



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño y construcción de una  
cámara ambiental con temperatura  
controlada para apoyar en los  
estudios de mecánica de suelos**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A**

Andrés Daniel Cruz Sarmiento

**DIRECTOR DE TESIS**

Ing. José Luis Rodríguez Pérez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA CAMARA AMBIENTAL CON TEMPERATURA CONTROLADA PARA APOYAR EN LOS ESTUDIOS DE MECANICA DE SUELOS que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

**ANDRES DANIEL CRUZ SARMIENTO**  
Número de cuenta: 316342726

## Índice de contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	ANTECEDENTES.....	5
1.2	OBJETIVO .....	7
1.3	RESUMEN.....	8
2.	CONSIDERACIONES Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LA CÁMARA AMBIENTAL ..	9
3.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA AMBIENTAL .....	15
3.1.	DIMENSIONES.....	15
3.2.	ESTRUCTURA.....	17
3.3.	VENTANAS .....	26
3.4.	RECUBRIMIENTOS Y AISLANTES.....	29
3.4.1.	DATOS TÉCNICOS DE RECUBRIMIENTOS Y AISLANTE. ....	30
3.4.2.	PRUEBAS TÉRMICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS Y AISLANTE.....	32
3.4.3.	COLOCACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS Y AISLANTES.....	39
3.5.	CÁMARA FOTOGRÁFICA.....	52
3.6.	EVALUACIÓN INICIAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL CONJUNTO.....	53
4.	SISTEMA ELECTRÓNICO.....	56
4.1.	CONTROLADOR DE TEMPERATURA.....	56
4.1.1.	FUNCIONAMIENTO .....	57
4.1.2.	MEMORIA DE CÁLCULO .....	60
4.2.	UNIDAD DE POTENCIA.....	71
4.3.	FUENTE DE PODER.....	74
4.4.	CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD .....	75

5.	INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y ACTUADORES .....	77
6.	RESULTADOS.....	82
7.	CONCLUSIONES.....	83
8.	REFERENCIAS.....	84

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la eléctrica y electrónica es parte fundamental del desarrollo humano. Su impacto ha tenido un crecimiento exponencial a lo largo de los años, fungiendo como un gran apoyo para distintas áreas de investigación y modernización en la actualidad, abarcando varios campos de conocimiento. En este contexto, la ingeniería eléctrica y electrónica no se limita a la generación o distribución de energía, sino que también participa activamente en la creación de equipos de medición, control, automatización y experimentación para el avance de la ciencia y la tecnología.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar y construir una Cámara Ambiental con control de temperatura, destinada a apoyar experimentos del área de geotecnia en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este sistema busca simular condiciones térmicas naturales para la observación y posterior análisis del comportamiento de las muestras analizadas. La documentación incluye tanto el diseño y construcción de la cámara como el desarrollo del sistema electrónico del control de temperatura, cumpliendo con criterios de funcionalidad, seguridad y eficiencia.

## 1.1 ANTECEDENTES

Uno de los campos donde la ingeniería eléctrica brinda apoyo es la mecánica de suelos, una rama esencial dentro de la ingeniería civil y geotécnica. Esta área requiere condiciones de laboratorio controladas para simular los efectos de diferentes variables ambientales sobre los materiales del suelo. Entre estas variables, la temperatura juega un papel fundamental, ya que influye directamente en las propiedades como la resistencia al corte, la deformación, la permeabilidad y la capacidad de retención de agua, entre otras.

Diversos estudios han demostrado que los cambios térmicos, aun dentro de rangos moderados, inducen variaciones en sus características, tales como, la viscosidad del agua en los poros y los procesos de succión capilar, lo cual afecta directamente la estabilidad estructural del suelo (Mitchell & Soga, 2005). Esto resulta especialmente relevante en contextos geotécnicos donde las condiciones climáticas extremas o las instalaciones sometidas a calentamiento artificial (como ductos enterrados o cimentaciones profundas) pueden generar gradientes térmicos importantes.

La respuesta del suelo ante ciclos de calentamiento y enfriamiento también ha sido objeto de estudio experimental. Tang *et al.* (2008), por ejemplo, evaluaron la conductividad térmica de suelos compactados y encontraron una dependencia significativa entre la temperatura y las propiedades físicas del suelo, lo cual evidencia la necesidad de realizar ensayos en condiciones controladas para obtener resultados representativos.

Para llevar a cabo este tipo de análisis, diversos laboratorios internacionales han implementado cámaras ambientales que permiten simular rangos específicos de temperatura y humedad. Estos equipos deben cumplir con criterios de aislamiento térmico, estabilidad de temperatura, seguridad eléctrica y accesibilidad operativa. En muchos casos, se recurre a soluciones industriales complejas y costosas, diseñadas para otras disciplinas

como la farmacología, la climatología o la ingeniería de materiales, que no siempre se ajustan a las necesidades particulares de la mecánica de suelos.

Dentro del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se ha identificado la necesidad de contar con un sistema propio, económico y adaptable, que permita simular ambientes térmicos para estudios de geotecnia. Este requerimiento dio origen al presente proyecto, el cual plantea el diseño y construcción de una Cámara Ambiental controlada.

Desde el punto de vista del diseño de sistemas ambientales, instituciones como ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) han documentado los principios técnicos que deben considerarse para lograr un control térmico eficiente en espacios cerrados, especialmente en laboratorios. Esto incluye aspectos como el aislamiento térmico de superficies, la distribución uniforme del calor o frío, la elección de materiales con baja inercia térmica, y la implementación de sistemas de control automatizado para evitar oscilaciones o picos de temperatura (ASHRAE, 2021).

## 1.2 OBJETIVO

El propósito de esta tesis es diseñar y construir en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, una Cámara Ambiental equipada con un sistema de control de temperatura bidireccional, para incrementar o decrementar la temperatura sobre el nivel ambiente, aplicable en el estudio de mecánica de suelos.

El trabajo incluye la realización de la Cámara Ambiental, su controlador electrónico de temperatura para uso independiente o asociado con una computadora, y accesorios: dos ventanas, un soporte para equipo fotográfico y la iluminación interna.



### 1.3 RESUMEN

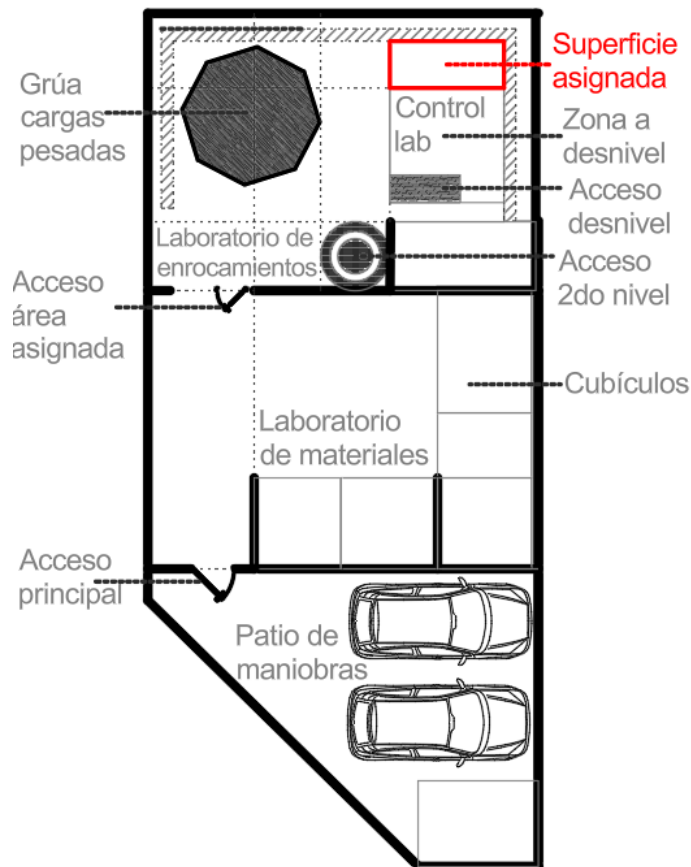
En este trabajo se presenta el proceso de diseño y construcción de una Cámara Ambiental con control de temperatura, desarrollada para apoyar estudios en el área de mecánica de suelos. El proyecto comenzó con el reconocimiento del espacio disponible, la toma de medidas, definición de dimensiones y elaboración de los primeros bocetos, tanto en 2D como en 3D, los cuales sirvieron como guía para su construcción.

Se documenta la construcción de la estructura y el montaje de los recubrimientos, incluyendo un análisis básico de las propiedades térmicas de los materiales utilizados. Se muestra también la disposición de los elementos estructurales, ventanas y accesorios, así como la forma en que fueron instalados.

Posteriormente, se presentan los diagramas y la descripción del sistema electrónico, incluyendo el controlador de temperatura, la fuente de poder y la unidad de potencia, junto con los actuadores y elementos de automatización del sistema. Finalmente, se describe la instalación eléctrica, los criterios de seguridad implementados y las consideraciones funcionales para garantizar el correcto desempeño del sistema en condiciones de operación prolongada.

## 2. CONSIDERACIONES Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LA CÁMARA AMBIENTAL

Con el propósito de apoyar al departamento de Geotecnia, específicamente en el estudio de la mecánica de suelos, se asignó una ubicación específica dentro del laboratorio para desarrollar e instalar una Cámara Ambiental, situada en el edificio 7 del Instituto de Ingeniería. La superficie asignada para la cámara es de forma rectangular. Dos de sus lados están delimitados por los muros del edificio, un tercero está definido por un barandal que marca la separación entre dos zonas dentro del laboratorio y el último de los cuatro lados funcionará como acceso y está conectado con el resto del laboratorio para permitir el ingreso y egreso de materiales e instrumentos necesario para las pruebas.

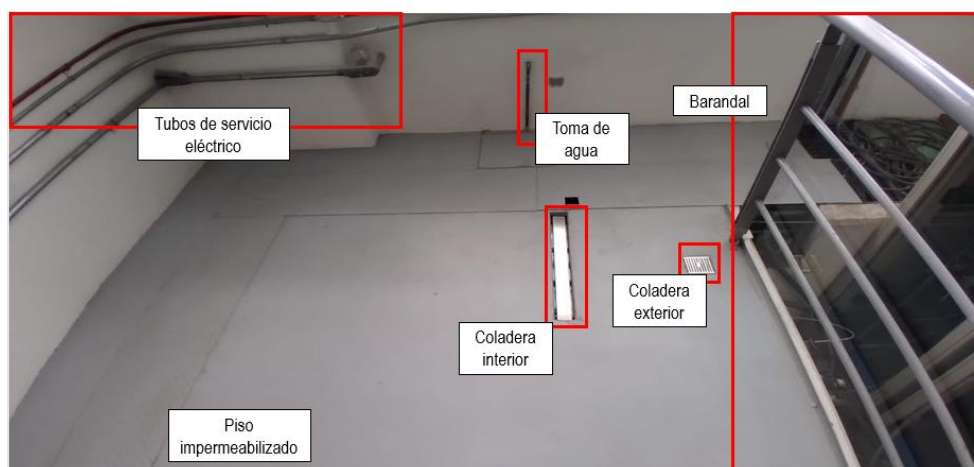


*Ilustración 1. Planta del laboratorio y ubicación de la Cámara Ambiental.*

La superficie asignada cuenta con presencia de tuberías para uso eléctrico, instaladas en los muros del edificio. Además de la existencia de tableros eléctricos para servicios del edificio en el muro izquierdo del área.

El perímetro con el que se contó para trabajar mide 242 cm de ancho, medido desde el muro izquierdo hasta el barandal, de ahí se dio espacio para la cámara y un acceso peatonal.

Por otra parte, desde la pared del fondo hasta el primer tablero eléctrico que define el límite máximo para la profundidad de la cámara. Por último, la altura disponible es de 230 cm de alto medidos desde el suelo hasta el techo existente, que sirvió para definir la altura de la cámara, junto con la instalación del equipo fotográfico, además de acceso para mantenimiento. En la Ilustración 2. Área asignada para la instalación de la Cámara Ambiental. se muestra el área asignada para su instalación.



*Ilustración 2. Área asignada para la instalación de la Cámara Ambiental.*

Como se aprecia en la Ilustración 2. Área asignada para la instalación de la Cámara Ambiental., el espacio disponible para la cámara se preparó previamente, impermeabilizando el piso a manera de evitar filtraciones de humedad. También se

instalaron dos coladeras para drenaje, la primera de forma rectangular para recoger el agua proveniente del interior de la cámara. La segunda, de forma cuadrada para recoger agua en el pasillo de acceso. Se preparó también una ligera pendiente para facilitar el acceso de agua a estos drenajes.

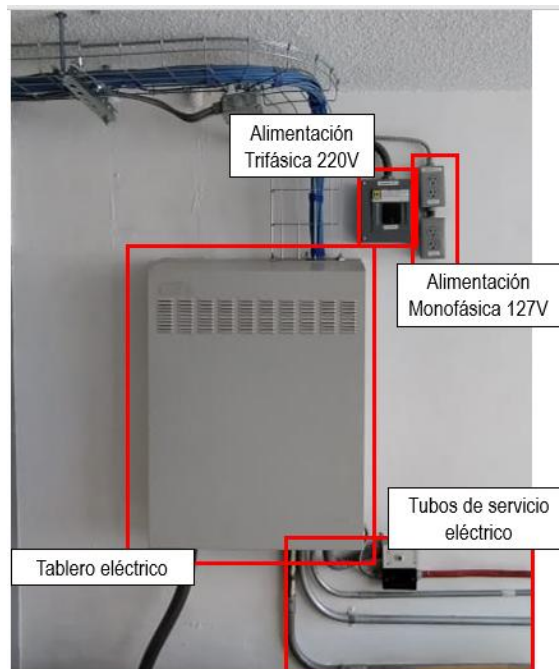
Por su parte, al fondo se aprecia una entrada de agua potable para abastecer futuros servicios de humedad y agua en la cámara, no contemplados en este trabajo.

Los servicios eléctricos mencionados se aprecian en el muro izquierdo y en el del fondo, que pueden ser observados también en las Ilustración 3. Tuberías de servicios eléctricos en muro de lado derecho. e Ilustración 4. Disposición eléctrica del laboratorio.. Y a la derecha el barandal que delimita el área.



*Ilustración 3. Tuberías de servicios eléctricos en muro de lado derecho.*

Además de las instalaciones mencionadas, también tenemos un tablero eléctrico, junto con tres tipos de entradas de alimentación, dos de ellas siendo de tipo monofásica a 127 V y una de tipo trifásica a 220 V, que se muestran en la Ilustración 4. Disposición eléctrica del laboratorio.



