



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

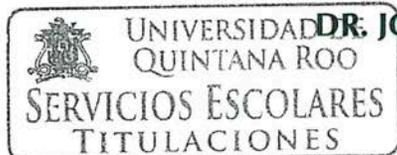
**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO TÉRMICO
DE VENTANAS CON VIDRIO DOBLE DISPONIBLE EN EL
MERCADO MEXICANO**

**TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN MECATRÓNICA**

**PRESENTA
ING. NOEL HIRAM PAT ANGULO**

**DIRECTOR
DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR
CO DIRECTOR
DR. JESÚS PERFECTO XÁMAN VILLASEÑOR**

**ASESORES
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, FEBRERO DE 2017



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DEL PROGRAMA DE
MAESTRÍA Y APROBADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN MECATRÓNICA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR

CO-DIRECTOR:

DR. JESÚS PERFECTO XÁMAN VILLASEÑOR

ASESOR:

DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

ASESOR:

DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

ASESOR:

DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, FEBRERO DE 2017.

Dedicatoria

A mis padres, por todo.

A Day, Prixpa y Mel, por apoyarme a su manera durante el transcurso de esta etapa.

A mis tíos Fernando y Clementino, y a mi Tía Lucy, quienes nunca me han dejado solo.

Agradecimientos

Al Dr. J. Ovidio Aguilar y al Dr. Jesús P. Xamán, pues esta tesis se concluyó por su dirección y apoyo.

A mis revisores y maestros, Dr. Víctor Sánchez, Dr. Romeli Barbosa y Dr. José Hernández.

A mi amigo el MM. Víctor Arcos, mi compañero de batallas.

A mi estimado Jorge Marín, por su apoyo en el proceso de manufactura.

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE	11
1.1 Introducción	11
1.2 Antecedentes	15
1.2.1 Estudios teóricos	15
1.2.2 Estudios experimentales	21
1.2.3 Estudios teórico-experimentales	22
1.3 Objetivo	24
1.4 Alcance	24
CAPÍTULO 2. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN	25
2.1 Modelo físico de la cavidad cuadrada con ventana de control solar	25
2.2 Ventana de control solar	27
2.3 Diseño y construcción del prototipo experimental	27
2.4 Instrumentación del prototipo experimental	34
2.4.1 Medición de variables climáticas	34
2.4.2 Instrumentación para la medición de la temperatura interior	35
2.4.3 Instrumentación para la medición del flujo de calor al interior	37
2.4.4 Sistema de control del enfriador de agua(Chiller)	39
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN	46
3.1 Caracterización de termopares y termopilas	46
3.2 Caracterización del dispositivo de control de temperatura	49

3.3 Caracterización del prototipo	50
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	56
4.1 Ventana de vidrio doble con película de control solar Low-e	59
4.2 Ventana de vidrio claro de 6 mm	63
4.3 Perfiles de temperatura	68
4.4 Ahorro de energía	69
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	72
REFERENCIAS	73
ANEXOS	76
Anexo 1. Planos del prototipo experimental	76
Anexo 2. Programación para el control de temperatura	81
Anexo 3. Temperaturas puntuales y diferenciales de las paredes del prototipo	82
Anexo 4. Posición de sensores en el sistema de adquisición de datos	84

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de producción de energía primaria, 2015 (Secretaría de Energía, 2015).	11
Figura 2. Ejemplos de tecnología en vidrios (Ferranato vidrios, 2014)	14
Figura 3. Transferencia de calor conjugada para configuración clima cálido (Xaman et al, 2016)	25
Figura 4. Modelo físico de ventana de vidrio doble (Xamán et al, 2016)	26
Figura 5. Propiedades ópticas del vidrio claro de 6 mm y del vidrio con película Low-e (Aguilar et al, 2015)	27
Figura 6. Modelo CAD del evaluador térmico	28
Figura 7. Partes del prototipo	29
Figura 8. Corte y piezas del prototipo experimental	30
Figura 9. Base del prototipo	31
Figura 10. Ensamble de paredes rígidas	31
Figura 11. Prototipo con doble termoaislante	32
Figura 12. Paredes forradas con paneles de acero inoxidable	32
Figura 13. Contenedor de agua para el fondo del prototipo	33
Figura 14. Prototipo recubierto de crestuco	33
Figura 15. Irradiancia solar mensual promedio	34
Figura 16. Termopar.	35
Figura 17. Disposición de termopares en el interior del prototipo	36
Figura 18. Calor en el aire almacenado en el interior	36
Figura 19. Termopilas al exterior(derecha) e interior del prototipo experimental(izquierda).	37
Figura 20. Conexión en serie de termopares.	38
Figura 21. Transferencia de calor a través de las paredes	38
Figura 22. Atmega328p.	39
Figura 23. AD595.	40
Figura 24. LCD 16 x 2 (superior) y resistencia variable (inferior).	41
Figura 25. Transistor TIP3055.	41
Figura 26. Diagrama esquemático del dispositivo de control.	42
Figura 27. Distribución de terminales del Atmega328p.	43
Figura 28. Distribución de terminales del AD595.	43
Figura 29. AD595, circuito de conexión básica.	44
Figura 30. LCD 16 x 2, Pin-out.	44
Figura 31. Placa Base	45
Figura 32. Módulo de salida	45
Figura 33. Circuito con elementos incorporados en funcionamiento	45
Figura 34. Horno Seco Fluke 9100S	46
Figura 35. Toma de pantalla del formulario para termopilas	48
Figura 36. Temperatura ambiente obtenida con ambos dispositivos	49
Figura 37. Numeración de termopares de la matriz	50
Figura 38. Orientación del prototipo y recorrido solar	56
Figura 39. Radiación solar y temperatura ambiente de los días de medición.	58
Figura 40. Perfiles de temperatura. Derecha Ventana de vidrio de 6mm, Izquierda Ventana de vidrio doble Low-e	68

Índice de tablas

Tabla 1. Precios por energía consumida para el mes de enero (CFE, 2017)	12
Tabla 2. Partes del prototipo experimental	29
Tabla 3. Calibración de termopares	46
Tabla 4. Formulario para termopilas.	47
Tabla 5. Coeficientes para el polinomio del termopar	48
Tabla 6. Temperatura promedio en el interior del prototipo	51
Tabla 7. Flujo de calor al interior	52
Tabla 8. Flujo de calor en paredes	53
Tabla 9. Flujo de calor total, a través de las paredes y por la ventana a lo largo del día	54
Tabla 10. Flujo de calor a través de la ventana	55
Tabla 11. Temperatura interior con la ventana de vidrio doble con recubrimiento Low-e	59
Tabla 12. Flujo de calor al interior del prototipo con la Ventana de vidrio doble	60
Tabla 13. Flujo de calor por las paredes del prototipo con la Ventana de vidrio doble	61
Tabla 14. Flujo de calor total a través de paredes y de la ventana de vidrio doble Low-e	62
Tabla 15. Temperatura interior con la ventana de vidrio claro de 6 mm	63
Tabla 16. Flujo de calor al interior del prototipo con la Ventana de vidrio claro de 6 mm	64
Tabla 17. Flujo de calor por las paredes del prototipo con la Ventana de vidrio claro de 6 mm	65
Tabla 18. Flujo de calor total, a través de las paredes y de la ventana de vidrio claro de 6 mm	66
Tabla 19. Flujos de calor en horas solares para ambas ventanas	67
Tabla 20. Análisis de ahorro de energía con el uso de la ventana de vidrio doble	69
Tabla 21. Análisis de costos	70

Resumen

Se realizó un estudio experimental de la transferencia de calor en ventanas de vidrio doble, con vidrios disponibles en el mercado mexicano. El experimento se realizó en las condiciones climáticas de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

Se diseñó, construyó e instrumentó un prototipo experimental que permitió la evaluación del flujo de calor en dos tipos de ventana, una de vidrio claro de 6 mm de espesor, que sirvió como referencia, y una de doble vidrio de 6 mm con recubrimiento de baja emisividad (Low-e).

