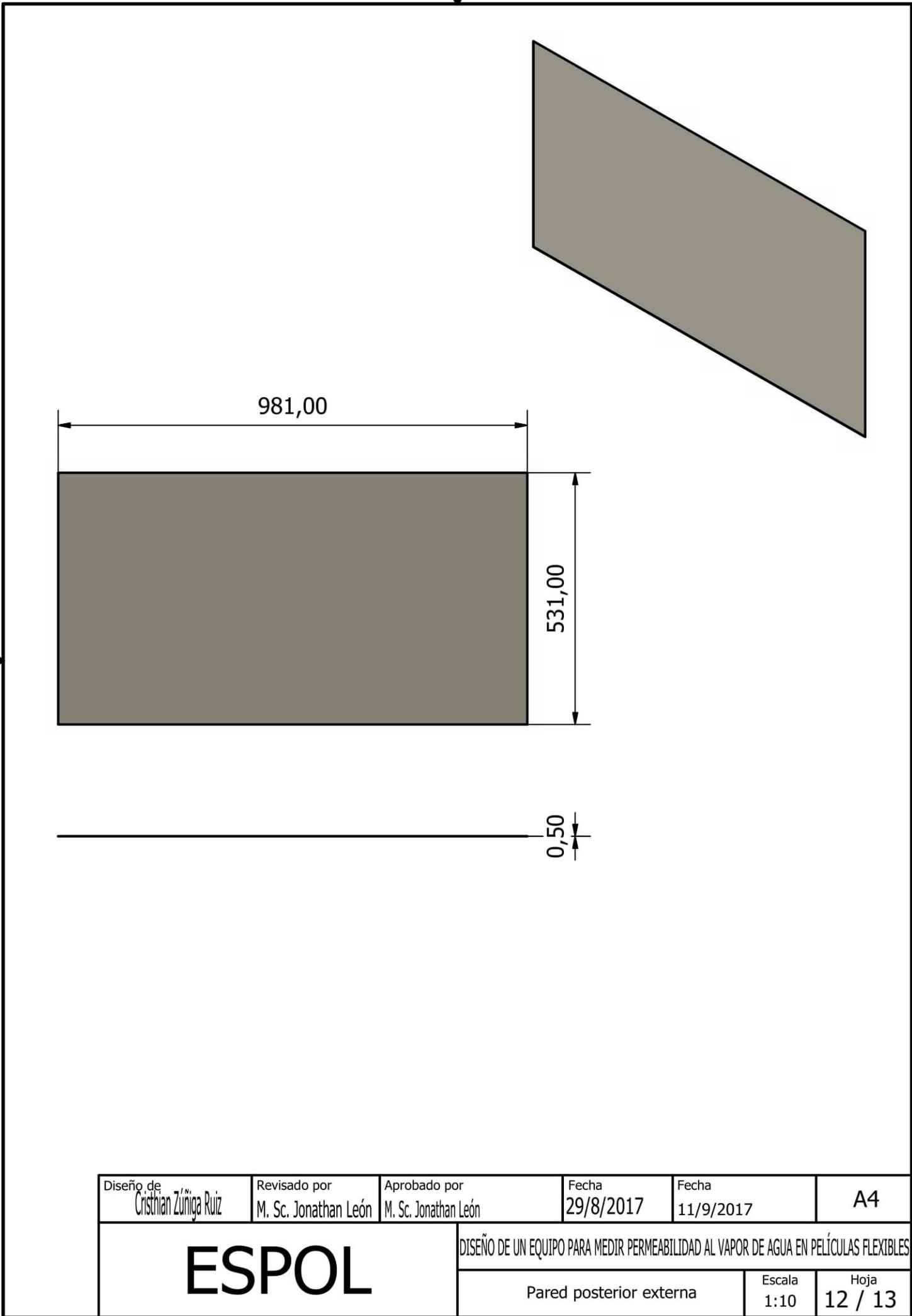
| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|--------------------|----|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
| ESPOL | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | | |
| | | Pared lateral externa | Escala 1 : 8 | Hoja 9 / 13 | |