*Ilustración 4. Disposición eléctrica del laboratorio.*

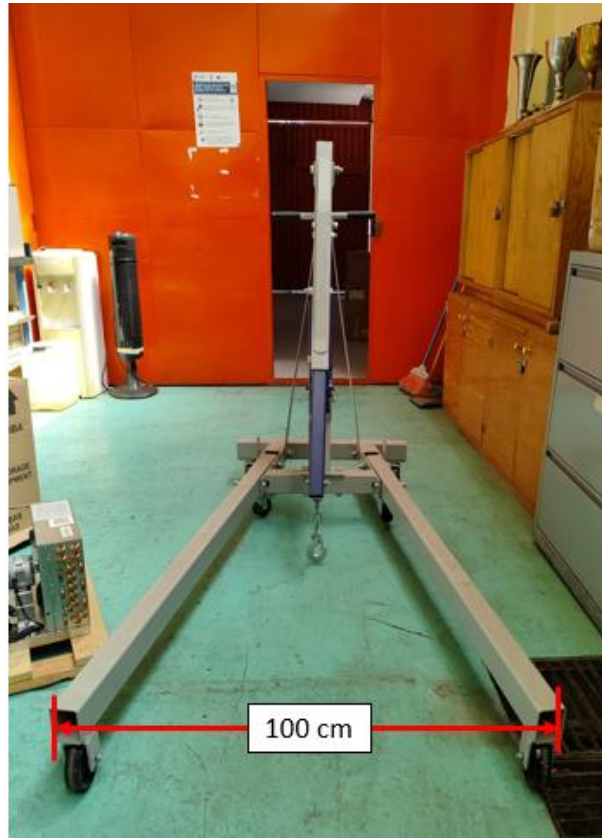
Considerando las limitaciones que tenemos en el espacio asignado, se decidió que la cámara se montaría a una distancia razonable de ambos muros del edificio, asegurando así la integridad de los servicios eléctricos. Considerando también el espacio destinado al pasillo peatonal entre la Cámara Ambiental y el barandal que delimita las áreas, obteniendo así el ancho total de la cámara.

Las dimensiones de la Cámara Ambiental se adaptaron para dar cavidad a los accesorios que se requerían, tales como el soporte para el equipo fotográfico. También cuenta con dos ventanas, una en la pared que da al paso peatonal y otra ventana en el techo que se centra de acuerdo con el equipo fotográfico. A su vez, también alineada a estos, por el interior de la cámara se consideró un espacio para una mesa circular de aproximadamente 105 cm de diámetro como soporte para las muestras de análisis, que se ubicó al lado de la ventana del costado, dejando un espacio de 15 cm entre ambas, para poder observar a través del pasillo.

Se consideró el área necesaria para que una persona entre a la cámara y facilite la colocación de la muestra sobre la mesa, mientras otra persona manipula una grúa donde vendrá montada la pieza de análisis. Además, se contempló el espacio asignado para los actuadores utilizados, de los cuales, mencionaremos algunas especificaciones en las secciones correspondientes.

Para evitar el encharcamiento de líquidos dentro de la cámara y además facilitar su limpieza, era importante realizar la instalación tal que la coladera rectangular quedara dentro del cuarto, para poder tener un escape de los posibles líquidos acumulados, ya sea por el trabajo de la propia cámara o la limpieza de esta. Dicho escape, se puede observar en la Ilustración 2. Área asignada para la instalación de la Cámara Ambiental..

Una característica adicional con las que la cámara debía cumplir es, que las dimensiones permitan el ingreso de la grúa, la cual es mostrada en la Ilustración 5. Grúa., con la que se transportarán las muestras a analizar, que tiene un ancho de 100 cm entre los extremos de sus patas, además de permitir el acceso de una persona sin necesidad de realizar posturas incómodas mientras la grúa esté dentro, esto teniendo en cuenta el techo existente y los accesorios mencionados.



*Ilustración 5. Grúa.*

### 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA AMBIENTAL

Luego de definir el espacio disponible, se procedió plasmando el diseño de la cámara de un boceto simple a un software en 2D y 3D. Este último fue de gran ayuda, ya que permitió la visualización del sistema completo, parte por parte, siendo más sencillo observar algunos detalles que requirió la construcción, además de ayudar a realizar el inventario de los materiales que se utilizaron.

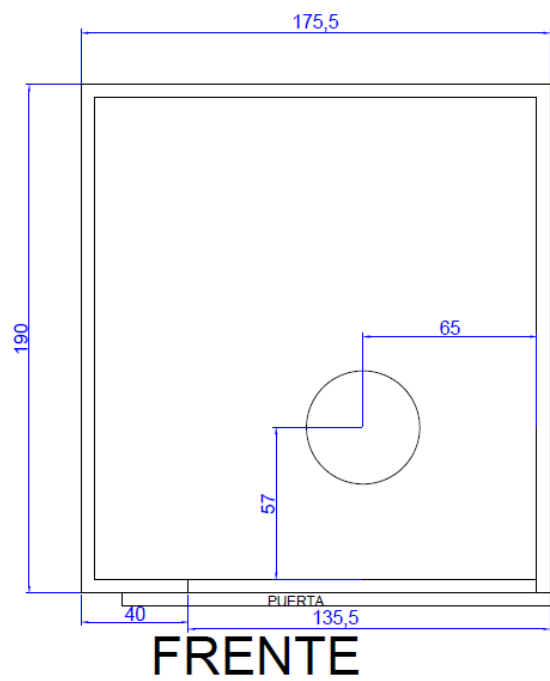
#### 3.1. DIMENSIONES

Teniendo en cuenta las restricciones mencionadas en el capítulo anterior, se decidió que el ancho de la cámara fuera de 175.5 cm, colocando la pared que va contra el muro unos centímetros alejada de este para evitar dañar el suministro eléctrico y dejando espacio para el pasillo peatonal.

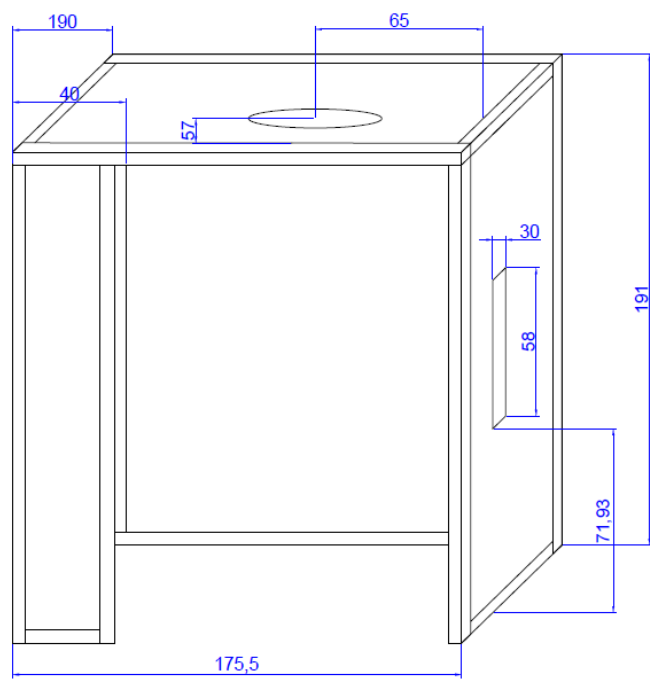
Se planteó una medida de 190 cm para el largo de la cámara, con 5 cm agregados para la puerta, respetando también una distancia entre el muro del edificio y el del sistema, tanto para el cuidado de los servicios eléctricos, así como también para el mantenimiento del lugar.

Para el caso del techo, se utilizó la medida de un equipo fotográfico convencional, además del soporte, que se consideró de aproximadamente 35 cm. Teniendo así un espacio de 191 cm respecto al suelo. Dejando una distancia de 39 cm del techo de la cámara al techo existente del área asignada.





*Ilustración 6. Primer Boceto. Vista Planta.*



*Ilustración 7. Primer Boceto. Vista Isométrica.*

## 3.2. ESTRUCTURA

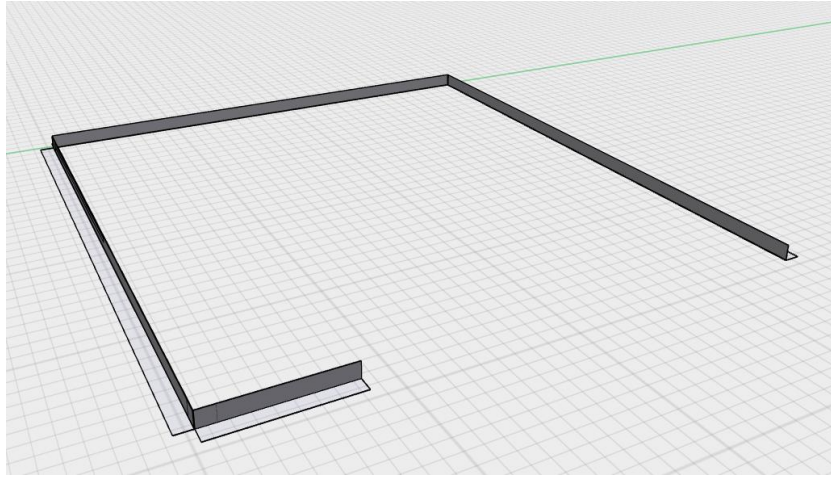
El material principal utilizado para la construcción de la Cámara Ambiental fue aluminio. Ya que este material nos daría firmeza y estabilidad para la estructura.

Para los recubrimientos fue necesario considerar materiales los cuales pudieran soportar la temperatura (45 °C) mostrando la menor deformación posible, teniendo en cuenta los cambios de temperatura y el tiempo al que estos serían sometidos, además de contar con un gran nivel de aislamiento. Se optó entonces porque la cámara fuera cubierta por dos piezas de policarbonato una mayor que la otra, y en medio de ellas una de material aislante térmico de espuma rígida de poliestireno. Esto por cada cara con la que cuenta el sistema, con excepción del suelo, apoyándonos en el ya existente.

Ya que las paredes de la cámara fueron cubiertas por dos piezas de policarbonato y una de aislante se necesitó de doble estructura, una interna y otra externa. La estructura interna sirvió para cargar todo el sistema, siendo el punto de apoyo de los recubrimientos que se colocarían. Mientras que la estructura exterior representa un límite para los recubrimientos externos, funcionando como un apoyo complementario para mayor rigidez de la estructura completa.

Una vez que se definieron los elementos básicos de nuestro sistema, transferimos esos bocetos al software en 3D. El cual, como ya se mencionó, fue de gran ayuda. Por lo que a continuación se mostrarán imágenes del mismo diseño en 3D, así como también de la construcción de la cámara.

Comenzando por una base que marca las dimensiones de largo y ancho mencionadas anteriormente.



*Ilustración 8. Base de la estructura en software 3D.*

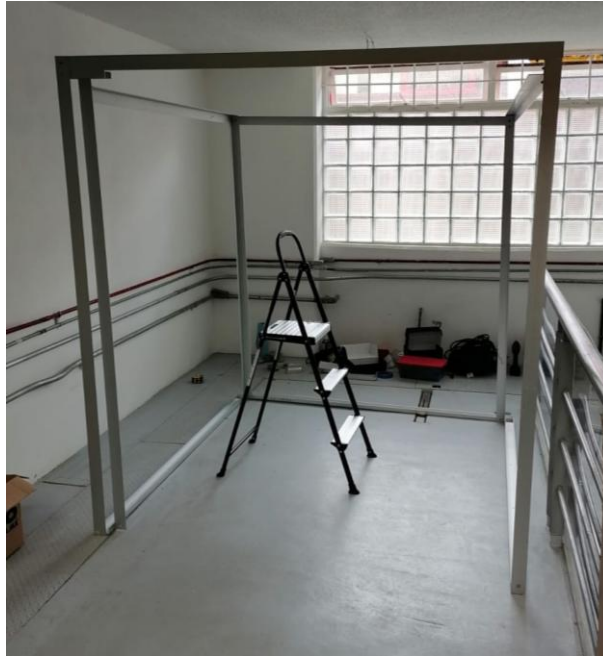


*Ilustración 9. Base construida.*

Esta base fue la que estableció las esquinas en las que colocaríamos las columnas para el apoyo de cada pared, siendo estos perfiles de aluminio en forma de 'L' o 'ángulo'. Generando un apoyo en el encuentro entre ambas piezas tanto para el lado interior y exterior.

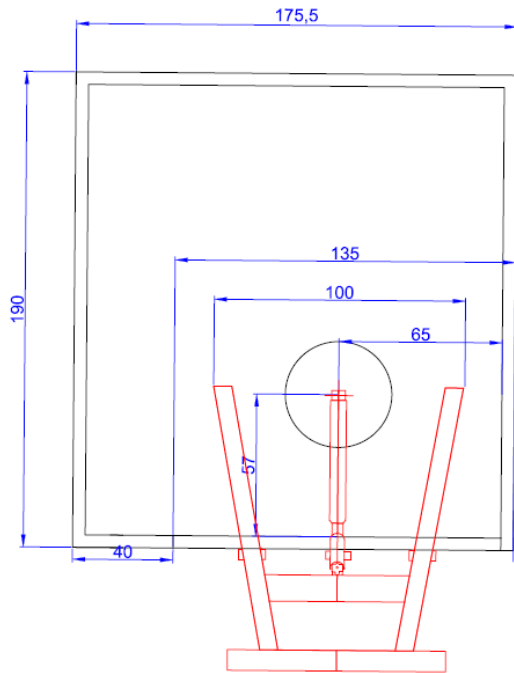
La estructura interior se inició colocando las columnas de las esquinas y conectando cada columna con otra pieza de ángulo, con excepción de la cara de frente. Esas columnas

fueron unidas por un tubo en U, formando el marco de la puerta, dando mayor firmeza a la estructura y sosteniendo los recubrimientos tanto de las paredes como del techo.

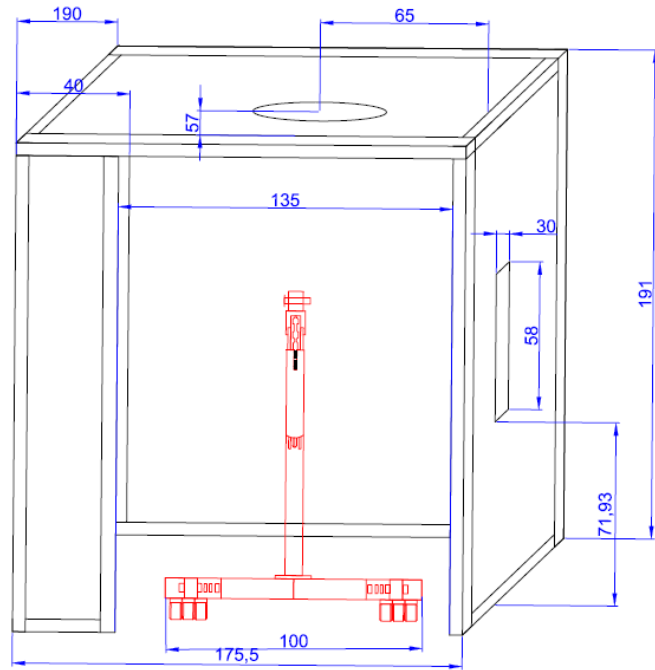


*Ilustración 10. Estructura interior construida.*

La cara de enfrente funciona como la entrada, permitiendo el paso de la grúa. Ya que la manipulación de esta no es del todo sencilla, se dio un espacio aún mayor al tamaño de la grúa para evitar el choque con las columnas de la entrada de la Cámara Ambiental y que entre de manera cómoda. Quedando entonces, una pared de 40 cm y un espacio para la puerta de 135 cm. Dejando 35 cm de más para la maniobra de la grúa, lo cual consideramos es suficiente. En las siguientes ilustraciones, se aprecia el paso de la grúa al interior de la cámara.