El prototipo fue construido de materiales con conductividad térmica conocida y disponibles en el mercado local, instrumentado con sensores de temperatura de alta pureza y precisión, de la marca OMEGA[®], y diseñado con respecto a la medida general de ventanas (0.8m x 0.8m).

Los resultados demostraron que con la ventana de vidrio claro de 6 mm existe una mayor transferencia de calor al interior que con el uso de una ventana de vidrio doble con recubrimiento de baja emisividad térmica, en una estimación del ahorro de energía que se podría presentar con el uso de esta, se obtuvo que se ahorran 2 KWh en un día de uso con una radiación solar de 5 KWh presente en el día, el equivalente en pesos mexicanos a \$560.00 en medio año por el uso de una ventana de un m² de este tipo.

Abstract

An experimental study of heat transfer through double pane windows with Mexican glass available in local market was developed, under the climate conditions of Chetumal, Quintana Roo, city of México.

An experimental prototype was designed, built and instrumented to allow the evaluation of heat flux in two types of window, one of clear glass with 6 mm of thickness and a double pane window with a low emissivity film attached in one pane, each pane of 6 mm of thickness.

The prototype was built with known thermal conductivity materials available in local market, instrumented with high purity and precision temperature sensors, OMEGA[®] brand, and designed according the general dimensions of windows (0.8 m x 0.8 m).

The results showed that with the clear glass window exist a higher heat transfer to the interior compared with the double pane low emissivity window, in an energy savings estimation that could be presented with the use of this window its obtained that 2 KWh are saved in a day of use, under a solar radiation of 5 KWh through the day, the equivalent in Mexican pesos of \$560.00 with the use of one m² of this window, in half a year.

Capítulo 1. Estado del arte

1.1 Introducción

Actualmente, el uso de sistemas de acondicionamiento ambiental se ha vuelto muy importante, en algunos casos imperativo debido a las condiciones climáticas que se manifiestan, las emisiones de gases de efecto invernadero han cambiado drásticamente el entorno natural, calentando la tierra y provocando que se manifiesten condiciones extremas de frío y calor.

Estos sistemas se han presentado con más notoriedad debido a los cambios climáticos, sin embargo, es importante mencionar que la mayoría de estos funcionan con energía producida por combustibles fósiles (Figura 1), los cuales son la principal causa del aceleramiento del calentamiento de la tierra. En México, de acuerdo con la secretaria de energía (SENER), en el 2015, 86% de la energía primaria del país provenía de combustibles fósiles, principalmente petróleo y gas natural (Secretaría de Energía, 2015); de acuerdo con PEMEX (Petróleos de México), basado en la producción de energía del año 2012, las reservas totales de petróleo duraran aproximadamente 32.9 años (Mundo-Hernandez & de Celis Alonso, 2014), el uso continuo de sistemas basados en estos combustibles impacta directamente en el crecimiento anual de las emisiones de carbono (CO_2) el cual, en el 2013, represento el 4.3%, uno de los más elevados a nivel mundial (Alemán-Nava et al, 2014).

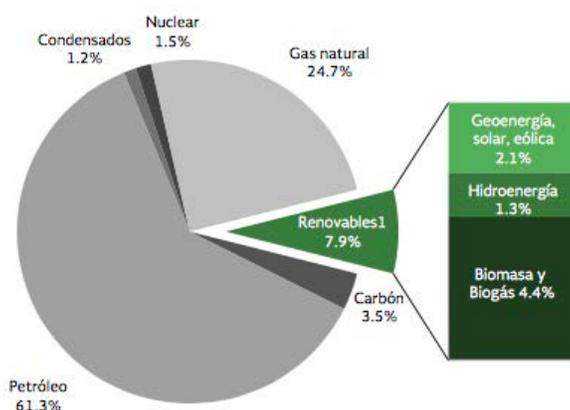


Figura 1. Estructura de producción de energía primaria, 2015 (Secretaría de Energía, 2015).

La Secretaría de Energía, cada año elabora un Balance Nacional de Energía (BNE), del BNE realizado en 2015, el sector residencial, comercial y público representó el

18% (950.96 PJ) del consumo final de energía. De este porcentaje, el gas licuado, la leña y la electricidad equivalen casi en 17% del consumo final. Esto indica que las edificaciones tienen una aportación considerable a las emisiones contaminantes a la atmosfera (Secretaría de Energía, 2015).

En el 2016 el 88.57% de los clientes consumidores de energía eléctrica fueron del sector doméstico con un total de 45,141.00 GW consumidos en el año, de los cuales, la zona peninsular (Quintana Roo, Yucatán y Campeche) representó un consumo de 7.15% (Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México, 2017) y representaron el 26.58% del total de ventas. Las tarifas domésticas se clasifican por la temperatura media mínima en verano, con base a ello se dividen en escalones de consumo, el menor escalón se caracteriza por tener el precio mínimo en el valor de energía consumida, mientras más se consume se va ascendiendo de escalón y los escalones superiores van aumentando su precio, de igual manera hay una tarifa para los usuarios que excedan el consumo en los escalones indicados por la CFE (Comisión Federal de Electricidad) denominada tarifa DAC (Domestica de Alto Consumo) (Tabla 1). Para apoyar a los usuarios de las ciudades más calientes debido al uso de sistemas de acondicionamiento en sus residencias la CFE tiene dos temporadas de facturación, la de verano y la de fuera de verano, en donde en verano los Kilowatts hora de los escalones se duplican, las tarifas predominantes en el sureste del país son la 1B y 1C.

Tabla 1. Precios por energía consumida para el mes de enero (CFE, 2017)

Escalón de Consumo	Tarifa 1B y 1C
Básico	\$0.793
Intermedio	\$0.956
Excedente	\$2.802
DAC	\$95.67 + 3.853*

* Cargo fijo + cargo por energía consumida(KWH)

Los clientes del sector comercial y de servicios representaron un 10.32% con un total de ventas del 10.81 %, junto con el sector doméstico forman un 37.39% de las ventas totales de energía (CFE, 2016). Como el sector doméstico, comercial y de servicios no poseen actividades industriales, el consumo energético es propio del edificio.

Las edificaciones son una parte integral del hombre, la mayor parte del tiempo nos encontramos dentro de estas ya sea por trabajo, en el hogar o en actividades de recreación, sin embargo, la mayoría de las construcciones tradicionales carecen de un análisis previo en cuanto a su entorno climático, no toman en cuenta que el aire, el sol, la temperatura ambiente, la orientación, entre otros factores afecta significativamente el entorno de está, produciendo inconformidad en el recinto. Para estos casos se ve la necesidad de utilizar sistemas de acondicionamiento ambiental, tanto para iluminación, temperatura, humedad o para disminuir la incidencia solar.

En las últimas tendencias arquitectónicas se ha optado por apostar a las construcciones bioclimáticas, estas se caracterizan por poseer en su diseño o en implementación tecnologías amigables con la naturaleza, como por ejemplo techos verdes para disminuir el calentamiento por el sol, orientación adecuada para permitir el mayor paso de aire y claridad reduciendo la incidencia solar, fachadas y techos dobles para reducir la energía que entra al recinto, etc. Una de las partes más importantes para las construcciones tradicionales y bioclimáticas son las ventanas pues son la parte de un edificio en donde entra el mayor aporte energético.