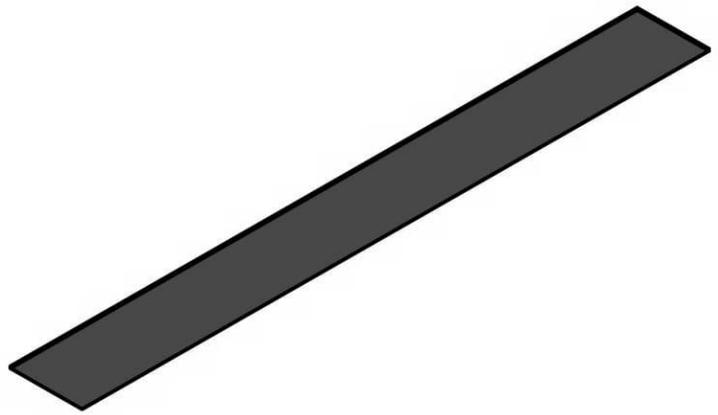
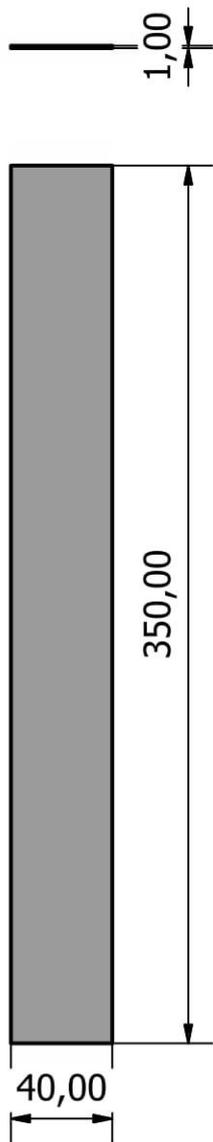


| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|--------------------|----|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
| ESPOL | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | | |
| | | Pared superiorexterna | Escala 1:10 | Hoja 10 / 13 | |



| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|--------------------|----|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
| ESPOL | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | | |
| | | Pared Inferior externa | Escala 1:10 | Hoja 11 / 13 | |





| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|--------------------|----|
| Diseño de Cristhian Zúñiga Ruiz | Revisado por M. Sc. Jonathan León | Aprobado por M. Sc. Jonathan León | Fecha 29/8/2017 | Fecha 11/9/2017 | A4 |
| ESPOL | | DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES | | | |
| | | Soporte en voladizo | Escala 1 : 3 | Hoja 13 / 13 | |



Bajaña, M. Moreno, D. Zúñiga, C. Macías, V.H.

mebajana@espol.edu.ec; dcmoreno@espol.edu.ec; cranzeni@espol.edu.ec; vhmacias@espol.edu.ec

DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR LA PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN PELÍCULAS FLEXIBLES

Materia integradora multidisciplinaria

INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto, se diseñó un equipo que permita ejecutar el ensayo modificado ASTM E95-96, para medir la permeabilidad al vapor de agua de películas flexible. Se dimensiono el área para el equipo así como el material para el mismo, mediante un análisis térmico se ejecutaron simulaciones para verificar la distribución de temperatura y humedad en el interior del equipo (25°C - 53% H.R.) las que se controlaran por medio de sensores y se registrara en un ordenador para posterior aplicación en el programa de calculo de resultados. La PVA, es una de las propiedades para películas de bio y no bio degradables que son aplicadas como envases para alimentos ya que se relaciona con el tiempo de vida útil. Para poder medir esta propiedad se necesitan de equipos que son de acceso es limitado y costo alto. Es la razón por la que se propone desarrollar el diseño de un equipo que sea capaz de medir la PVA en películas flexibles.