*Ilustración 11. Paso de la grúa. Vista Planta.*



*Ilustración 12. Paso de la grúa. Vista isométrica.*

En la parte trasera de la cámara, en el interior de esta, se colocaron otros dos perfiles de ángulo para así formar dos estantes, donde colocamos más adelante los actuadores necesarios para llevar a cabo los estudios. Estos estantes pueden ser vistos con mejor claridad en la Ilustración 23. Instalación de ventana lateral.. Una vez que la estructura interna se consideró estable y nivelada, se continuó instalando la estructura exterior.

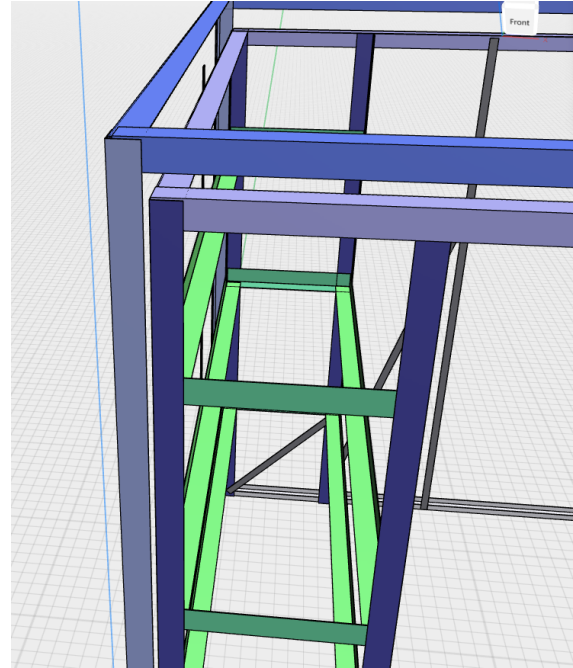


*Ilustración 13. Construcción de estructura exterior.*

Al igual que con la estructura interna, se colocó un perfil con forma de ángulo en cada esquina siendo posteriormente cada uno de ellos conectados entre sí por otro perfil con forma de ángulo.



*Ilustración 14. Estructura exterior.*

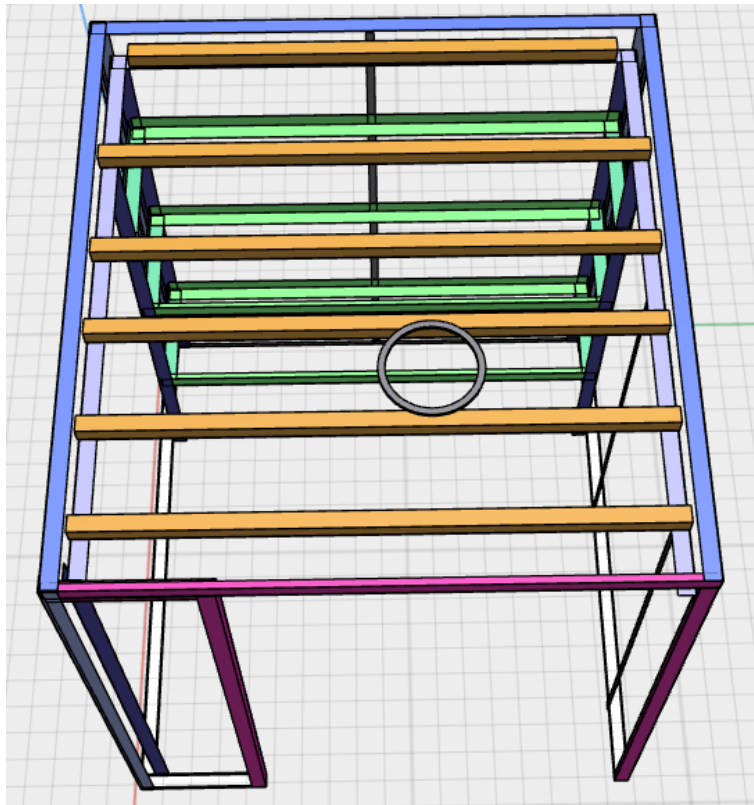


*Ilustración 15. Estructura exterior 3D.*

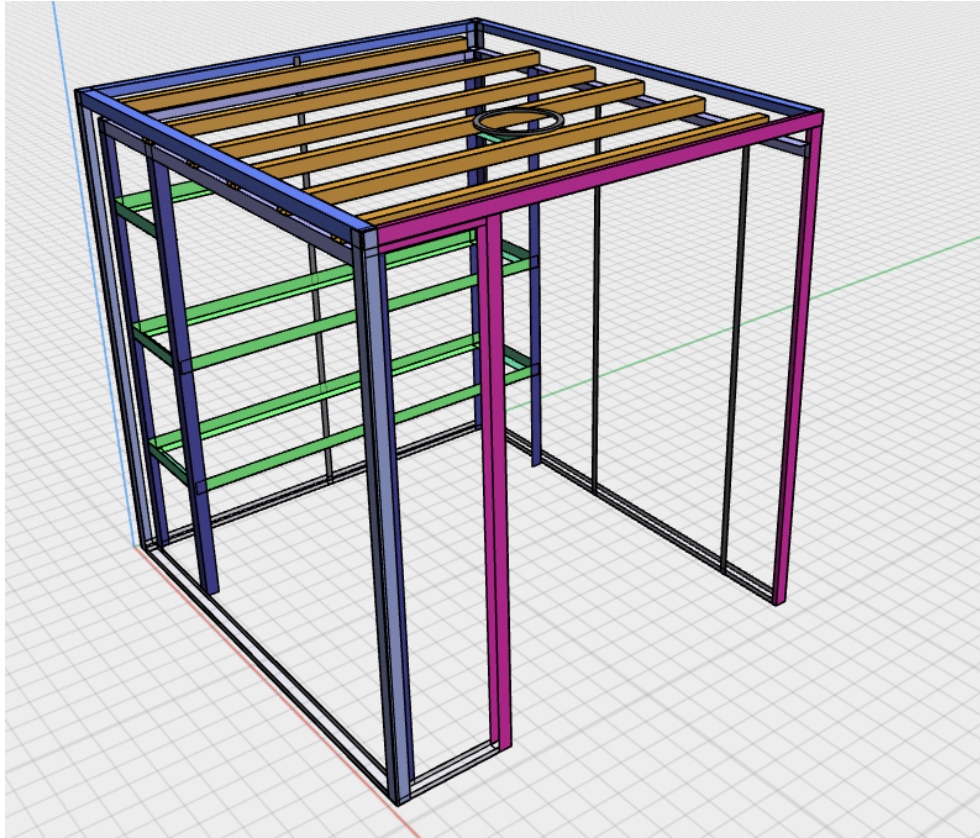
Para el techo, se utilizaron perfiles de tubo cuadrado, que fueron colocados a distancias específicas tanto para dar rigidez al techo y mantener recta la estructura, como para que no estorbe al momento de colocar la ventana más adelante. Además de funcionar de apoyo para alguno de los actuadores.



*Ilustración 16. Techo construido.*



*Ilustración 17. Modelo 3D del techo.*



*Ilustración 18. Modelo completo en 3D de la cámara sin recubrimientos.*

Al momento de la construcción se decidió iniciar la colocación de los recubrimientos de la pared que daba al muro izquierdo del edificio, ya que, al fijar la base al suelo, sería muy complicado manipular los materiales con la estructura ya construida. La colocación de los recubrimientos será comentada con mayor detalle más adelante en su debida sección.

Para fijar la construcción al suelo del laboratorio se utilizaron ángulos de aluminio, que fueron colocados en puntos estratégicos de la cámara y luego fijados al suelo para evitar que esta se moviera.





*Ilustración 19. Fijación de la Cámara Ambiental al suelo.*



*Ilustración 20. Fijación de la Cámara Ambiental al suelo.*

Se decidió que para la puerta se dividiera en tres secciones colocando tres perfiles en forma de 'T' de cada lado, alineados en parejas, para que se trate de tres juegos de recubrimientos y aislante por cada espacio.



*Ilustración 21. Construcción de la puerta.*



*Ilustración 22. Vista interior de la estructura de la puerta.*

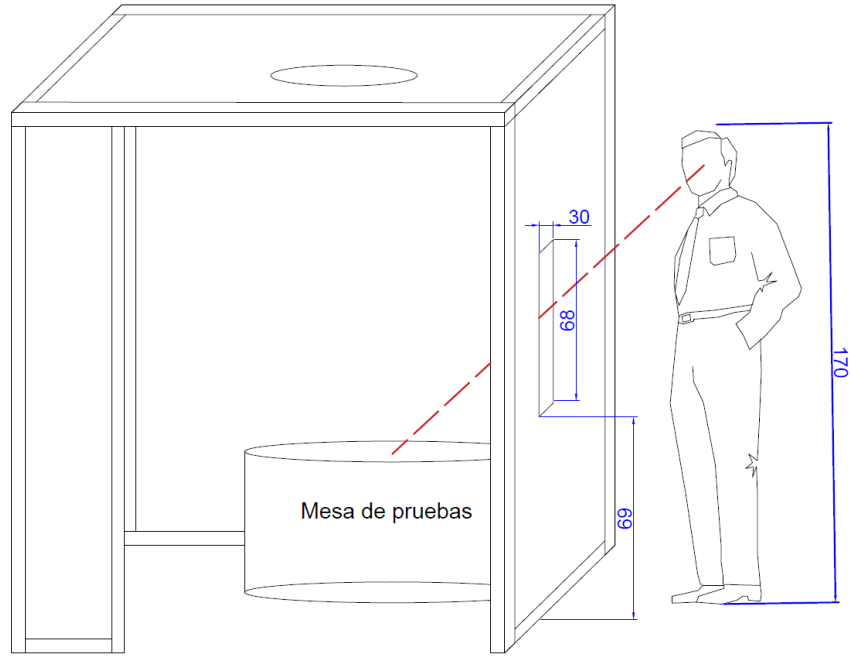
### 3.3. VENTANAS

Una vez que se instaló toda la estructura, tanto interna como externa. Se determinó una cierta distancia a la cual colocamos dos columnas, ambas con la intención de sostener el marco de su respectiva ventana.



*Ilustración 23. Instalación de ventana lateral.*

Las medidas de la ventana son de 30 cm de ancho por 68 cm de largo. Fue colocada a 69 cm del suelo, esto se determinó de acuerdo con el tamaño promedio de una persona que esté observando, donde bien tendrá que inclinar un poco la vista, ya que la mesa no es muy alta, pero no requerirá de una posición incómoda para observar. Tal como se puede ver en la Ilustración 24. Visualización de altura de ventana..



*Ilustración 24. Visualización de altura de ventana.*

La ventana fue fabricada por vidrio templado, en un marco de perfil de aluminio el cual se instaló en las columnas mencionadas y fue sellada con silicón especial para este tipo de material.



*Ilustración 25. Sello de certificación vidrio templado.*

Para la colocación de la ventana superior, el objetivo principal es que quedará centrada a la mesa de pruebas, hubo que considerar que la mesa medirá 105 cm, pero también había que dejar espacio para que la grúa no chocara con la pared. Por lo que la distancia de la pared derecha al centro de la ventana terminó siendo de 61.5 cm y la distancia de la entrada al centro de esta de 62 cm.



*Ilustración 26. Ventana superior instalada.*

### 3.4. RECUBRIMIENTOS Y AISLANTES

Ya construida la estructura, se instalaron las ventanas, se procedió con los recubrimientos y el aislante ya mencionados para las paredes, el techo y la puerta. Para la elección de los materiales era necesario que estos soportaran la temperatura máxima de la cámara que es de 45°C, más un excedente como margen de seguridad, como se describe en el inciso '3.4.1. DATOS TÉCNICOS DE RECUBRIMIENTOS Y AISLANTE.'

Sabiendo que la cámara estaría siendo utilizada para jornadas de tiempo muy amplias era importante saber que estos materiales resistirían y no ocasionarían problemas a largo plazo.

Los materiales que finalmente fueron utilizados son policarbonato y un aislante de poliestireno. Estos materiales fueron seleccionados debido a que cumplían con las características de temperatura necesarias, proporcionaban estabilidad a la estructura, eran sencillos de trabajar y realizan su función con muy buena eficiencia.

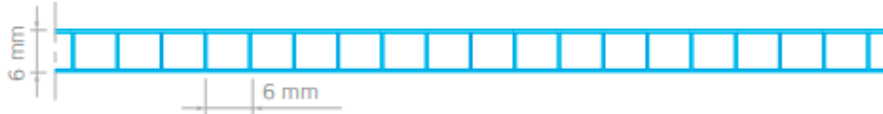
Este tipo de configuración cumple con los lineamientos descritos por ASHRAE (2021) para cámaras ambientales en laboratorios, que establecen el uso de materiales con alta resistencia térmica, baja conductividad y buena estabilidad dimensional para minimizar pérdidas energéticas y mantener la temperatura interna durante ciclos prolongados de operación.

En esta sección, se muestran algunos datos técnicos, así como también pruebas térmicas que se hicieron para medir la calidad de los materiales y finalmente la colocación en las paredes del sistema.

### 3.4.1. DATOS TÉCNICOS DE RECUBRIMIENTOS Y AISLANTE.

#### **POLICARBONATO**

La estructura interna del policarbonato utilizado tiene la forma mencionada en la Ilustración 27. Estructura policarbonato., en donde, además, se marca su espesor.



*Ilustración 27. Estructura policarbonato.*

Según la ficha técnica del material, este tiene un rango de temperatura que va desde los  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta los  $120^{\circ}\text{C}$ . Lo cual es muy sobrado a la temperatura máxima a la que trabaja el sistema. La hoja de policarbonato utilizada en todas las caras, tanto interna como externa, es de color blanco.

Además, garantiza que la hoja cuenta con un impacto excepcional ante condiciones climáticas adversas. Soportando tormentas de viento, granizo, tormentas de nieve y formaciones de hielo. Es capaz de soportar duras condiciones climáticas, así como también los cambios de temperatura a condiciones soleadas sin romperse o doblarse.

Dado que el sistema se encuentra dentro de un edificio, no será expuesto a dichos cambios climáticos, pero en su interior si se simularán algunos de estos cambios térmicos, por lo que resultó ser bastante útil al usarse aquí a pesar de estar bastante sobradas las condiciones a la cuales se someterá.

Se menciona en la misma ficha técnica que en una construcción que cuente con estas hojas de policarbonato, la variación de temperatura se verá retrasada en comparación a que no las tuviera. Es decir que, en nuestro caso, al tener las paredes cubiertas de este material, la temperatura se mantendrá por más tiempo que si se usara otro material. Esto

es benéfico para la Cámara Ambiental, ya que al tratarse de un sistema que simulará ambientes térmicos por largos periodos de tiempo, evitará que los actuadores enciendan y apaguen por periodos de tiempo tan cortos, ya que como siempre, existirán pérdidas o incluso si la puerta de acceso se llega a retirar, manteniendo un margen térmico por más tiempo.