A pesar de que se han realizados estudios y obtenido grandes resultados en mejorar la eficiencia de los sistemas de acondicionamiento ambiental, se sigue manteniendo el problema del punto donde se presenta la mayor pérdida o ganancia de temperatura que son las ventanas, en muchas investigaciones se buscan nuevas formas de contrarrestar este efecto, Desde hace décadas se han utilizado ventanas con vidrios de control solar, por ejemplo, vidrio absorbente, reflectivo y de baja emisividad entre los más comunes (Figura 2). Sin embargo, las ventanas con doble envidriado, se han caracterizado por tener un mejor desempeño térmico en comparación con las de un solo vidrio. Se han propuesto diferentes configuraciones de vidrios dobles, los que sólo tienen aire estático en el interior o algún gas inerte, con agua en el interior, con ventilación natural, los que incorporan persianas en su interior o celdas solares transparentes, y los que utilizan materiales con cambio de fase (PCM) por mencionar algunos. De los tipos de vidrios dobles mencionados, los vidrios dobles con aire estático en el interior se consideran la mejor

opción debido a su simpleza en construcción y su reducido costo respecto a los demás (Aguilar et al, 2015).

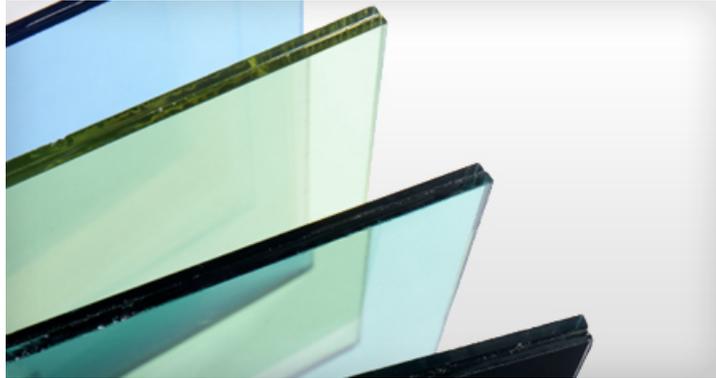


Figura 2. Ejemplos de tecnología en vidrios (Ferranato vidrios, 2014)

En la actualidad existe una variedad de estudios relacionados al funcionamiento térmico de ventanas con vidrio doble, con y sin películas de control solar. Sin embargo, algunos de éstos trabajos utilizan correlaciones para determinar los coeficientes de transferencia de calor convectivos y radiativos para determinar la convección y radiación entre el vidrio y fluido.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un prototipo que permita la evaluación térmica de ventanas de vidrio doble para determinar el ahorro energético que estas proporcionan y la evaluación se realizará bajo condiciones climáticas de Chetumal, Quintana Roo. Para este propósito se construirá una cavidad cúbica de 0.8 m de lado recubierta de material termoaislante en la cual se le instalará una ventana con vidrio doble de materiales disponibles en el mercado mexicano con el propósito de evaluar estas ventanas y poder obtener información que muestre las ventajas y desventajas sobre su uso en el sureste del país.

1.2 Antecedentes

Las ventanas de cristales dobles se han implementado desde años atrás para la reducción de la carga térmica en las edificaciones, se han realizado diversas investigaciones en busca de mejorar el aislamiento de estas, en la presente sección se citan algunos trabajos teóricos y experimentales.

1.2.1 Estudios teóricos

Aydin (2000) realizó un estudio numérico de transferencia de calor a través de una ventana de vidrio doble para la determinación del espesor óptimo de la capa de aire entre los paneles para 4 diferentes ciudades de Turquía: Antalya, Trabzon, Ankara y Kars. El autor uso el método de diferencias finitas, la altura de la ventana se escogió de 80 cm por ser la medida general de las ventanas en Turquía, y se tomó como temperatura interior 21°C, los dos paneles se consideraron isotérmicos. De los resultados el espesor óptimo es diferente en las 4 ciudades, siendo 18-21 mm para Antalya, 15-18 mm para Trabzon y Ankara y 12-15 mm para Kars.

Ismail y Henríquez (2003) realizaron un estudio numérico de una ventana de vidrio claro y vidrio absorbente considerando diferentes espesores del vidrio. Los autores usaron la aproximación de diferencias finitas. Concluyeron que la ganancia de calor total disminuye significativamente conforme aumenta el grosor del vidrio. También concluyeron que el vidrio absorbente presentó menor ganancia de calor total que el vidrio claro.

Ismail y Henríquez (2005) analizaron numéricamente el comportamiento de una ventana de vidrio doble con ventilación natural, la ventana está compuesta por 2 hojas de vidrio paralelas, formando un canal abierto por el cual el aire fluye. El modelo usado fue transitorio en dos dimensiones con efectos de transferencia de calor en la parte exterior por convección y radiación y para la parte interior convección y radiación. La radiación solar incidente y la temperatura interior fueron variadas en el tiempo. El modelo transitorio fue formulado basado en las ecuaciones fundamentales de conservación de masa, momentum y de energía resolviendo las constantes asociadas por la aproximación de diferencias finitas. Los autores concluyeron que la cavidad tiene un efecto en cuanto al coeficiente de ganancia por

calor solar y el coeficiente de sombreado entre las separaciones de 1cm, 2cm y 3cm, la separación óptima para los autores fue de 1 cm.

Aydin (2006) realizó un estudio numérico para determinar el espesor óptimo de la capa de aire entre dos hojas de vidrio, en la cual considera transferencia de calor conjugada a través de los paneles. La altura de los paneles se tomó de 80 cm y la temperatura interior de 21°C, se consideró dos condiciones de frontera para las superficies exteriores, el caso 1 con las superficies a temperatura constante y el caso 2 con condiciones de flujo convectivo. Con base en los resultados de las simulaciones del caso 1, se concluyó que el intervalo de espesor óptimo para la ciudad de Antalya fue de 18-21 mm, 15-18mm para Trabzon y Ankara y 12-15 mm para Kars; para el caso 2, se obtuvo que usando condiciones convectivas para las superficies exteriores sugieren menores valores de transferencia de calor que aquellos con la aproximación de temperatura constante, debido a las resistencias adicionales en el interior y el exterior ya que estas fueron tomadas como cero para el caso 1.

Gugliermetti y Bisegna (2007) realizaron un estudio para analizar los ahorros de energía ligados al uso potencial de ventanas reversibles con diferentes configuraciones en edificios residenciales y espacios de trabajo. Se consideró 180° de reversibilidad de las ventanas, se estudiaron diferentes tipos de vidrios, claro, absorbente y low-e de diferentes tipos, así mismo diferentes configuraciones de ventana de doble panel fueron planteadas tomando como referencia la configuración tradicional, vidrio claro – cavidad de aire – vidrio claro. El sistema a estudiar fue una habitación rectangular, los valores de la ventana fueron calculados con WINDOW 4.1 y las simulaciones fueron hechas con IENUS. De los resultados se encontró que para las ventanas dobles conformadas con un vidrio claro y uno absorbente, reducen la energía anualmente si pueden ser reversibles 180° dejando el panel absorbente hacia el interior durante temporadas de calor y hacia el exterior durante temporada de frío. También se concluyó que las ventanas orientadas al sur presentan mayores ahorros con respecto a aquellas orientadas al este o el oeste.

Xamán et al (2009) realizaron un estudio numérico de la transferencia de calor conjugada dentro de una cavidad cuadrada con flujo turbulento. El modelo a estudiar

consistió en una cavidad cuadrada formada por dos paredes horizontales adiabáticas, una pared isotérmica y una pared semitransparente con recubrimiento de control solar de $SnS - Cu_xS$. Las ecuaciones gobernantes fueron las ecuaciones de conservación del momentum, de masa y de energía, las cuales fueron resueltas mediante el método de volúmenes finitos. Los autores concluyeron que usando la película de control solar el flujo total de calor se redujo de 646.24 a 331.44 W/m^2 en comparación con el caso que no usa la película de control solar en la pared semitransparente.