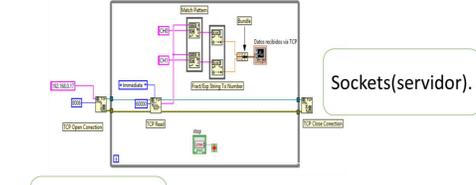
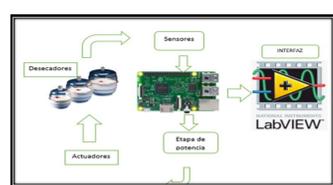
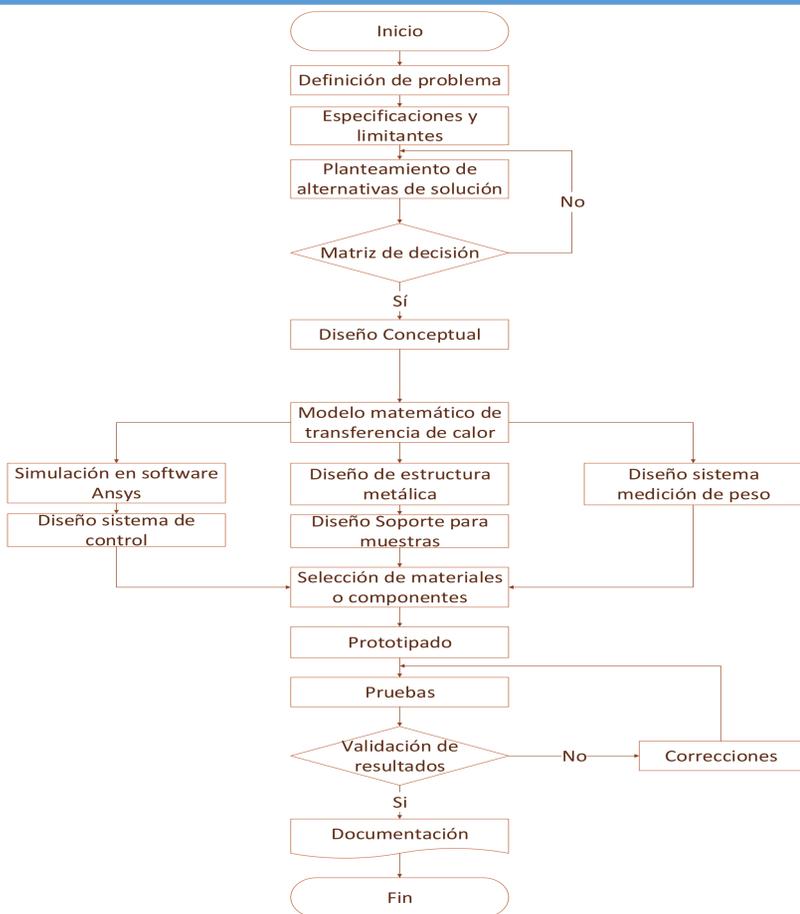
OBJETIVO GENERAL

Diseñar un equipo que pueda cumplir con el método modificado ASTM E96-95 de medición de permeabilidad al vapor de agua.

OBJETIVO ESPECIFICO

Diseño de estructura y selección se componentes mecánicos.
Diseño de la programación del sistema por sensores de control de humedad y temperatura con captación de datos.
Diseño de diferentes formulaciones biodegradables para ensayos en el equipo.