### **AISLANTE TÉRMICO**

Según la ficha técnica del material, dice que es un aislamiento térmico de espuma rígida de poliestireno extruido en paneles manufacturados. Tiene una superficie lisa y una estructura de celdas cerradas con paredes que se inter adhieren unas con otras sin dejar huecos. Por la estructura del cómo está fabricado este material no permite espacios por donde se filtre el agua. Además, no favorece la condensación.

Este material, además de tener las características mencionadas antes, es muy ligero, fácil de cortar e instalar, colocando los bloques uno al lado del otro para cubrir el área que se desea aislar.

Este tipo de aislante cuenta con una alta resistencia a la humedad y al vapor. Cuenta con una resistencia para temperaturas de hasta 74°C, quedando muy sobrado a valores con que se trabajará la Cámara Ambiental. Además, en caso de ocurrir un accidente el cual involucre fuego, este material contiene un aditivo retardador de flama, el cual no propaga el fuego.



### 3.4.2. PRUEBAS TÉRMICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS Y AISLANTE.

A pesar de que las fichas técnicas indican la temperatura máxima que soportan cada uno de los materiales antes mencionados (aislante y policarbonato), se realizó una prueba preliminar de temperatura. Colocando un trozo de los materiales en cuestión dentro de una olla, la cual fue calentada por medio de una estufa. Con ayuda de un termómetro de pistola se fue midiendo la temperatura que había en el interior de la olla, que es la temperatura a la que estaba siendo sometido el material. Con el fin de comprobar lo indicado en las fichas técnicas y obtener conclusiones propias.

Se consideraron cuatro temperaturas importantes.

1. Temperatura de ficha técnica.
2. Temperatura de deformación.
3. Temperatura de reducción de tamaño.
4. Temperatura de quemado.

#### **PRUEBA TÉRMICA DE AISLANTE**

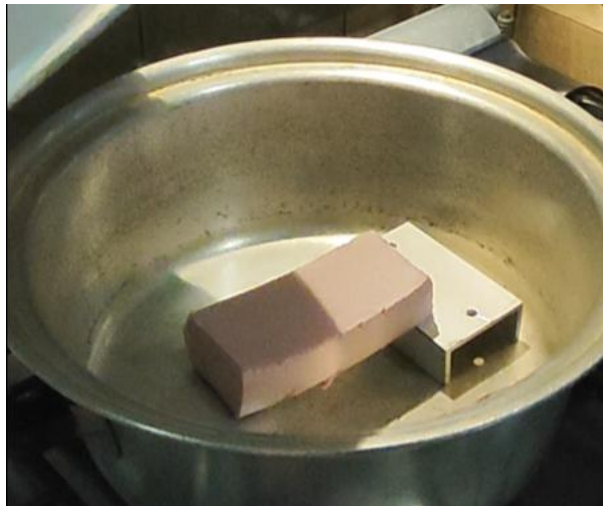
El material fue colocado como se muestra en la ilustración siguiente:



*Ilustración 28. Colocación de aislante en olla para experimento.*

Se tomó la temperatura inicial, la cual era 21 °C antes de prender la estufa. Una vez se tuvo todo colocado, se inició el fuego y la olla fue tapada para mayor contención térmica.

De acuerdo con lo que se indica en la ficha técnica, el material resiste hasta 74 °C. En el experimento observamos que al llegar a 72 °C el material ya comenzaba a tener una ligera deformación, como se muestra en la ilustración que sigue:



*Ilustración 29. Aislante a 72 °C.*

Se continuó calentando la olla, para observar el comportamiento del material, llegando ahora a 88 °C. Teniendo una deformación ya pronunciada en el material, además de empezar a notar un encogimiento en el tamaño de este.



*Ilustración 30. Aislante a 88 °C.*

Llegados los 146 °C, el aislante ya había reducido su tamaño considerablemente.



*Ilustración 31. Aislante a 146 °C.*

Finalmente, se obtuvo la temperatura en la que el material estaba completamente derretido. Llegando hasta los 160 °C, obteniendo lo siguiente:



*Ilustración 32. Aislante a 160 °C.*

## PRUEBA TÉRMICA POLICARBONATO

En el caso del policarbonato, como se vio en la ficha técnica, este alcanza hasta 120 °C, por lo que las temperaturas fueron más elevadas. Se inició con las mismas condiciones que el aislante térmico.



*Ilustración 33. Colocación de policarbonato en olla.*

Al llegar a esa temperatura extrema que soporta el material durante el experimento, parecía a simple vista seguir normal. Sin embargo, al tocarlo con una pluma, se sintió un poco blanda la muestra. Aunque seguía sin deformarse aún.



*Ilustración 34. Policarbonato a 123 °C.*

Es hasta rebasar los 160 °C donde se empieza a notar un cambio en su estructura.  
Muy leve apenas.



*Ilustración 35. Policarbonato a 160 °C.*

Pasados los 180 °C el material por fin se deformó.



*Ilustración 36. Policarbonato a 181 °C.*

Cuando se llegó a los 235 °C el material se comenzaba a quemar.



*Ilustración 37. Policarbonato a 235 °C.*

Llegando a este punto, se finalizó el experimento, ya que llegar a temperaturas aún más elevadas sería muy complicado con las herramientas con las que se contaban. Sin embargo, los puntos importantes que se querían demostrar fueron cumplidos.

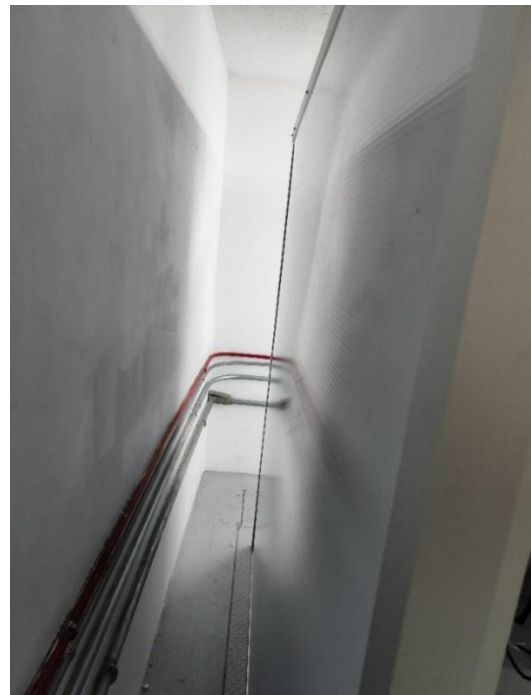
### 3.4.3. COLOCACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS Y AISLANTES.

Como ya se ha mencionado, había que cubrir 5 de las 6 caras del cubo, debido a que nos apoyamos del piso ya existente. Para colocar los materiales se estableció un orden lógico de acuerdo con el avance de la construcción.

La colocación de los recubrimientos se inició con las piezas de la pared izquierda, viendo desde la entrada la cámara, es decir, la más cercana al muro existente. Ya que, al haber menor espacio entre la pared y la estructura, habría sido muy complicado colocarla después de fijar la estructura. Estas piezas en particular resultaron ser de las más sencillas, ya que era únicamente la pieza del mismo tamaño al que media la pared.



*Ilustración 38. Vista interior. Pared izquierda.*



*Ilustración 39. Vista exterior. Pared izquierda.*

La pared derecha está dividida en tres partes, dos piezas ciegas y una que contiene el espacio para la ventana. Se aprecian varias vistas del proceso de colocación de los recubrimientos, en las ilustraciones siguientes.





*Ilustración 40. Recubrimientos por debajo y encima de ventana.*



*Ilustración 41. Vista interior. Pared derecha*



*Ilustración 42. Vista exterior. Pared derecha (sin terminar).*



*Ilustración 43. Vista externa, pared derecha completa.*

Para la pared trasera resultó sencillo, ya que se trataba de una medida única por cada pieza.



*Ilustración 44. Pared trasera y derecha incompletas.*



*Ilustración 45. Vista de frente a las 3 paredes colocadas.*

En el apartado '3.2 ESTRUCTURA' existe una estructura interna en las paredes que soporta dos repisas para servicios y robustece la parte del techo para cargar adecuadamente el evaporador de la unidad refrigeradora.

Dentro de los servicios requeridos, se encuentran, los calentadores de aire y se deja espacio para una futura ampliación. A continuación, se muestra la colocación de las paredes exteriores restantes.



*Ilustración 46. Paredes exteriores, trasera y derecha.*

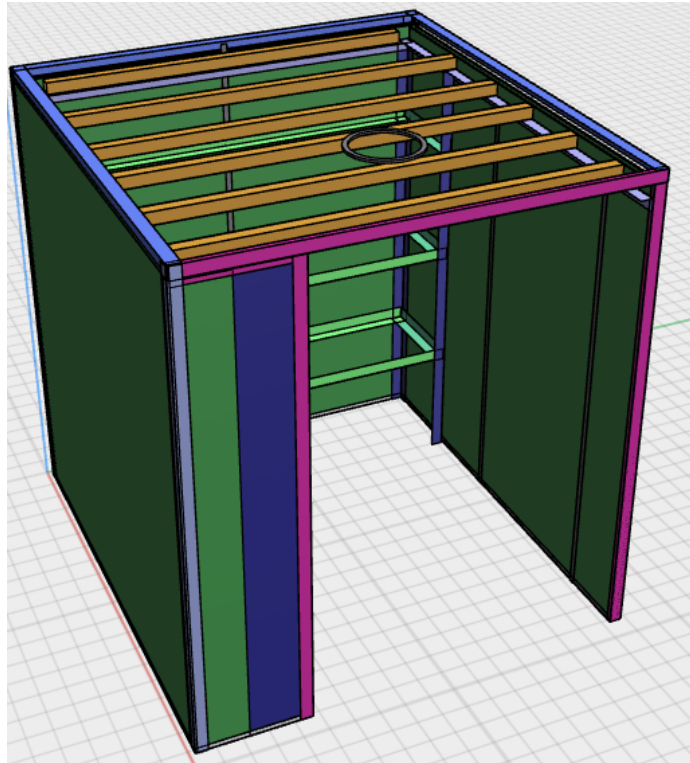
Para la entrada de la cámara se dio una distancia para la grúa que ingresará la muestra y una pequeña pared de 40 cm. De esta pared, no hubo mayor problema, ya que solo se trataba de un espacio de 40 cm de ancho para las 3 capas.



*Ilustración 47. Pared de enfrente con recubrimientos.*



*Ilustración 48. Vista de frente de la cámara con paredes recubiertas.*



*Ilustración 49. Modelo 3D de la Cámara Ambiental con recubrimientos.*

En el caso de la Ilustración 49. Modelo 3D de la Cámara Ambiental con recubrimientos. se observa que incluso en el modelo 3D se diseñó el aislante y el policarbonato para cada cara. Siendo el aislante de color azul y el policarbonato de color verde.

Una vez realizada la instalación de las paredes en estas caras, fue necesario asegurarse de que la estructura se encontrara recta. Por medio de nivelador con rayo láser fue como se ajustó la postura de la estructura hasta que se dio con una cuadratura correcta. Como puede apreciarse en el grupo de ilustraciones siguientes.



*Ilustración 50. Comprobación de la rectitud de la estructura con nivelador laser 1.*



*Ilustración 51. Comprobación de la rectitud de la estructura con nivelador laser 2.*



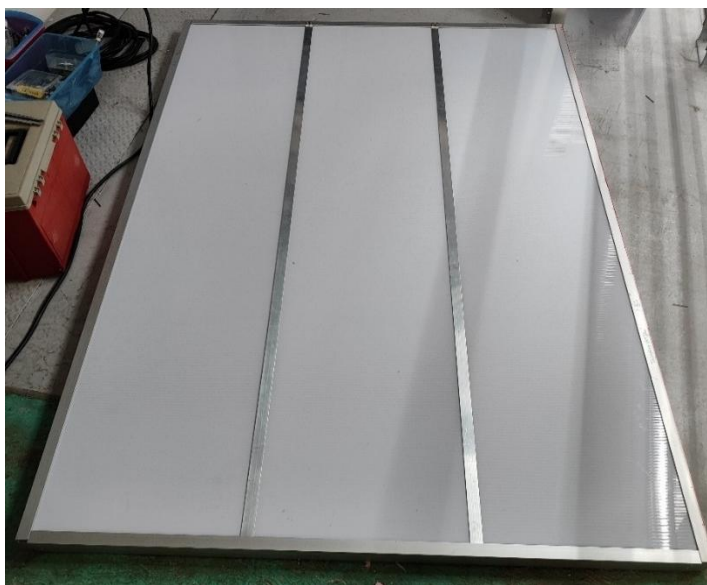
*Ilustración 52. Comprobación de la rectitud de la estructura con nivelador laser 3.*



*Ilustración 53. Comprobación de la rectitud de la estructura con nivelador laser 4.*

Este ajuste en el nivel de la estructura se realizó con la finalidad de apoyo de la misma estructura para realizar la construcción de la puerta y que esta lograra estar lo más recta posible.

En cuanto al recubrimiento de la puerta simplemente se introdujeron las 2 capas de policarbonato y la de aislante para cada una de las 3 secciones en las que se dividió la puerta. Como se mencionó antes.



*Ilustración 54. Recubrimiento de puerta.*

Una vez completada, se buscó instalar la puerta. Inicialmente se realizaron 4 perforaciones en la puerta, las cuales fueron transferidas a las paredes donde va recargada. En los agujeros de las paredes de la estructura, se colocaron 4 tornillos largos de 7.5 cm, los cuales sirven para dar una guía a la puerta y la sostienen. Se colocó también una cinta espuma en todo el marco de la puerta para que una vez recargada, este material pueda sellar y aislar lo más posible el interior de la cámara con el exterior.



Por último, una vez colocada adecuadamente la puerta, insertando tuercas de tipo mariposa a cada uno de los tornillos para así fijar la puerta y ayudar al aislamiento del interior apretándolas solo un poco.



*Ilustración 55. Tornillo de soporte para puerta.*



*Ilustración 56. Tuerca de soporte para puerta.*

Quedando la instalación de la puerta de la siguiente forma:



*Ilustración 57. Puerta instalada (vista interna).*



*Ilustración 58. Puerta instalada (vista externa).*

Finalmente, para realizar el forraje en el techo. Se colocó la hoja de policarbonato interior sobre las barras de aluminio de sección cuadrada, delimitando el área para la ventana. Posteriormente el aislante y finalmente la capa de policarbonato exterior. En la parte superior externa se colocó un perfil de tipo ángulo, el cual funciona como la base del soporte para la cámara fotográfica que se coloca más adelante y que se menciona en el inciso de '3.5 CÁMARA FOTOGRÁFICA'.