Ismail et al (2009) realizaron un estudio numérico de la transferencia de calor a través de 3 tipos de ventanas diferentes, una ventana de vidrio simple, una doble con ventilación natural y una ventana de vidrio doble llena con gas de absorción de energía. Para el estudio de cada ventana se realizó un modelo específico con una aproximación para cada una de ellas, para la ventana simple se resolvió la ecuación de conducción de calor en estado transitorio bidimensional con fuente de calor, para la ventana de vidrio doble con ventilación natural se realizó la formulación transitoria de fluido laminar incomprensible en dos dimensiones y en los efectos de flotación son considerados por la aproximación de Bussinesq y para la ventana de vidrio doble con gas absorbente se usó el modelo acumulativo de número de onda. Se concluyó que las ventanas de cristal simple y la de ventilación natural resultan térmicamente menos eficientes, siendo la ventana llena con gas absorbente la que tuvo los mejores resultados, demostrando que la presencia de los gases puede mejorar el desempeño térmico de las ventanas.

Arici y Karabay (2010) realizaron un estudio numérico para determinar el espesor óptimo de la cavidad de aire en ventanas de vidrio dobles en Turquía se consideró los costos de inversión y de calentamiento. Para el estudio se usó el método del grado, el cual es una reflexión cuantitativa de la demanda de energía necesitada para calentar o enfriar espacios, tomando 3 temperaturas base 18 , 20 y 22°C y diferentes tipos de combustible, gas natural, carbón, gasolina y LPG. Los autores notaron que mientras que los costos de inversión aumentan al incrementar el espesor de aire, los costos de calentamiento disminuyen al principio para luego aumentar debido a la transferencia de calor convectiva. Se obtuvo que el espesor

óptimo varía entre 12 y 15mm dependiendo de la temperatura base y el tipo de combustible para las zonas de Turquía, el efecto por el tipo de combustible no es significativo para las ciudades de clima frío. Sin embargo, este disminuye para las ciudades de clima cálido, en zonas frías el espesor óptimo lo determina el costo de calentamiento, la magnitud de ahorro de energía depende del tipo de combustible siendo el más alto el LPG y el más bajo el gas natural para todos los casos.

Noh-Pat et al (2011) realizaron un estudio numérico para la evaluación del uso de una película de control solar de $SnS - Cu_xS$ en una ventana de vidrio doble para comparar los resultados con respecto a una ventana de vidrio doble tradicional (sin película de control solar). También se pudo determinar la separación óptima entre los paneles de vidrio de la ventana, para la evaluación numérica no se usaron correlaciones de transporte convectivo si no que fue modelado a través de las ecuaciones gobernantes de conservación de masa, momentum y de energía. El modelo fue en dos dimensiones formando un canal vertical con dos paredes semitransparentes, la transferencia de calor se consideró conjugada. Los autores concluyeron que la distancia de separación óptima fue de 6 cm y los ahorros presentados con respecto a la ventana tradicional fueron del 55% con la separación de 6 cm.

Gijon-Rivera et al (2011) realizaron un estudio que consistió en la simulación de una habitación con fachada de cristal y recubrimiento de $SnS - Cu_xS$. Se analizó el impacto en cuanto al consumo de energía para dos localidades diferentes México y Canadá. Para la resolución del modelo se usaron los softwares ESP-r system, el cual es una herramienta dinámica para la simulación térmica en edificios. La geometría de la habitación es un rectángulo de 4x4x12m y las condiciones de frontera son adiabáticas para el lado este, oeste y las superficies del piso, y las superficies restantes como expuestas a las condiciones ambientales exteriores, la fachada de vidrio orientada al sur y los materiales usados fueron, ladrillo rojo para las paredes norte, este y oeste, el techo de concreto y la ventana de cristal claro, de cristal con película de control solar, doble con película de control solar y doble de vidrios claros. Los autores concluyeron que en Ottawa, Canadá, el cristal con película de control solar redujo ligeramente la carga de energía debido al incremento de la temperatura

por la película, en verano no se encontró una ventaja clara en el uso de este tipo de ventana, El recubrimiento solar adherido a un vidrio resultó la peor configuración de ventana para ambos climas, se concluyó que una buena solución es la ventana de vidrio doble con recubrimiento solar, sin embargo, para la ciudad de México una ventana de vidrio doble de vidrios claro es más conveniente.

Xamán et al (2012) extendieron el estudio realizado por Xamán et al en 2009, en este caso realizaron un estudio de transferencia de calor conjugada en una cavidad cuadrada con flujo turbulento presente tomando en cuenta variación de emisividad en la pared opaca. El propósito del estudio fue encontrar el intervalo en el cual el valor de emisividad para las paredes opacas brinda una baja ganancia de calor y las temperaturas correspondientes dentro de la cavidad con el uso de una película de control solar. La cavidad a estudiar fue considerada con una longitud de 4 m, el espesor del vidrio de 6mm, la película de control solar de $SnS - Cu_xS$, la pared isotérmica a 21°C, la temperatura ambiente a 35°C, la emisividad en la pared semitransparente sin película de control solar fue considerada de 0.85 y con el recubrimiento de control solar fue de 0.4, la emisividad de las paredes restantes fue variada ente $0.1 \leq \varepsilon \leq 1.0$. Se concluyó que existe un intervalo de emisividad en el cual las temperaturas de la cavidad con el uso del control solar son más bajas respecto al caso donde no se usa control solar, el intervalo fue determinado de los resultados del promedio de la temperatura del aire y el flujo de energía efectiva dentro de la cavidad.

Xamán et al (2014) realizaron un estudio con el propósito de evaluar el uso de una película de control solar(SCF) $SnS - Cu_xS$ en una ventana de vidrio doble para su uso en clima cálido y frío. El estudio tiene dos objetivos el primero es comparar los resultados con ventanas dobles tradicionales, sin película de control solar y el segundo propósito fue el de determinar la separación óptima entre los paneles de vidrio. El modelo físico representando la ventana consiste de dos paredes verticales semitransparentes, el vidrio uno mirando hacia el interior de la habitación, y el vidrio dos hacia el exterior y expuesto a la radiación solar, se consideraron dos configuraciones, una para clima cálido con SCF en el vidrio 2 y para clima frío con SCF en el vidrio 1. Los autores determinaron que la distancia óptima de separación

para ambas configuraciones fue de 6 cm, con la configuración clima cálido se presentaron ahorros del 52% con respecto a la ventana sin SCF y para la de clima frío los ahorros fueron del 10%.

Aguilar et al (2015) realizaron un estudio numérico para de evaluar el desempeño térmico de una ventana de vidrio doble en clima cálido y frío con tres tipos de cristales disponibles en el mercado mexicano. El estudio determinó la adecuada configuración para ambos climas, así como la distancia óptima de separación entre los paneles de vidrio. El modelo físico representando la ventana consiste de dos paredes verticales semitransparentes, el vidrio uno mirando hacia el interior de la habitación , el dos hacia el exterior y expuesto a la radiación solar. Se consideró transferencia de calor conjugada a través de la ventana, por conducción a través de la pared semitransparente, convectivo a través del aire encapsulado e intercambio radiativo entre las paredes de la cavidad. Los vidrios a evaluar fueron: claro, absorbente y reflejante, y tres configuraciones fueron analizadas.