METODOLOGÍA



```

Código sensor de humedad Python
import socket
import sys
import time
import math

def main():
    host = '192.168.1.2'
    port = 8080
    s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    s.connect((host, port))
    s.send('H')
    data = s.recv(1024)
    print('Humedad: %s' % data)
    time.sleep(1)
    main()

if __name__ == '__main__':
    main()
    
```

```

Código sensor de Temperatura Python
import socket
import sys
import time
import math

def main():
    host = '192.168.1.2'
    port = 8080
    s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    s.connect((host, port))
    s.send('T')
    data = s.recv(1024)
    print('Temperatura: %s' % data)
    time.sleep(1)
    main()

if __name__ == '__main__':
    main()
    
```

```

Código activada de resistencia Python
import socket
import sys
import time
import math

def main():
    host = '192.168.1.2'
    port = 8080
    s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    s.connect((host, port))
    s.send('R')
    data = s.recv(1024)
    print('Resistencia: %s' % data)
    time.sleep(1)
    main()

if __name__ == '__main__':
    main()
    
```

```

Sockets en Python
import socket

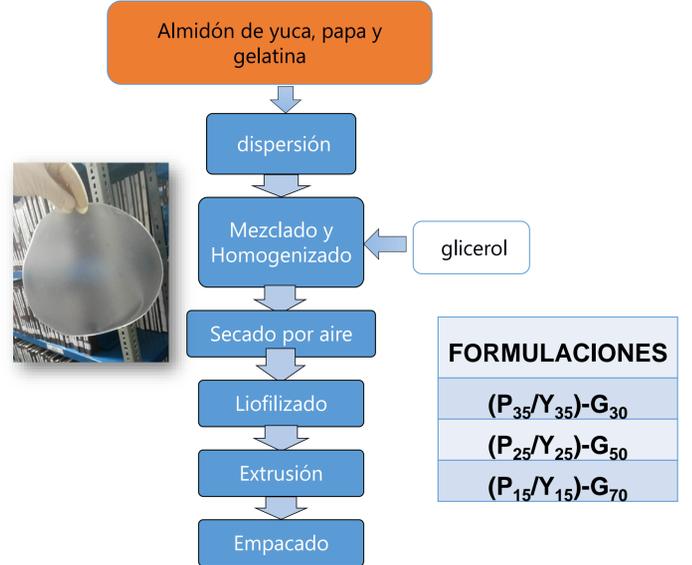
def main():
    host = '192.168.1.2'
    port = 8080
    s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    s.listen(5)
    while True:
        (conn, addr) = s.accept()
        print('Conexión desde: %s' % str(addr))
        conn.close()

if __name__ == '__main__':
    main()
    
```

CONCLUSIONES

- El material seleccionado para el equipo fue acero AISI 304 -2B, mate pulido, por preservar las muestras y la vida útil.
- La potencia necesaria en la resistencia eléctrica se estimó en base a las pérdidas en las paredes, y la energía para calentar el aire en el ambiente, teniendo como resultado una resistencia tubular de 300W, con dimensiones de 20x20cm y 3/8" de diámetro.
- Acorde a las simulaciones, la temperatura se mantuvo entre 22 a 25°C, variando de forma lenta y la humedad 50 a 53% requerido para el ensayo.
- El implementación del sistema mediante Raspberry Pi presentó un correcto funcionamiento durante las pruebas realizadas, permitiendo almacenar información de los ensayos, sin la necesidad de una persona supervisora.
- El espesor de (P₃₅/Y₃₅)-G₃₀ mantuvo valores similares a T_i y T_f de 113 μm, lo que indica retención de agua intercelular.
- Las formulaciones (P₁₅/Y₁₅)-G₇₀ y (P₂₅/Y₂₅)-G₅₀ presentaron valores de 3,33 y 3,14 g.mm.Kpa⁻¹.h⁻¹.m⁻² respectivamente para PVA.
- El costo de fabricación de (P₃₅/Y₃₅)-G₃₀, (P₂₅/Y₂₅)-G₅₀ y (P₁₅/Y₁₅)-G₇₀ fue de \$3,47, \$2,94 y \$2,81 respectivamente.

DIAGRAMA DE FLUJO para la elaboración de las películas



Las películas flexibles fueron elaboradas utilizando almidón de papa (P), yuca (Y) y gelatina (G). Todas las dispersiones se elaboraron al 3% de s.t. Las películas fueron almacenadas en desecadores con una solución de Nitrato de Magnesio Hexahidratado para ser caracterizadas en los parámetros: Espesor, PVA, Humedad, a los 7 y 30 días.