*Ilustración 59. Techo recubierto (vista exterior).*



*Ilustración 60. Techo recubierto (vista interior).*

A continuación, se muestran ilustraciones del como luce el sistema construido.



*Ilustración 61. Estructura construida (vista al interior).*

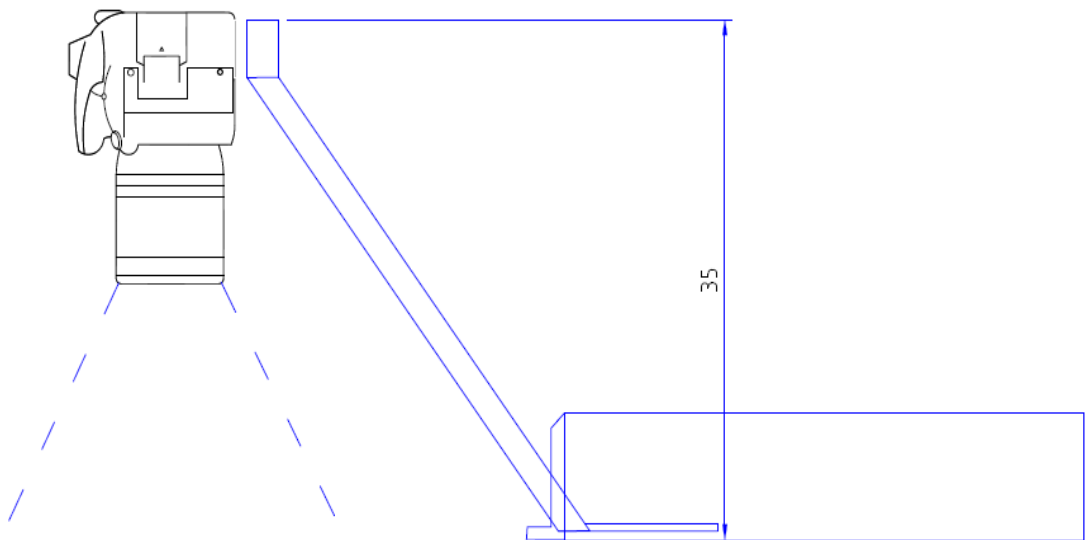


*Ilustración 62. Estructura construida (vista por exterior).*

### 3.5. CÁMARA FOTOGRÁFICA

En la cara superior de la Cámara Ambiental, en el techo, se dejó un pedazo de perfil tipo ángulo, como se puede ver en 'Ilustración 59. Techo recubierto (vista exterior)'. Con la intención, como ya se mencionó en dichos apartados, fuera la base para la cámara fotográfica.

Esta base consistió en dos perfiles de aluminio tipo ángulo, atornillados uno con otro a modo de formar una especie de "L", y de ella, en el extremo del perfil más largo, el cual, será el más cercano al techo del piso del edificio se atornilló la cámara fotográfica. Dejando así que esta quede apuntando directamente a la ventana del techo para hacer registro de los cambios que vaya sufriendo el material expuesto a las pruebas térmicas.



*Ilustración 63. Dibujo ilustrativo del soporte para la Cámara Fotográfica.*

### 3.6. EVALUACIÓN INICIAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL CONJUNTO

Para dimensionar el sistema de control de temperatura, se evaluó el comportamiento térmico inicial de la Cámara Ambiental. La manera de hacerlo fue colocando uno de los calentadores de potencia conocida en el interior. Encenderlos y graficar el comportamiento térmico con relación al tiempo, como se puede ver en la gráfica siguiente.

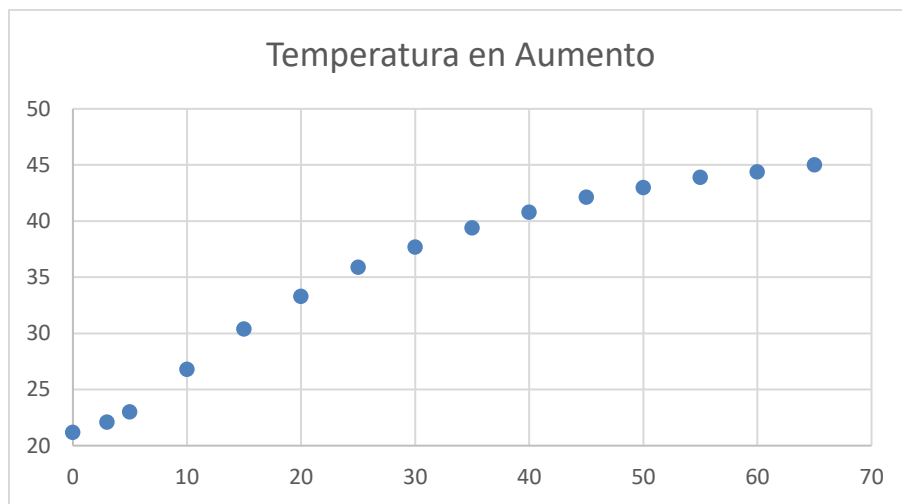


Ilustración 64. Gráfica de comportamiento de temperatura.

De acuerdo con el comportamiento térmico observado, el sistema tarda aproximadamente 65 minutos en alcanzar una temperatura de 45 °C. Si durante ese tiempo se mantiene una potencia de:

$$P = 1.5 \text{ kW}$$

Se convierte el tiempo de calentamiento a horas:

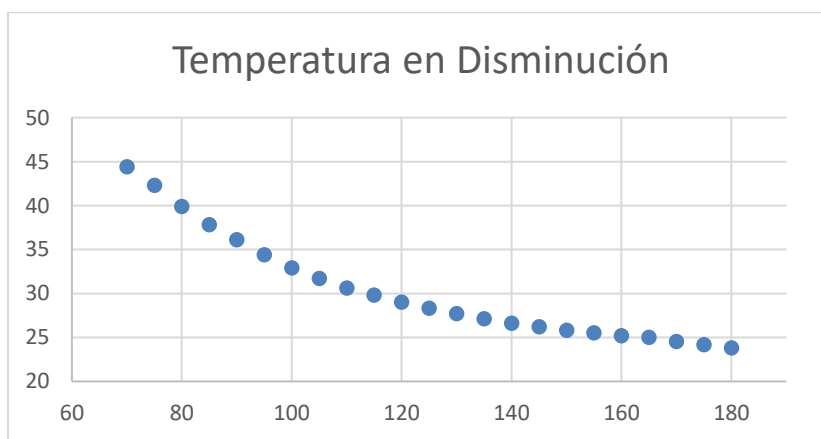
$$t_{\text{aumento}} = \frac{65 \text{ min}}{60 \text{ min}} = 1.083 \text{ h} \quad (1)$$

La energía consumida durante el intervalo de tiempo es:

$$E = P \times t = (1.5 \text{ kW})(1.08 \text{ h}) = 1.625 \text{ kWh} \quad (2)$$

Entonces, la energía utilizada para alcanzar los 45 °C fue de aproximadamente 1.625 kW/h.

Cabe aclarar que este experimento fue realizado con un solo calefactor operando a su potencia máxima con el fin de acelerar el calentamiento en condiciones de prueba. Sin embargo, en el funcionamiento real del sistema, se contempla el uso de tres calefactores trabajando a su capacidad mínima, lo cual permitirá una distribución más uniforme del calor, un mejor control térmico y una reducción de picos de consumo eléctrico, manteniendo el mismo objetivo de temperatura final.



*Ilustración 65. Gráfica de comportamiento de temperatura en disminución.*

Una vez alcanzada la temperatura máxima de 45 °C, se procedió a observar el comportamiento del sistema durante su fase de enfriamiento natural, es decir, sin asistencia de refrigeración activa ni calefactores encendidos. Se registró que la temperatura disminuyó de forma progresiva hasta retornar a valores cercanos a los 25 °C (condición ambiente), en un tiempo aproximado de:

$$t_{dismin} = \frac{115 \text{ min}}{60 \text{ min}} = 1.917h \quad (3)$$

Este periodo de enfriamiento proporciona información relevante sobre la inercia térmica del sistema, la eficiencia del aislamiento, y el tiempo de recuperación en condiciones pasivas.

A diferencia del calentamiento, este proceso no implicó consumo eléctrico directo, ya que fue resultado de la disipación térmica natural hacia el entorno. Sin embargo, su análisis es fundamental para dimensionar los tiempos de respuesta del control de temperatura en escenarios de inactividad o fallo en los actuadores térmicos.



## 4. SISTEMA ELECTRÓNICO

El sistema electrónico utilizado en la Cámara Ambiental está constituido por el controlador de temperatura, donde ocurrirá el encendido y apagado de los actuadores, dependiendo de la temperatura deseada, alimentada por su propia fuente de poder.

### 4.1. CONTROLADOR DE TEMPERATURA

El controlador de temperatura es un sistema que permite estabilizar el valor de la temperatura dentro de la Cámara Ambiental, tiene dos secciones, una que la incrementa y otra que la decrementa. Esto es, debido a que como la cámara opera a temperaturas entre 4 y 45 °C, en ocasiones requiere calentar y en otro momento enfriar.

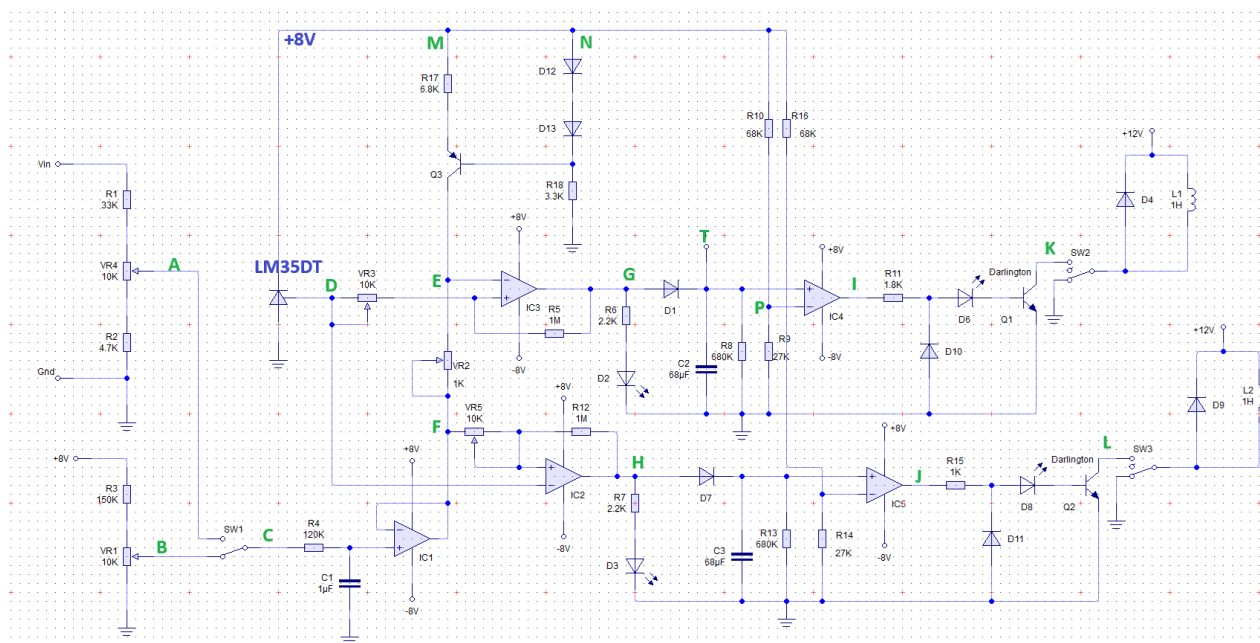


Ilustración 66. Diagrama del Controlador de Temperatura.

Por ello, tenemos dos actuadores, una unidad de refrigeración, y un conjunto de calefacción resistivo.

La unidad de refrigeración, al ser impulsada por un compresor debe mantenerse encendida por periodos mayores de un minuto, para evitar daños en el arrancador del motor síncrono.

La misma idea es aplicada para el sistema de calefacción, para poder utilizar un relevador como unidad de potencia.

Se incorporó, en ambas líneas de salida, un circuito 'Timer' con la finalidad de mantener al menos un minuto encendida la línea, para evitar intermitencias en el encendido del equipo.

El circuito de control propuesto consiste en un sensor de temperatura que nos proporciona una señal de voltaje, la cual, se compara con la señal de referencia. 'A' partir de aquí, el sistema define si enciende al calentador, al refrigerador o ninguno de ellos.

#### 4.1.1. FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del circuito se explica referido al diagrama de la 'Ilustración 67. Fragmento de Diagrama, refrigeración (azul) y calefacción (rojo).', siendo el de color azul el asignado para la refrigeración, y el marcado de rojo el asignado para la calefacción.

El sensor de temperatura es un circuito integrado 'LM35' de tres patas. Las dos primeras, representan la referencia de tierra y alimentación positiva, la tercera de ellas envía la señal de salida en forma de voltaje referido a tierra. Esta señal de salida de manera paralela se envía a dos comparadores de voltaje 'IC3' e 'IC2', respectivamente.

En 'IC3', esta señal se inyecta a partir de la entrada no inversora y se instrumenta con una configuración de comparador con histéresis. En su salida, se coloca un indicador de estado por medio de un LED, el diodo 'D2'. En adelante, se instala un circuito 'Timer' formado por el diodo 'D1', el capacitor 'C2', así como las resistencias 'R8', 'R19' y 'R10', el

Amplificador operacional 'IC4', los diodos 'D6' y 'D10' y el transistor 'Q1'. El 'D10' es un LED indicador de estado. Todo este bloque mencionado es el circuito para manejar la refrigeración cuando la temperatura del sensor se incremente por encima del valor de referencia.

En 'IC2', se recibe la misma señal que se inyecta a partir de la entrada inversora y se instrumenta con una configuración de comparador con histéresis, al igual que el bloque anterior. En su salida, también se coloca un indicador de estado por medio de un LED, el diodo 'D3'. En adelante, se instala un circuito 'Timer' formado por el diodo 'D7', el capacitor 'C3', así como las resistencias 'R13', 'R14' y 'R16', el Amplificador operacional 'IC5', los diodos 'D11' y 'D8' y el transistor 'Q3'. El 'D8' es un LED indicador de estado. Todo este bloque mencionado es el circuito para manejar la calefacción cuando la temperatura del sensor se decremente.