- Caso 1: Cristal claro + b + cristal claro
- Caso 2: Cristal claro + b + cristal absorbente
- Caso 3 : Cristal claro + b + cristal reflectivo

Los autores concluyeron que en la separación entre los vidrios, en donde el flujo de calor a través del interior se mantiene casi constante es de 0.02 m para las dos condiciones climáticas y en los 3 casos de estudio. En climas fríos, el caso 1 logro los más altos ahorros de energía, 12% más que el caso 2 y 30% más que el caso 3. Mientras que para el clima cálido, el caso 3 mostró el mayor ahorro de energía, 220 y 120% mayor que el caso 1 y el caso 2 respectivamente. El balance global de costos indica que el caso 3 es la mejor opción para el ahorro de energía.

Xamán et al (2016) realizaron un estudio para evaluar una ventana de vidrio doble con película de control solar acoplado a una habitación considerando la ventana reversible. Para comparar los resultados, una ventana tradicional de doble panel sin película de control solar también es analizada. El comportamiento térmico del sistema habitación-ventana es estudiado para el día más caliente y el día más frío, considerando variables ambientales horarias de la ciudad de México. La habitación es considerada de 3 m de alto y de largo, el fluido es considerado bidimensional

tomando en cuenta que la dimensión en la dirección z es mucho más larga que las otras dos. La superficie izquierda de la habitación es una pared opaca isotérmica a 24°C, las dos paredes horizontales, superior e inferior, son consideradas adiabáticas., la pared de la derecha es parcialmente adiabática con una ventana de doble vidrio, la altura de la ventana es de 0.8 y el espesor de este de 6mm, la distancia entre los paneles de vidrio en la ventana fue considerado de 6cm, tres configuraciones fueron analizadas:

- Caso 1: Ventana de doble vidrio claro
- Caso 2: Clima cálido, Ventana de vidrio claro en el interior con película de control solar en el vidrio exterior
- Caso 3: Clima frío, Ventana de vidrio claro en el exterior y con película de control solar en el interior.

Los resultados obtenidos para las condiciones de clima cálido para la temperatura de la habitación en el caso 1(33°C) es más alta que la obtenida en el caso 2(29°C), principalmente cuando los valores de radiación solar fueron diferentes a cero. Se pudo observar que en el intervalo donde hubo mayor radiación solar (9:00 a 15:00 h) el caso 2 reduce el total de flujo de calor hacia el interior de la habitación comparado con el caso 1, el flujo de calor al interior para el caso 1 fue de 2316.99 W/m^2 y para el caso 2 de 748.43 W/m^2 . Se puede confirmar que con el uso de una película de control solar rechaza en un día de 1:00 a 24:00 h la cantidad total de 1568.56 W/m^2 (67%), resultado de la diferencia entre el flujo al interior para el caso 1 menos el flujo para el caso 2, mientras que la comparativa entre el caso 1 y el caso 3 resultaron similares.

1.2.2 Estudios experimentales

Álvarez et al (2000) propusieron una metodología experimental para evaluar la eficiencia térmica de los vidrios en ventanas. El experimento se llevó a cabo en un laboratorio bajo condiciones controladas en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET. Los vidrios investigados fueron el vidrio claro común de 3 mm, vidrio de 6mm, vidrio filtrasol de 6 mm, y vidrio reflectasol de 6mm. Una lámpara halógena de tungsteno de 1000 W se utilizó para simular las condiciones de radiación solar. Se construyó una caja calorímetra con dimensiones

de 0.50 x 0.50 x 0.50 m, las paredes fueron construidas de placas de acrílico transparente de 0.012 m de espesor y aisladas con lana de vidrio. Así mismo el marco de las ventanas para los vidrios fue hecho de madera y es desmontable para poder evaluar de esta manera los diferentes tipos de vidrios, en el fondo de la caja calorímetra se instaló un intercambiador de calor que consiste en una placa absorbente de cobre de 0.0012 m de espesor montada sobre serpentín por el cual fluye agua a una temperatura controlada . El método consiste en mantener el fluido del serpentín a una temperatura constante mientras se coloca el vidrio a evaluar y se usa el simulador solar. A través de la ventana de vidrio se determina la ganancia o pérdida de energía mediante las indicaciones de temperatura de 24 termopares tipo T y de igual manera la temperatura exterior. El flujo de energía a través de sistema fue calculado como la diferencia entre el calor removido por el intercambiador y el calor perdido del sistema. Los resultados obtenidos indican que el vidrio de reflectasol de 6 mm presentó el menor coeficiente de sombreado.

1.2.3 Estudios teórico-experimentales

Medved y Novak (1998) realizaron el estudio de una ventana de vidrio doble con pantalla de aislamiento térmico, la cual consiste en una cavidad semiabierta en la parte superior mediante un sifón. Se implementó el modelo numérico usándose el método de volúmenes finitos usando PHOENICS. El modelo físico consistió en la construcción de una caja caliente de $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ m}^3$ acoplado una ventana de vidrio doble con sifón de 50 cm x 50cm, todo el experimento se realizó dentro de una habitación en la cual se simuló los valores de temperaturas eléctricamente mediante resistencias. Para validar el modelo se correlacionaron 4 valores de temperaturas. El modelo demostró proveer de buen aislamiento térmico, sugiriendo mejorar la eficiencia de este añadiendo un recubrimiento de baja emisividad en el interior de la ventana.

Long et al (2015) realizaron un estudio del desempeño térmico de tres configuraciones de ventanas, dos de doble vidrio, en la cual una de ellas tiene una película de dióxido de vanadio (VO₂), y una de un solo vidrio, pero con película de VO₂. Se concluyó que las ventanas de vidrio doble con película de VO₂ reducían el 11.6% del consumo de energía en una residencia ordinaria en un clima caliente.

En la revisión bibliográfica se aprecia que la mayoría de los trabajos acerca de ventanas de doble vidrio son de carácter numérico algunos de estos son experimentales, pero bajo condiciones controladas o en regiones específicas. El propósito de este estudio es determinar de manera experimental el desempeño térmico de una ventana de doble vidrio bajo condiciones climáticas de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, con vidrios disponibles en el mercado mexicano y poder detallar su desempeño térmico.

1.3 Objetivo

Desarrollar un prototipo que permita la evaluación térmica de ventanas de vidrio doble para determinar el ahorro energético que estas proporcionan.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir el prototipo experimental.
- Instrumentar el prototipo para la medición de temperaturas (interior, paredes internas y externas y exterior).
- Preparar las muestras de ventanas a evaluar, una de vidrio claro de 6 mm y una de vidrio doble con una película de baja emisividad adherida a un panel.
- Realizar la evaluación térmica del prototipo bajo condiciones climáticas de verano en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.
- Analizar los resultados obtenidos y propuesta de aplicación de las ventanas de vidrio doble.

1.4 Alcance

Realizar el diseño y la construcción de un prototipo experimental para la evaluación térmica de ventanas de vidrio doble. El prototipo o celda será diseñada de manera versátil para montar diferentes muestras de ventanas de vidrio doble. Las ventanas de vidrio doble serán construidas con base al vidriado disponible en el mercado mexicano. La evaluación térmica de la ventana será realizada en condiciones ambientales de Chetumal, Quintana Roo durante un día de experimentación.

Capítulo 2. Diseño, Construcción e instrumentación

En la presente sección se describe el fenómeno que ocurre en el prototipo o celda experimental, tomando en cuenta el efecto de las condiciones climáticas. De igual manera se describe el proceso de finalización del prototipo, desde la etapa del diseño hasta la terminación en la construcción e instrumentación del mismo.