RESULTADOS

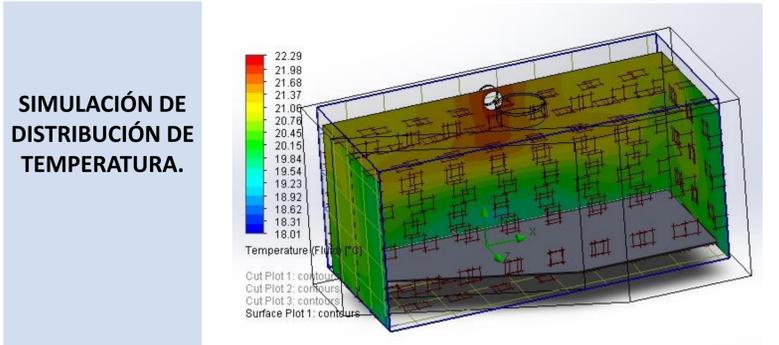
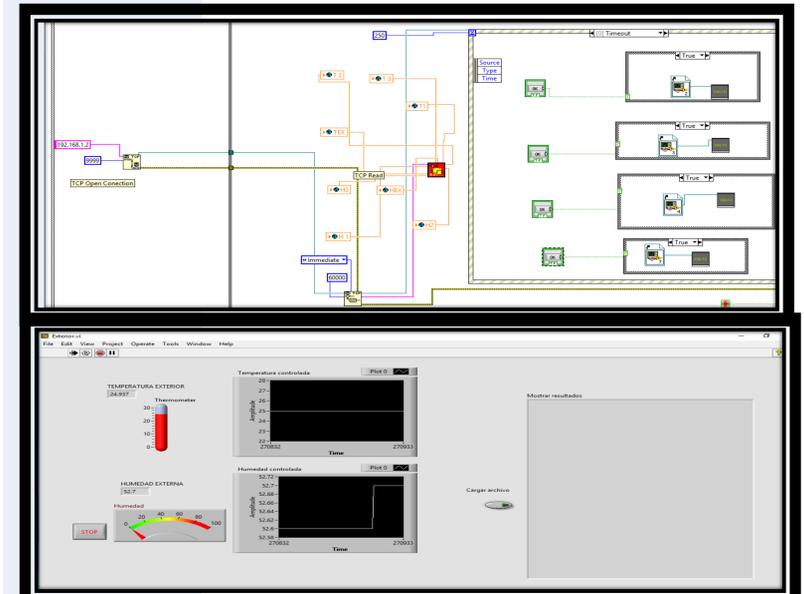
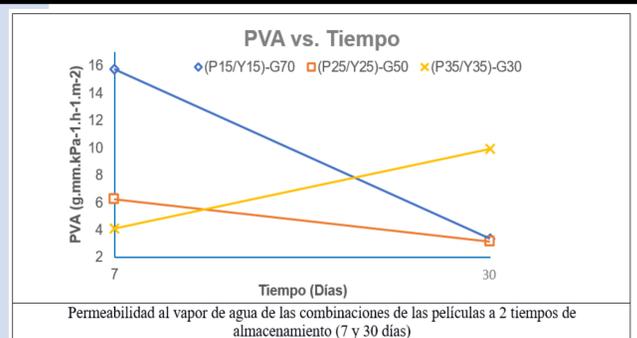


Diagrama de bloques de la programación en Labview, Interfaz del panel de control.



PVA



Diseño del prototipo de un equipo para medir la permeabilidad al vapor de agua.



BIBLIOGRAFÍA

Mchugh, T. H., Avena-bustillos, F. L., & Krochta, J. M. (1993). Hydrophilic Edible Films : Modified Procedure for Water Vapor Permeability and Explanation of Thickness Effects. *Journal of Food Science*, 58(4), 889-903.
Hibbeler, R. C. (2004). *Mecánica Vectorial para ingenieros. Estática* (Décima ed.). México: Pearson Educación.
Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas. Un enfoque integrado*. México: Pearson.