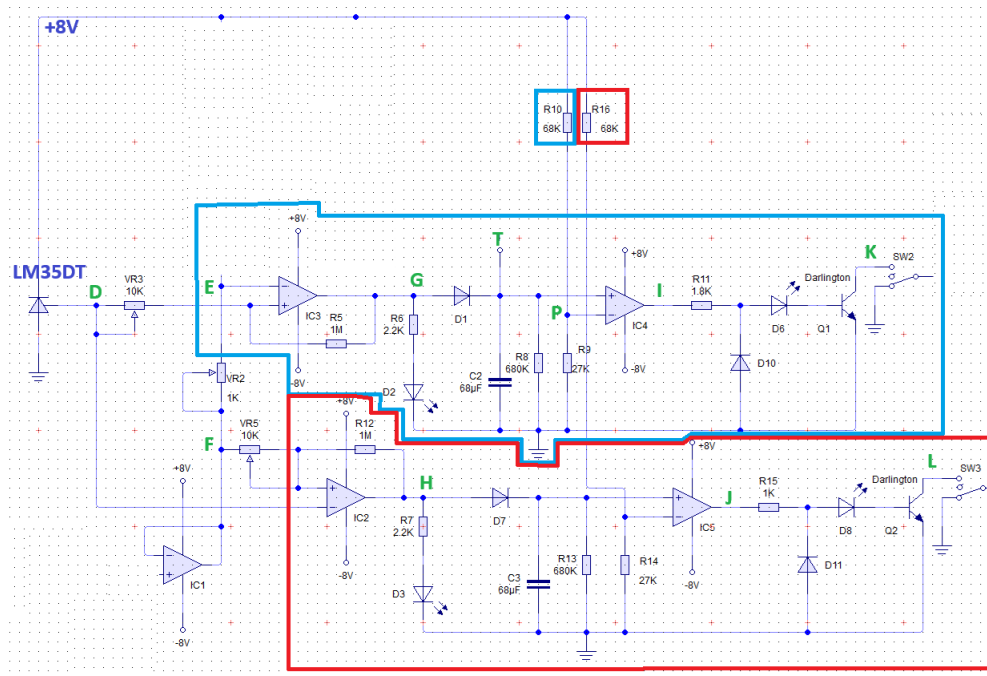


Ilustración 67. Fragmento de Diagrama, refrigeración (azul) y calefacción (rojo).

El sistema de control compara la señal de referencia 'F', contra la señal del sensor de temperatura en el punto 'D'. Esta comparación es aplicada a los dos comparadores, el de refrigeración y el de calefacción, con una diferencia de potencial controlada por 'VR4' y la corriente en ella. Asignando consecuentemente una diferencia de temperaturas a cada bloque de control.

Este comparador de ventana acciona al refrigerador cuando la temperatura sea mayor que la referencia del punto 'E'. Acciona al calefactor cuando sea inferior al valor del punto 'F'. Y cuando la temperatura se encuentre dentro de la ventana del punto 'E' y 'F', el sistema permanece apagado. Además, los comparadores mencionados tienen una configuración con histéresis para evitar ser disparados por señales de ruido.

El amplificador 'IC1', junto con la resistencia 'R2' y el capacitor 'C1', forman un filtro paso bajas y un seguidor operacional para reducir la impedancia de este bloque a cero. Y poder impulsar correctamente al comparador con histéresis de la etapa siguiente.

La señal de referencia en el punto 'C', puede provenir de dos fuentes distintas, seleccionadas por el switch 'SW1'. Cuando el interruptor 'SW1', está alineado con el punto 'B', mediante el potenciómetro 'VR1', se le asigna la tensión de referencia para controlar la temperatura en modo manual.

Existe una opción adicional, cuando el interruptor 'SW1' se alinea con el punto 'A' para recibir un voltaje externo y que el equipo sea manejado de manera automática mediante un sistema programado, como una computadora.

Los transistores de salida 'Q2' y 'Q3' accionan las bobinas de los relevadores 'RL1' y 'RL2' respectivamente.

## 4.1.2. MEMORIA DE CÁLCULO

### 4.1.2.1. ENTRADAS DE VOLTAJE

Cuando la señal analógica de entrada provenga de un dispositivo externo, como una computadora, esta señal se aplica al punto 'Vin' del circuito referido, manejando un intervalo entre 0 y 2.5 V para representar de 0 a 50°C. La divisora de voltaje reduce esta tensión en el punto 'A' a una quinta parte para obtener una señal entre 0 y 0.5 V correspondiente al mismo intervalo de temperatura del sensor.

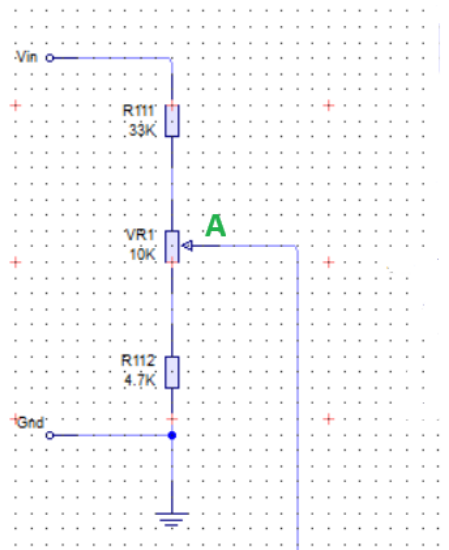


Ilustración 68. Entrada 'A' de voltaje.

Para determinar el valor de las resistencias en la divisora aplicamos la siguiente expresión:

$$V_A = V_{in} \left( \frac{R_{112} + \frac{1}{2} V_{R1}}{R_{111} + R_{112} + V_{R1}} \right) \quad (4)$$

$$R_{111} = \frac{V_{in} \left( R_{112} + \frac{1}{2} V_{R1} \right)}{V_A} - R_{112} - V_{R1} \quad (5)$$

Establecimos valores a las demás variables:

$$V_{R1} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_{112} = 5 \text{ k}\Omega$$

$$V_{in} = 2.5 \text{ V}$$

$$V_A = 0.5 \text{ V}$$

Teniendo entonces la ecuación:

$$R_{111} = \frac{(2.5 \text{ V})(5 \text{ k}\Omega + \frac{1}{2}(10 \text{ k}\Omega))}{0.5 \text{ V}} - 5 \text{ k}\Omega - (10 \text{ k}\Omega) \quad (6)$$

$$R_{111} = 35 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

Los valores finalmente obtenidos son:

$$R_{111} = 35 \text{ k}\Omega \rightarrow 33 \text{ k}\Omega$$

$$R_{112} = 5 \text{ k}\Omega \rightarrow 4.7 \text{ k}\Omega$$

$$V_{R1} = 10 \text{ k}\Omega$$

Del mismo modo, cuando la señal de mando provenga del control local, la divisora de entrada se simplifica al siguiente circuito. La idea es obtener en el punto 'B' la misma tensión de 0 a 0.5 V cuando la entrada de la divisora sea la tensión de alimentación de +8 V.

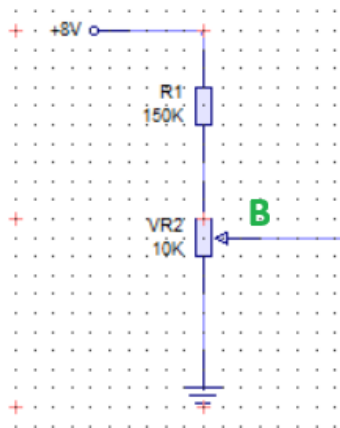


Ilustración 69. Entrada 'B' de Voltaje.

$$V_B = V_{CC} \left( \frac{V_{R2}}{V_{R2} + R_1} \right) \quad (8)$$

$$R_1 = \frac{V_{CC} \cdot V_{R2}}{V_B} V_{R2} \quad (9)$$

Establecimos valores a las demás variables:

$$V_{R2} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$V_{CC} = 8 \text{ V}$$

$$V_B = 0.5 \text{ V}$$

Teniendo entonces la ecuación:

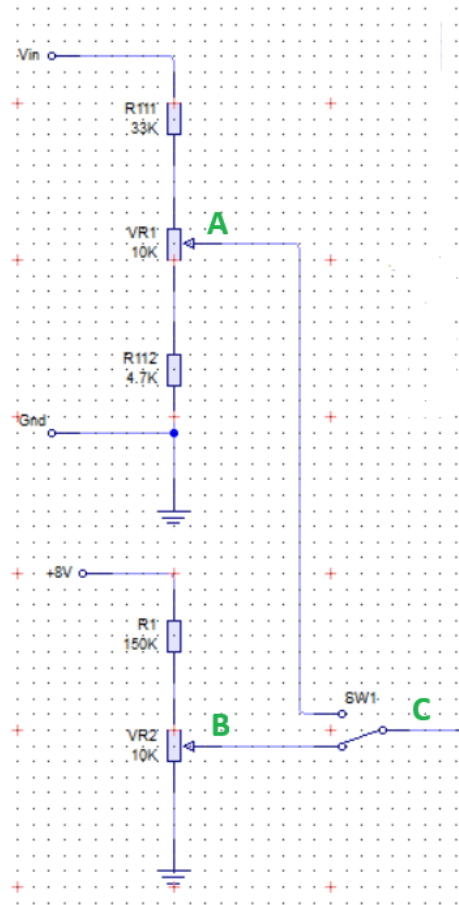
$$R_1 = \frac{(8 \text{ V})(10 \text{ k}\Omega)}{0.5 \text{ V}} - (10 \text{ k}\Omega) \quad (10)$$

$$R_1 = 150 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

El valor finalmente obtenido es:

$$R_1 = 150 \text{ k}\Omega$$

Una vez teniendo ambas señales de entrada homologadas en tensión, pasan a través del interruptor 'SW1' el cual selecciona modo externo o interno de operación.



*Ilustración 70. Salida 'C' de voltaje.*

Esta señal es aplicada al comparador de ventana a través de un filtro paso bajas y un seguidor operacional para adecuar las impedancias.



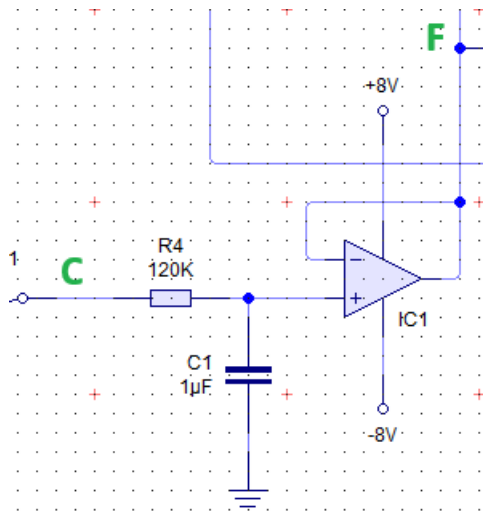
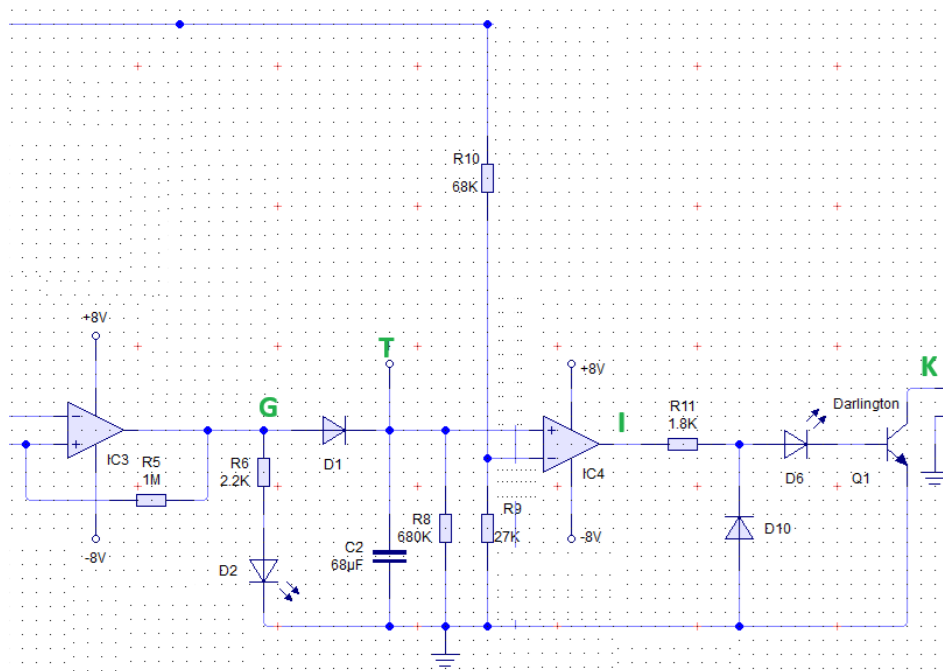


Ilustración 71. Filtro Paso Bajas.

El punto 'F' es portador de la señal de referencia para el comparador de ventana.

#### 4.1.2.2. TIMER



A partir de la salida del comparador 'IC3' (punto 'G'), y conforme a lo indicado en el *datasheet* del LM358, los valores típicos de saturación y corte de salida bajo alimentación simétrica  $\pm 8\text{ V}$  son:

SATURACIÓN

$$V_{CC} - 1.4\text{ V} = 8\text{ V} - 1.4\text{ V} = 6.6\text{ V} \quad (12)$$

CORTE

$$V_{DD} = -8\text{ V} \approx -8\text{ V} \quad (13)$$

Esto significa que el amplificador opera entregando señales lógicas en su salida:

- Un "1 lógico" cuando está en saturación positiva ( $\approx 6.6\text{ V}$ )
- Un "0 lógico" cuando está en saturación negativa ( $\approx -8\text{ V}$ )

El circuito utiliza esta salida como un indicador de estado.

Cuando 'G' es positivo (estado alto), el diodo 'D1' conduce, permitiendo el paso del voltaje hacia el nodo 'T', cargando el capacitor 'C2' con 'R8'. El voltaje en 'T' en ese momento es:

$$V_T = V_G - V_{D_1} \approx 6.6\text{ V} - 0.6\text{ V} \approx 6\text{ V} \quad (14)$$

Cuando 'IC3' entrega un "0 lógico", el diodo 'D1' se bloquea, y el capacitor 'C2' comienza a descargarse a través de la red 'RC' conformada por 'R8' y 'C2'. La constante de tiempo del sistema se calculó con los siguientes valores seleccionados tras realizar diversas pruebas:

$$C_2 = 68\ \mu\text{F}, R_8 = 680\ \text{k}\Omega$$

Dando un tiempo muy cercano al esperado:

$$t = 55\ \text{s}$$

Entonces:

$$t = kRC \rightarrow k = \frac{t}{R_8 C_2} = \frac{55 \text{ s}}{(680 \text{ k}\Omega)(68 \text{ }\mu\text{F})} = 1.18 \quad (15)$$

Este valor de 'RC' define la velocidad con la que se descarga el capacitor. Y 'k' es una constante de proporcionalidad.

El cambio de estado de salida no ocurre hasta que el voltaje en el nodo 'P' (que sigue la descarga de 'C2') cae por debajo de un umbral definido por un divisor de voltaje formado por 'R10' y 'R9'. Dicho voltaje umbral de conmutación es:

$$V_{\text{cambio}} = V_T \left( \frac{R_9}{R_9 + R_{10}} \right) = 6[V] \left( \frac{27 \text{ k}\Omega}{27 \text{ k}\Omega + 68 \text{ k}\Omega} \right) = 1.71 \text{ V} \quad (16)$$

Cuando el voltaje en 'P' desciende por debajo de este valor, el comparador 'IC4' cambia su salida de "1" a "0", apagando así el sistema conectado a su salida (a través del transistor Darlington 'Q1').

Este procedimiento de detección y control aplica tanto para el sistema de calefacción como para el de refrigeración.