2.1 Modelo físico de la cavidad cuadrada con ventana de control solar

El modelo está basado en el trabajo de Xamán et al (2016), en el cual se estudió numéricamente la transferencia de calor de una ventana de vidrio doble acoplada a una habitación (Figura 3). El sistema tiene una pared vertical isotérmica a 24°C , paredes horizontales adiabáticas y pared vertical semitransparente. La configuración de la ventana está basada en el modelo de Aguilar et al (2015), en donde se obtuvo la distancia óptima de la cavidad de aire(b) entre los paneles de vidrio de una ventana de vidrio doble usando vidriado mexicano: claro, absorbente y reflejante. La ventana está formada por vidrio doble, una hoja al interior (Vidrio 1) y una al exterior (Vidrio 2). Se consideran dos configuraciones para estas ventanas, una para clima cálido, la cual consiste en un vidrio claro (Vidrio 1) y un vidrio semitransparente con película de control solar (Vidrio 2), y la correspondiente para clima frío, se trata de un vidrio semitransparente con película de control solar (Vidrio 1) y un vidrio claro (Vidrio 2).

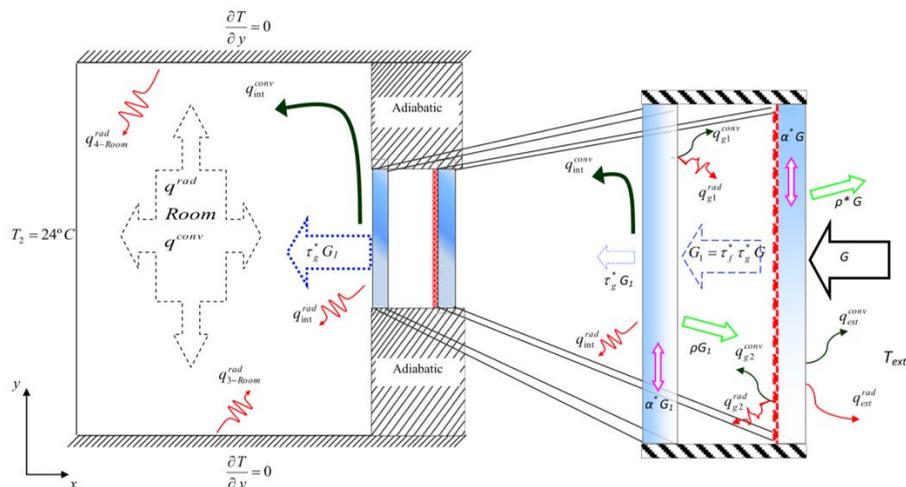


Figura 3. Transferencia de calor conjugada para configuración clima cálido (Xaman et al, 2016)

Las condiciones climatológicas de la ciudad de Chetumal son en general cálidas, por esta razón se realizará la evaluación térmica de las ventanas con configuración para el clima cálido comparando con una ventana de vidrio doble de vidrios claros, analizando tres mecanismos de transferencia de calor, sin embargo, el prototipo podrá usarse para los dos tipos de clima, cálido y frío.

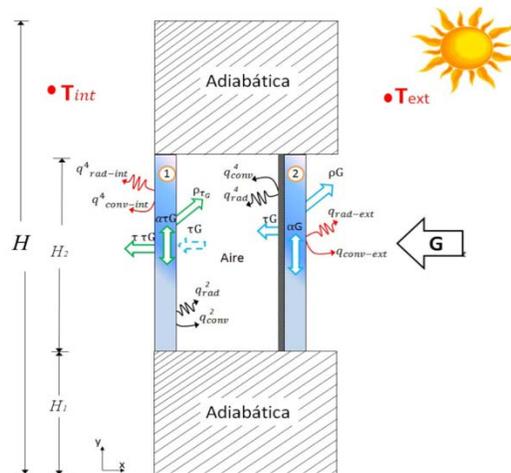


Figura 4. Modelo físico de ventana de vidrio doble (Xamán et al, 2016)

Para la configuración de la ventana en clima cálido el fenómeno ocurre de la siguiente manera, (Figura 4) se considera que sobre la pared semitransparente, vidrio 2, incide energía solar (G) de manera normal sobre la superficie, parte de esta energía es absorbida por el vidrio, provocando una transferencia de calor en forma de conducción a través de él, otra parte es reflejada y el resto es transmitida, esto ocurre debido a las propiedades ópticas del vidrio, absorptividad (α), reflectividad (ρ) y transmitividad (τ), el calor absorbido por el vidrio es mayor al que contiene el aire adyacente a este, lo que provoca una transferencia de calor en forma de convección y radiación hacia el interior de la cavidad (b) y hacia el medio exterior. El movimiento del aire en la cavidad (b) debido a la convección, la radiación del vidrio 2, la energía transmitida a través de este junto con la película de control solar y que incide sobre el vidrio 1, elevan la energía de este provocando que de igual manera se presenten los mismos mecanismos de transferencia de calor que en el vidrio 2, conducción a través del vidrio, convección y radiación, hacia el interior de la cavidad (b), formando una celda convectiva entre los vidrios 1 y 2, y de igual manera hacia el interior del prototipo. La energía transmitida a través del vidrio 2, la película de control solar y el

vidrio 1 termina incidiendo en el interior del prototipo en donde eleva la temperatura y junto con la pared semitransparente intercambian calor en forma de convección y radiación con el resto de las paredes.

2.2 Ventana de control solar

La ventana de vidrio doble evaluada consiste en dos hojas de vidrio, un vidrio claro de 6 mm de espesor y un vidrio con recubrimiento de baja emisividad (Low-e) de 6 mm, separadas por un espacio de aire de 12 mm. Las hojas de vidrio se unen por un separador de aluminio con aislante y selladas en toda la periferia. Las propiedades ópticas del vidrio utilizados se muestran en la Figura 5. Las dimensiones de la ventana son de 0.80 x 0.80 x 0.024 m.

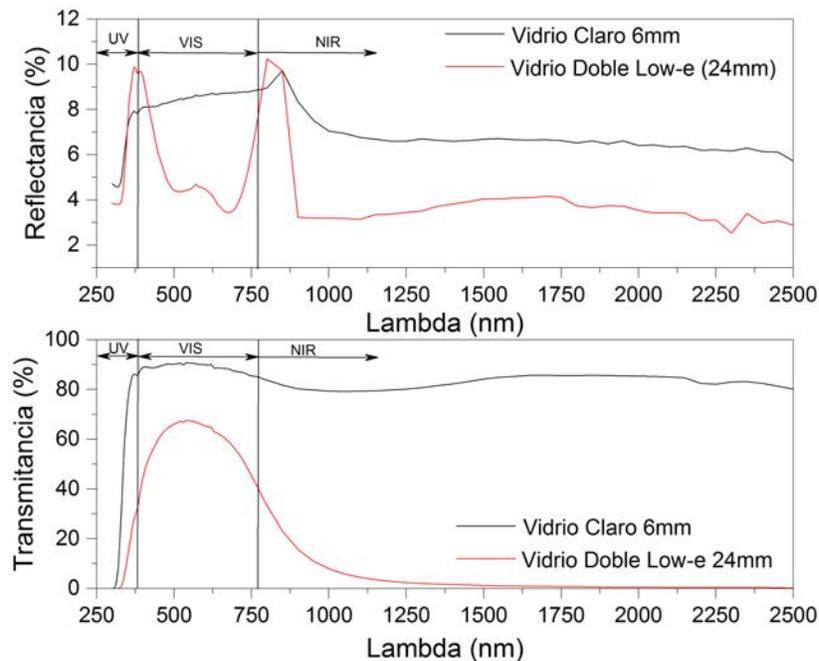


Figura 5. Propiedades ópticas del vidrio claro de 6 mm y del vidrio con película Low-e (Aguilar et al, 2015)

2.3 Diseño y construcción del prototipo experimental

Para diseñar las partes que conforman el prototipo o celda experimental se utilizó el software *Solidworks*, un software CAD (*Computer-aided drafting*) para modelado mecánico en 3D, el cual permite modelar virtualmente piezas y conjuntos y extraer de

estos sus planos técnicos e información relevante sobre el ensamble a producir (Figura 6).