### 4.1.2.3. FUENTE DE CORRIENTE

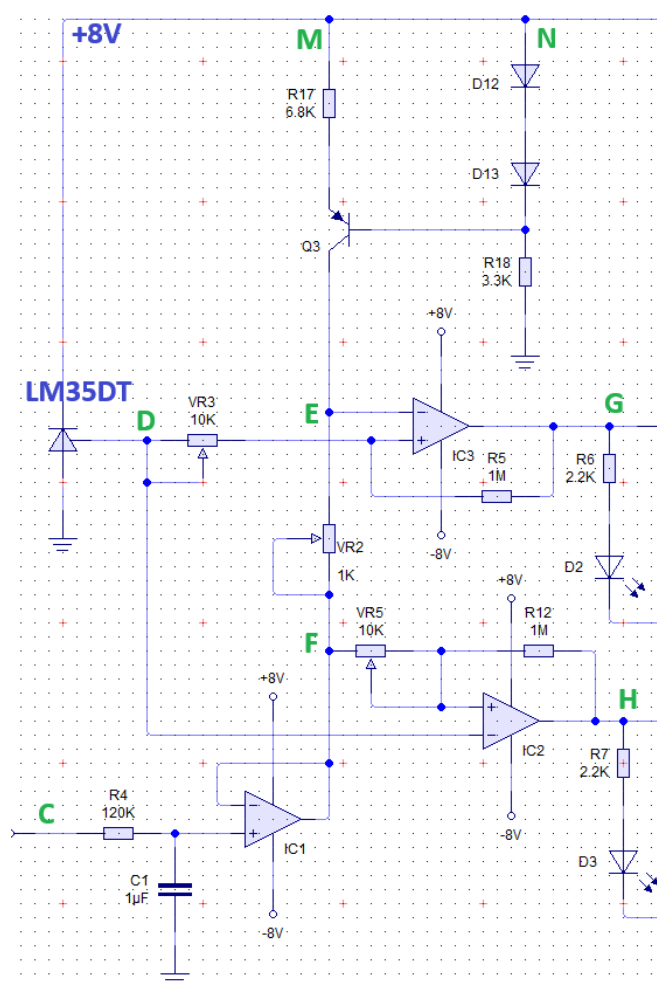


Ilustración 72. Fragmento del circuito. Resistencia de ventana.

Uno de los objetivos clave en el diseño fue proteger los actuadores del sistema, especialmente el refrigerador, ante fluctuaciones menores o ruidos eléctricos. Para ello, se implementó una ventana que actúa como filtro de activación, evitando conmutaciones frecuentes e innecesarias.

El comparador 'IC3' recibe en su entrada no inversora ('E') la señal de temperatura medida mediante el sensor 'LM35DT', que entrega 10 mV/°C. Esta señal representa la temperatura actual del sistema.

La entrada inversora ('F') recibe la misma señal de referencia, pero desplazada positivamente por un voltaje adicional generado por el divisor resistivo formado por 'VR4', que es alimentado por una fuente de corriente constante. Este desplazamiento define la ventana térmica, cuyo propósito es impedir que el refrigerador se active por pequeños cambios en temperatura.

La sección compuesta por 'Q3', 'R17', 'R18', 'D12', 'D13' y el nodo 'N' forma una fuente de corriente constante, necesaria para generar un voltaje diferencial estable en el divisor de histéresis. Su funcionamiento es el siguiente:

- El nodo 'N' está polarizado por los diodos 'D12' y 'D13', que en conjunto fijan una caída de voltaje de aproximadamente 1.2 V (0.6 V cada uno).
- Con una alimentación de +8 V, la caída restante se ve reflejada sobre 'R18' limitando así la corriente que circula por los diodos 'D12'-'D13', estabilizando el voltaje en la base de 'Q3' y permitiendo que opere de forma lineal.
- El transistor 'Q3' opera como una fuente de corriente en configuración de emisor común, con 'R17' en su emisor determinando el valor de corriente constante que inyectará a la ventana.

Se estableció una ventana de 5 °C, equivalente a 50 mV de diferencia:

$$10\text{ }^{\circ}\text{C} = 100\text{ mV} \rightarrow 5\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ mV}$$

Para lograrlo, se seleccionó un valor de  $V_{R_4} = 1\text{ k}\Omega$ , y se ajusta de modo que el punto medio represente la caída de 50 mV con una corriente constante de:

$$I = \frac{50\text{ mV}}{500\ \Omega} = 100\ \mu\text{A} \quad (17)$$

Entonces, con una caída de 0.65 V en la resistencia 'R17' (emisor de 'Q3'), se verifica que:

$$R_{17} = \frac{0.65 V}{100 \mu A} = 6.5 k\Omega \quad (18)$$

El valor comercial más cercano utilizado es 6.8 kΩ, lo cual modifica la corriente, dando un valor de:

$$I = 95.59 \mu A \quad (19)$$

El comparador 'IC2' que controla al calentador, se conecta con una arquitectura similar, pero con la polaridad inversa.

#### 4.1.2.4. *HISTERESIS*

En el circuito de la 'Ilustración 72. Fragmento del circuito. Resistencia de ventana.' se sabe que ambos amplificadores están configurados como comparadores con retroalimentación positiva, lo que provoca histéresis en su comportamiento.

De manera práctica se concluyó que una histéresis entre 0.2 °C y 2 °C fue conveniente para la operación del sistema. A un valor más pequeño de histéresis se le podrían escapar disparos por un nivel alto de ruido. Por otra parte, si se excediera de 2 °C ya no sería óptimo para controlar el sistema. Finalmente, el punto de ajuste quedó cerca de 1 °C.

El comportamiento de histéresis puede definirse por las siguientes ecuaciones:

- En modo no inversor:

$$\pm V_{H_{IC3}} = \pm V_{sat} \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (20)$$

- En modo inversor:

$$\pm V_{H_{IC2}} = \pm V_{sat} \left( \frac{R_1}{R_2 + R_1} \right) \quad (21)$$

Sustituyendo valores en ambas ecuaciones, donde:

$$V_{SAT} = \pm 6.6 V$$

$$R_1 = 10 k\Omega$$

$$R_2 = 1 M\Omega$$

Para la refrigeración:

$$\pm V_{HIC3} = 6.6 V \left( \frac{10 k\Omega}{1 M\Omega} \right) = \pm 66 mV \rightarrow \pm 6.6 ^\circ C \quad (22)$$

Para la calefacción:

$$\pm V_{HIC2} = 6.6 V \left( \frac{10 k\Omega}{1.01 M\Omega} \right) = 64.7 mV \rightarrow \pm 6.47 ^\circ C \quad (23)$$

## 4.2. UNIDAD DE POTENCIA

La unidad de potencia es la encargada de manejar a los actuadores a partir de una señal lógica de baja potencia.

En esencia, son dos circuitos, el que maneja a la unidad de refrigeración alimentada por 127 V una fase. Y el del circuito de calentamiento, que alimenta a tres calentadores resistivos en una configuración trifásica.

### **CIRCUITO DE POTENCIA COMPLETO**

La unidad de potencia es la encargada de suministrar la energía de manera confiable a cada uno de los actuadores. Consta de dispositivos de protección y siete relevadores para manejar cinco circuitos:

- El de calefacción, formado por dos relevadores.
- El de refrigeración, formado por dos relevadores.
- El de ventilación para recirculación del aire, formado por un relevador.
- El de iluminación, formado por un relevador.
- El de fotografía, formado por un relevador.

Los sistemas de protección corresponden a limitadores de corriente. El primero de ellos, es un breaker trifásico de 20 A por fase. La segunda etapa corresponde a fusibles de 15 A, también colocados en cada fase. Posteriormente, ubicados cerca de los calentadores y en la parte superior, tres fusibles térmicos con capacidad de 15 A y 72 °C.

También de un termostato, calibrado a 50 °C en el circuito de baja tensión que desconecta los actuadores térmicos en caso de sobrepasar el valor prefijado.

La unidad de potencia que controla la calefacción acciona mediante un relevador de 3 fases con bobina de 127 VAC y contactos de 60 A, lo que garantiza una larga duración



de los contactos. Para manipular a este relevador colocamos un segundo relevador con bobina de 12 VDC. La idea es estandarizar todas las bobinas de los relevadores a 12 VDC.

Del mismo modo, para la unidad de refrigeración utilizamos un relevador con contactos de 80 A para manejar la compresora y accionado mediante un segundo relevador con bobina de 12 VDC.

Los siguientes mandos, se manejan cada uno con un solo relevador de 12 VDC debido a que son de baja potencia, el primero de ellos es el circuito de ventilación, para la circulación del aire dentro de la Cámara, que opera a 127 V y 2 A. El circuito de iluminación, que opera a 12 VDC y 2.2 A. Por último, el relevador para fotografía que maneja un circuito de 2 mA. Cada uno de los cinco circuitos mencionados, tiene un LED como testigo para conocer su estatus.

Además, contamos con un tablero de cuatro interruptores de palanca de tres posiciones para manipular los relevadores a su estado de encendido y apagado manual, y también, el modo automático.

La quinta línea del tablero, para la fotografía, consta de un botón de presión de acción momentánea.

Las cinco líneas de los relevadores llegan al puerto de mando que recibe las instrucciones de la unidad de control, en el modo automático.

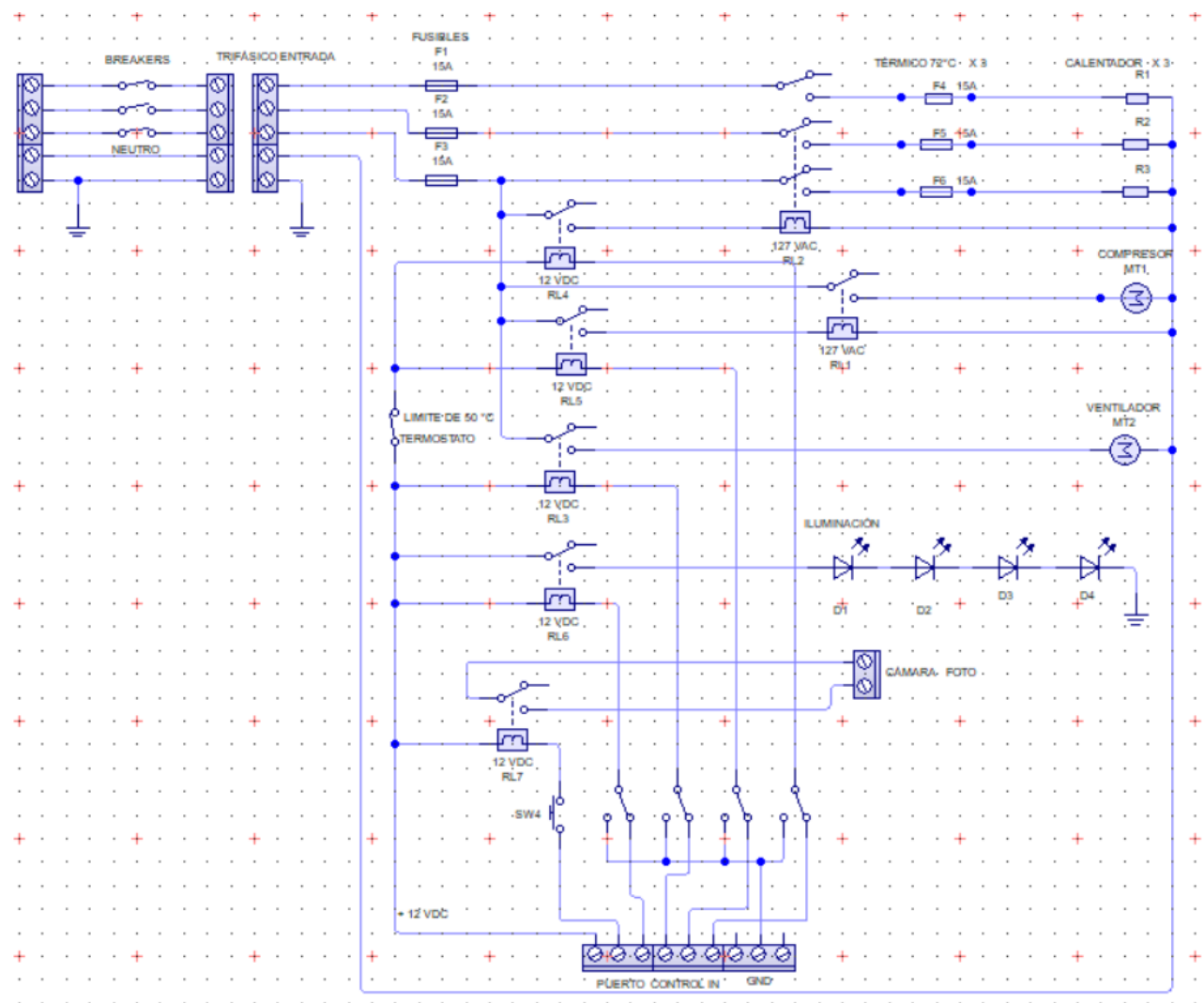


Ilustración 73. Diagrama de unidad de potencia.

### 4.3. FUENTE DE PODER

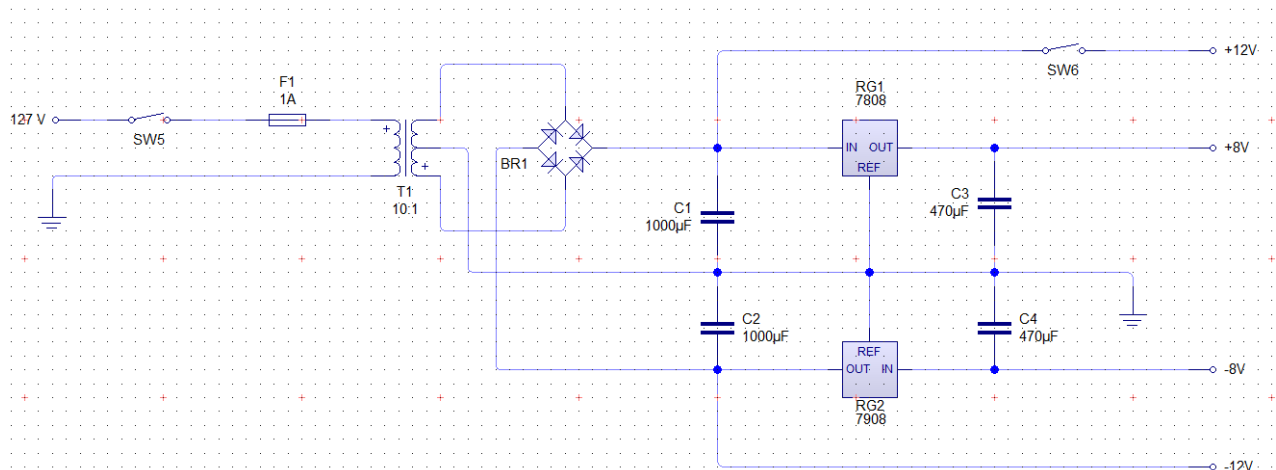


Ilustración 74. Diagrama Fuente de Poder.