Figura 6. Modelo CAD del evaluador térmico

El prototipo tiene una medida total de 0.95 X 0.95 X 0.95 m con una abertura única de 0.80 x 0.80 m, espacio designado para la instalación de la ventana. Las partes significativas son las paredes rígidas, el aislamiento térmico en todas las paredes y el contenedor agua en el fondo (Figura 7). Se modeló pieza por pieza tomando como material principal el *OSB (Oriented Strand Board)*, el cual es un producto derivado de la madera de concepción técnica avanzada y está elaborado a partir de virutas unidas mediante un adhesivo sintético, este tiene una conductividad térmica de 0.13 W/m.K para una densidad media de 650 kg/m³ y el *FOAMULAR®* de 1 pulgada, el cual es un aislamiento térmico de espuma rígida de poliestireno extruido en paneles manufacturados por el proceso Hydrovac con una conductividad térmica de 0.028 W/m.K a 25°C. Las principales consideraciones para el diseño del modelo CAD, fue el grosor del panel, el ancho y el alto, que fueron de 2.4 x 1.2 x 0.0238 m para el OSB y 2.4 x 1.2 x 0.0254 m para el FOAMULAR®, se decidió usar este por las propiedades que presenta, además de la versatilidad al trabajar el material y por el precio relativamente económico en comparación con otro tipo de materiales termoaislantes.

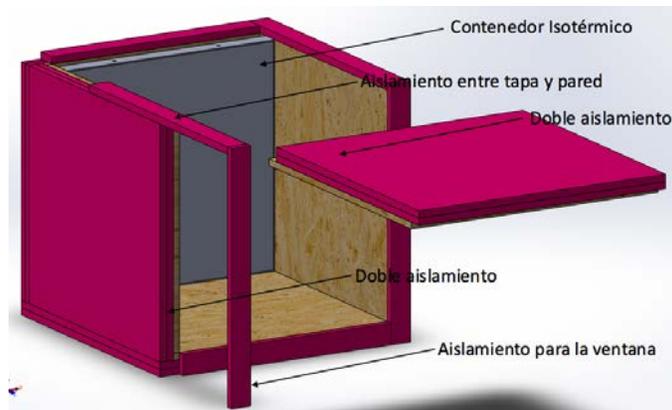


Figura 7. Partes del prototipo

El modelo CAD fue diseñado basado en las medidas de la ventana, dejando un espacio cubico en el interior de 0.8 x 0.8 x 0.8 m para el análisis de transferencia de calor, el programa permite obtener la lista de partes que se utilizaron y de esta manera se obtuvieron las medidas reales y la cantidad de cada una de las partes que formaron el prototipo (Anexo 1). Se usó doble capa de FOAMULAR® para obtener el mayor aislamiento térmico posible con el exterior. Una vez obtenidas las medidas de cada pieza, se procedió a cortar los paneles de OSB y de FOAMULAR® con una sierra circular siguiendo la lista de materiales obtenida del *solidworks* (Figura 8). Esta es resumida en la Tabla 2.

Tabla 2. Partes del prototipo experimental

N.º de elemento	Descripción de la pieza	Cantidad
1	Base OSB – 0.8476 x 0.8738 x 0.0238 m	1
2	Lado OSB – 0.85 x 0.80 x 0.0238 m	2
3	Posterior OSB – 0.8476 x 0.80 x 0.0238 m	1
4	Lado FOAMULAR – 0.8738 x 0.8238 x 0.254 m	4
5	Base FOAMULAR – 0.9492 x 0.9246 x 0.0254 m	2
6	Posterior FOAMULAR – 0.9492 x 0.8238 x 0.0254 m	2
7	Almohadilla FOAMULAR – 0.9246 x 0.0746 x 0.0254 m	2
8	Almohadilla FOAMULAR – 0.80 x 0.0746 x 0.0254 m	2
9	Almohadilla FOAMULAR – 0.90 x 0.0746 x 0.0254 m	2
10	Tapa OSB – 0.9492 x 0.95 x 0.0238 m	1
11	Tapa FOAMULAR – 0.9492 x 0.95 x 0.0254 m	2

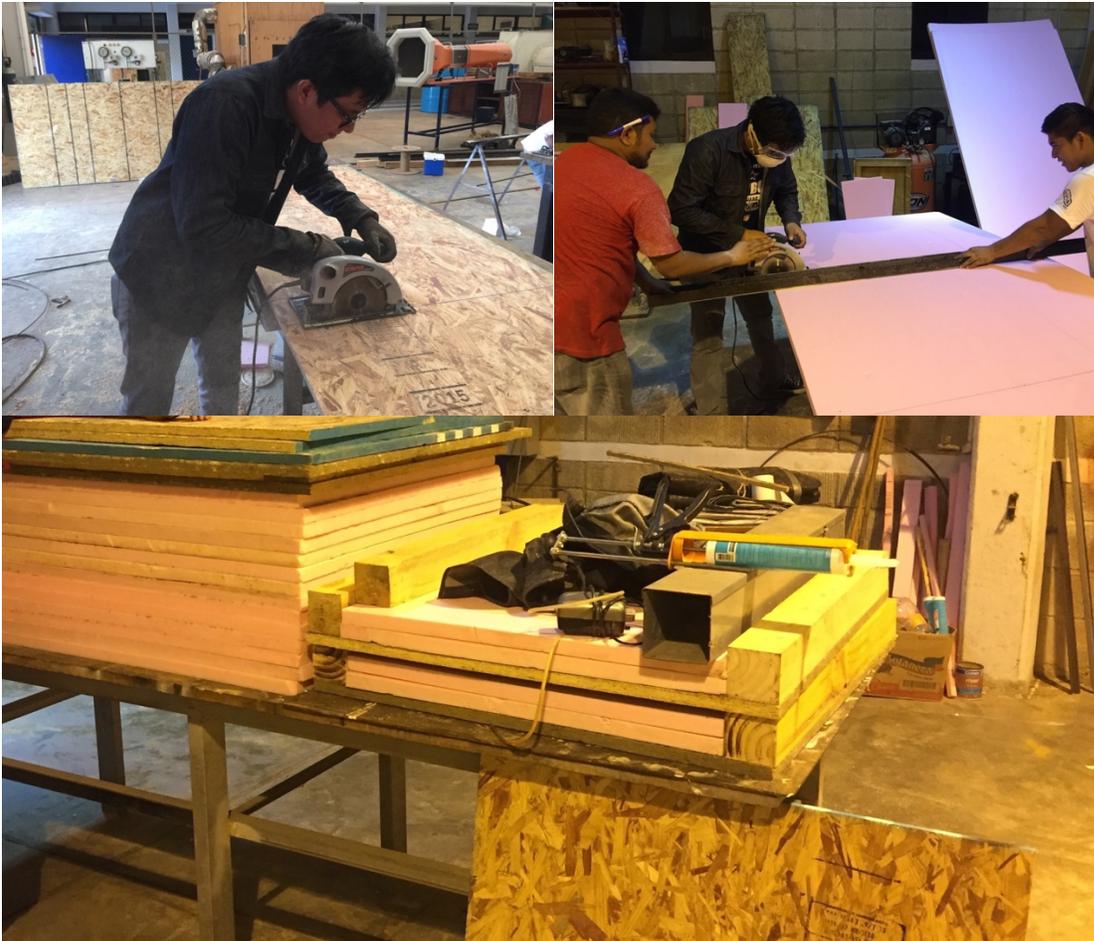


Figura 8. Corte y piezas del prototipo experimental

Con todas las partes del prototipo, se procedió a ensamblarlo usando pijas de 1" y 1 ½". Para unir el FOAMULAR® al OSB se usaron dos tipos de adhesivos, RESISTOL™ No Más Clavos® en las orillas debido a la adherencia y secado rápido de este material y silicón en las partes medias para reforzar la adhesión entre las dos piezas. Cuatro ruedas locas (Caster Wheels) fueron añadidas para facilitar la movilidad del prototipo, estas se fijaron sobre vigas de madera de 0.80 x 0.15 x 0.15 m que de igual manera fue fijada en los extremos de la base de OSB del prototipo (Figura 9).