El voltaje de la línea de alimentación es aplicado al primario del transformador T1 a través del interruptor SW5 y un fusible de paso. Este transformador reduce la tensión en el devanado secundario a 20 Vrms conectado con un 'Tap' central, es decir,  $-10+10$  V. Los extremos de este secundario se aplican a un puente rectificador de onda completa, mientras que el 'Tap' central es conectado a tierra. La salida rectificada del puente en su lado positivo alimenta a un regulador de voltaje 7808 y las tensiones de entrada y salida son estabilizadas por dos capacitores electrolíticos de  $1000 \mu F$  en la entrada y  $470 \mu F$  en la salida. El lado negativo del puente se conecta simétricamente a través de un regulador negativo 7908. Así tenemos la señal de +8 y -8 V regulados para alimentar los circuitos electrónicos. La línea no regulada en la salida del puente proporciona una tensión de  $\pm 12.8$  V para circuitos auxiliares.

En el caso de la positiva, se hace pasar por el interruptor 'SW6' para alimentar el positivo de 12 V de los relevadores 'RL1' y 'RL2', permitiendo que este interruptor encienda o apague los actuadores de potencia.

#### 4.4. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

La seguridad en los diseños de ingeniería siempre resultan ser un punto de vital importancia. En este trabajo, en el punto 3.4, se mencionan algunas de las consideraciones térmicas con relación a los materiales utilizados en la construcción de la cámara. Los aspectos de seguridad los agrupamos en térmicos y eléctricos.

Las consideraciones térmicas están enfocadas a no presentar una temperatura mayor a las programadas en el funcionamiento normal del equipo, es decir, 45 °C máximo. En caso de que esta temperatura, debido a algún tipo de falla, se incrementara por encima de ese valor, debemos hacer que se bloquee el sistema y evite seguir incrementando la temperatura, pero también, cuidar que todos los materiales resistan una mayor temperatura para evitar un posible incendio.

El primer límite térmico se ajusta a 50 °C mediante un termostato conectado a través de un relevador para hacer una desconexión total del sistema, al mismo tiempo, que se dispara una alarma.

Adicionalmente, existe un segundo bloqueo en 72 °C, mediante un arreglo de fusibles térmicos, tal como se recomienda en ASHRAE (2019), quien sugiere implementar mecanismos redundantes de protección térmica y bloqueo de operación ante sobre temperaturas, especialmente en equipos de laboratorio con calor residual o procesos activos. De esta manera, se garantiza que la temperatura no llegaría, en ninguna circunstancia, a niveles peligrosos.

En resumen, se tienen tres niveles de protección térmica, el sistema de control de temperatura, del cual se menciona su funcionamiento en el apartado 4.1, que tiene un límite a 45 °C. Un termostato, el cual permite subir la temperatura a un nivel máximo de 50 °C, y por último un fusible térmico con valor límite de 72 °C.

Por otra parte, en el aspecto eléctrico, se siguen los principios descritos en el mismo manual de ASHRAE (2019), se busca prevenir una descarga eléctrica que afecte a algún usuario, así como prevenir algún corto circuito en el sistema. La principal circunstancia se refiere a que vamos a tener condiciones de temperatura extremas 4 °C a 45 °C con continuas variaciones. Se consideraron 4 aspectos importantes de seguridad:

1. La estructura de la cámara está conectada directamente a tierra física para garantizar que no existan tensiones altas no deseables entre la estructura y tierra.
2. Todos los equipos empleados deben contar con aislamientos y conexiones adecuadas en función de las condiciones operativas de los elementos. En este caso, los cables utilizados poseen un aislamiento óptimo para su uso dentro de la cámara, permitiéndoles soportar las variaciones de temperatura requeridas. Así como también, cuidar la ubicación de las conexiones dentro y fuera de la cámara, con la finalidad de facilitar su instalación y futuros reemplazos, además de garantizar la seguridad del usuario al manipular el sistema.
3. Al momento de las conexiones entre cables, se utilizó thermofit capaz de soportar la humedad en caso de acumulación de agua o líquidos en el interior de la cámara y evitar el contacto directo con los cables y evitar algún incidente.
4. Finalmente, se procuró que la mayoría de las conexiones se realizaran en el exterior, por medio de orificios en puntos estratégicos de la cámara, para la salida de los cables de conexión, cuidando así, que no exista contacto directo entre la posible agua acumulada y la línea directa.

## 5. INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y ACTUADORES

La instalación eléctrica de la cámara, básicamente se encuentra dividida en dos grupos. Las líneas de señal que unen cada uno de los transductores con el sistema de control en el gabinete. Y, por otra parte, las líneas de potencia que corresponden a la alimentación trifásica y la línea entre la unidad de potencia y cada uno de los actuadores.

Los primeros, las líneas de señal, manejan tensiones de pequeña magnitud y son portadoras de la información de los transductores. Estas líneas son vulnerables a la captación de interferencia externa y por ello se manejan cables coaxiales, con un blindaje en la parte externa que reduce considerablemente este fenómeno. Además, la ruta de estas líneas es independiente de las líneas de potencia y dentro de lo posible se manejó separado de fuentes de interferencia.

Por otra parte, las líneas de potencia transportan energía para la unidad de refrigeración y para la de calefacción, la primera es monofásica de 127 V, mientras que los calentadores utilizan un trifásico conectado en estrella. Adicionalmente, fueron utilizadas, para la instalación eléctrica de las líneas de potencia, charolas de acero de 10 cm de ancho, por 5 cm de alto. Las cuales fueron manipuladas para marcar el camino de las líneas desde cada unidad de potencia hasta el gabinete.

La utilización de charolas de acero tiene varias ventajas, como:

- Mantener el cableado en rutas abiertas, lo cual, permite la continua inspección del estado en el que se encuentran los cables,
- La posibilidad de agregar más cables a la misma ruta sin necesidad de desmontar o manipular la instalación ya antes establecida.

- La ventilación que se tiene a los materiales para evitar un sobrecalentamiento a los mismos.



*Ilustración 75. Acomodo de cables por medio de charolas.*

La electrónica de control y la de potencia, se encuentran repartidos en dos gabinetes. En el superior, se encuentran la unidad de potencia, manejado por sus respectivos relevadores y los dispositivos de protección. Mientras que, en el gabinete inferior, se encuentran los acondicionadores de señal, las tarjetas con la lógica de control y su respectiva fuente de poder. A continuación, se muestran los diagramas de la distribución de los gabinetes.

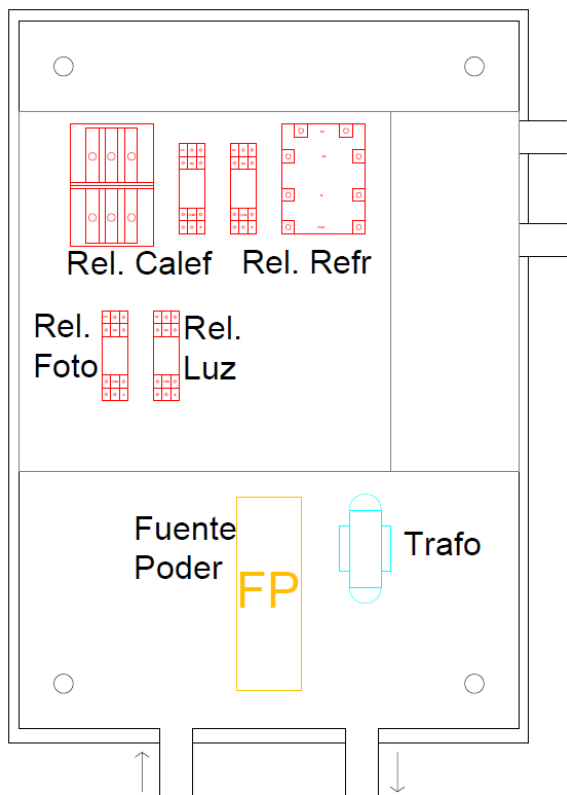


Ilustración 76. Gabinete superior (Unidad de potencia).

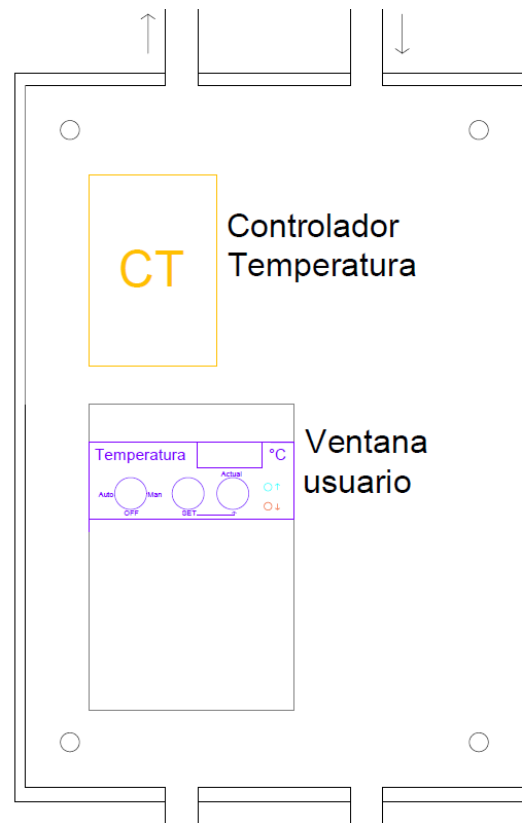


Ilustración 77. Gabinete Inferior (Acondicionamiento de Señales).

Donde en el gabinete superior se pueden observar los bloques rojos. Estos relevadores, como se mencionó en el diagrama de la 'Ilustración 73. Diagrama de unidad de potencia.' corresponden a cada actuador de la Cámara Ambiental. En el caso de los calefactores y el refrigerador, se utilizaron dos relevadores, como ya fue mencionado en la misma sección de la ilustración antes mencionada.

Los bloques amarillos representan las tarjetas PCB creadas, siendo la del gabinete superior correspondiente a la Fuente de Poder, con su respectivo transformador, y la del gabinete inferior representa el Controlador de Temperatura.

Por último, se muestra una ventana al usuario, en esa ventana se dará acceso a quien esté utilizando el equipo para manipular los potenciómetros que se dejaron señalados en la explicación del controlador de temperatura, para manipular el valor deseado que tenga



el sistema. Pudiendo ver, gracias a esta ventana, el valor en grados desde un display, y eligiendo entre las opciones de Automático, Manual y Off para los equipos correspondientes al control térmico del sistema.

A su vez, a espaldas de la cámara, por medio de la misma charola, fueron colocados tres enchufes dobles para la conexión de los actuadores, permitiendo que con solo realizar un agujero lo suficientemente grande para que pase la clavija estos fueran conectados. Quedando de la siguiente forma:



*Ilustración 78. Enchufes para actuadores.*

Este enfoque está alineado con las recomendaciones establecidas por ASHRAE (2019), las cuales indican que en espacios de laboratorio o cámaras ambientales deben adoptarse prácticas como:

- La separación física entre líneas de potencia y señal,
- El uso de cableado con aislamiento térmico adecuado,

- La implementación de rutas abiertas para inspección visual (como las charolas metálicas empleadas)
- La conexión efectiva de estructuras metálicas a tierra física

Todo ello con el fin de garantizar la seguridad operativa y prevenir riesgos por interferencias, sobrecalentamientos o contactos accidentales en entornos térmicamente activos.

## 6. RESULTADOS

Se logró diseñar y construir una Cámara Ambiental con dimensiones de 175.5 cm de ancho, 191 cm de alto y 190 cm de profundidad. Con dos ventanas, una lateral para observación y otra en la parte superior para el equipo fotográfico.

En el fondo de la Cámara, existen repisas de aluminio para soportar los actuadores actuales con espacio para equipos posteriores.

Se cuenta con sistema de drenaje interno y externo y una puerta amplia en la puerta frontal para permitir la entrada de la grúa portadora del material de muestra.

El sistema de control funciona de manera autónoma y también con mando remoto desde una computadora. El equipo puede trabajar entre 4 y 45 °C.

Las líneas eléctricas tanto de potencia como de señal de los sensores se manejan en la parte externa de la cámara en su mayoría.

Se implementó un sistema de iluminación por medio de tiras LED para mayor seguridad de operación del usuario y observación del proceso por las ventanas, así como también para el registro de las muestras al momento de almacenar la evidencia fotográfica.

En términos de seguridad, se incorporaron múltiples niveles de protección térmica y eléctrica, incluyendo termostato, fusibles térmicos, conexión a tierra, y separación física entre líneas de potencia y señal. Estas medidas permiten que el sistema opere de forma confiable incluso en condiciones adversas.

## 7. CONCLUSIONES

En el ámbito de mecánica de suelos y geotecnia, contar con herramientas que permitan replicar condiciones ambientales específicas es esencial para realizar análisis confiables y representativos. Dentro del Instituto de Ingeniería de la UNAM se había identificado la necesidad de disponer de un sistema propio, económico y adaptable que posibilitara la simulación de ambientes térmicos controlados para apoyar investigaciones en este campo.

El presente proyecto dio respuesta a esta necesidad mediante el diseño y construcción de esta Cámara Ambiental con control de temperatura, concebida para reproducir rangos térmicos definidos de forma estable y segura. Su estructura, fabricada con materiales de alta eficiencia térmica y resistencia mecánica, junto con un sistema de control electrónico redundante en seguridad, permite generar y mantener condiciones experimentales adecuadas para el estudio del comportamiento de suelos bajo diferentes temperaturas.

Con esta solución, se proporciona al laboratorio de geotecnia una herramienta versátil que reduce la dependencia de equipos importados, facilita la realización de pruebas especializadas y fortalece la capacidad de investigación con tecnología desarrollada localmente. En conjunto, se logró cumplir con los objetivos planteados en este trabajo: crear una Cámara Ambiental funcional, segura y adaptable que contribuya al fortalecimiento de la infraestructura experimental en estudios de mecánica de suelos. Este proyecto demuestra la capacidad de aplicar conocimientos eléctricos y electrónicos para resolver problemáticas en otras disciplinas de la ingeniería, promoviendo la colaboración y el desarrollo tecnológico local.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd ed.). Wiley.
- Tang, A. M., Cui, Y. J., & Barnel, N. (2008). Thermal conductivity of compacted bentonite. *Geotechnical Testing Journal*, 31(6), 504–513.  
<https://doi.org/10.1520/GTJ101196>
- ASHRAE. (2019). *ASHRAE Handbook – HVAC Applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Texas Instruments. (s. f.). *LM35 – Precision Centigrade Temperature Sensor*. AllDataSheet. Recuperado el 25 de julio de 2025, de <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/517588/TI1/LM35.html>
- Philips Semiconductors. (s. f.). *BC557 – PNP General Purpose Transistor*. AllDataSheet. Recuperado el 25 de julio de 2025, de <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/16103/PHILIPS/BC557.html>
- Texas Instruments. (s. f.). *LM358-N – Dual Operational Amplifier*. AllDataSheet. Recuperado el 25 de julio de 2025, de <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/538286/TI/LM358-N.html>