Figura 9. Base del prototipo

El aislante en la base fue modificado para que se adapte a la distancia entre las vigas, la transferencia de calor en los extremos no se modifica debido al espesor de las mismas vigas de madera, finalmente el resto del prototipo fue armado sobre la base ya ensamblada (Figura 10).



Figura 10. Ensamble de paredes rígidas

Sobre la superficie del OSB dos paneles de FOAMULAR® fueron adheridos para obtener el mayor aislamiento térmico y que la incidencia de energía sobre la superficie de estas no afecte en la evaluación térmica de la ventana (Figura 11), entre la pared horizontal superior y las paredes verticales rígidas del prototipo se

añadieron almohadillas de termoaislante para evitar aberturas en donde pueda filtrarse calor, de igual manera se aisló el marco en donde se instalara la ventana



Figura 11. Prototipo con doble termoaislante

En el interior del prototipo se le añadieron paneles de acero inoxidable para uniformizar la temperatura interior al momento de evaluar las ventanas dobles (Figura 12), estos tienen las medidas de 0.80 x 0.80 m y están instaladas sobre la pared interior superior horizontal, la interior inferior horizontal, y las paredes interiores verticales exceptuando la del contenedor y la semitransparente(ventana).



Figura 12. Paredes forradas con paneles de acero inoxidable

Un contenedor de agua fue fabricado con paneles de aluminio de 0.80 x 0.80 x 0.006 m para controlar la temperatura en el fondo del prototipo, en esta se pretende

depositar agua y mediante una bomba sumergible para acuario circular agua enfriada a una temperatura diferente a través de un serpentín de cobre con el objetivo de que este pueda enfriar la depositada en el contenedor, para realizar esto, el agua que fue circulada se enfrió en el exterior con un chiller. Al contenedor se le adaptaron perfiles de ángulo 90° en los bordes para darle más soporte y pueda resistir el peso de la columna de agua (Figura 13).



Figura 13. Contenedor de agua para el fondo del prototipo

Como el prototipo será usado en intemperie se recubrió con Crestuco Ecológico Blanco, el cual es un recubrimiento que ayuda a impedir la filtración de agua hacia el interior del prototipo y las emisiones de polvo que pueda tener, se colocó en las esquinas del prototipo y en las uniones entre los paneles una malla especial para que el crestuco pueda adherirse apropiadamente (Figura 14).



Figura 14. Prototipo recubierto de crestuco

2.4 Instrumentación del prototipo experimental

2.4.1 Medición de variables climáticas

Para la evaluación térmica de las ventanas del prototipo se tiene que obtener valores de radiación solar, valores de temperatura en el exterior (medio ambiente) y valores de la temperatura interior. Para medir la radiación solar se utilizó la estación meteorológica de la Universidad de Quintana Roo, esta es de la marca DAVIS modelo Vantage Pro 2, el cual tiene sensores incorporados para medir dirección y velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa, lluvia, presión barométrica, entre otros.

La estación está programada para tomar mediciones cada 10 minutos de las variables climatológicas, con estos, se realizó un compendio de los valores de temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar desde el año 2012 hasta el 2016 para visualizar el comportamiento a través de los años de las variables climatológicas que impactan directamente al experimento, de estos se obtuvo el promedio diario y mensual por cada fenómeno (Figura 15).

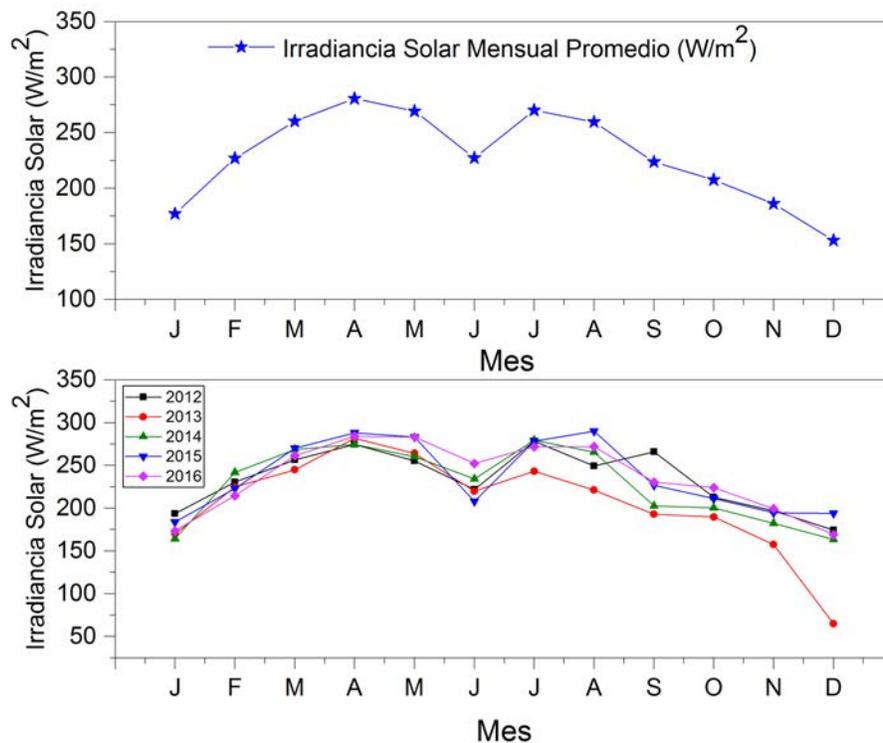


Figura 15. Irradiancia solar mensual promedio

2.4.2 Instrumentación para la medición de la temperatura interior

Para medir la temperatura interior se usaron termopares, estos son del tipo T de la marca Omega, TT-T-30⁺⁺, los alambres son de cobre y de constantán, pueden medir temperaturas entre los -200 – 150 °C. Para la fabricación del termopar se usó un transformador de tensión variable, variac, para crear un corto eléctrico en las puntas de los metales y de esta manera fundirlos (Figura 16).

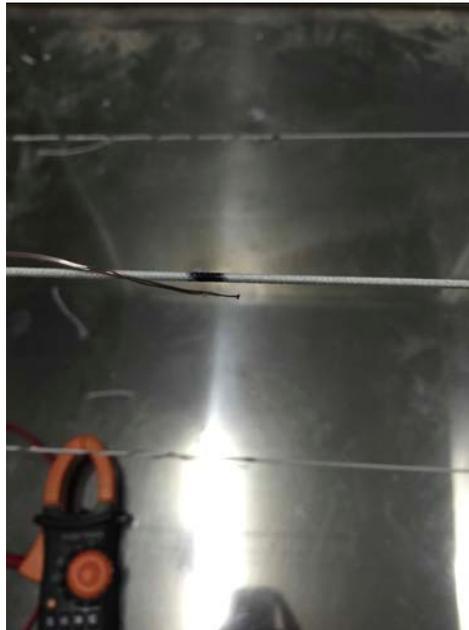


Figura 16. Termopar.

Los termopares fueron colocados de tal manera que puedan ser capaces de medir los efectos que se producen en el interior del prototipo en el uso de las diferentes ventanas, por lo tanto 9 termopares fueron instalados en una matriz de 3 x 3 en el centro del prototipo y perpendicular a la ventana (Figura 17).

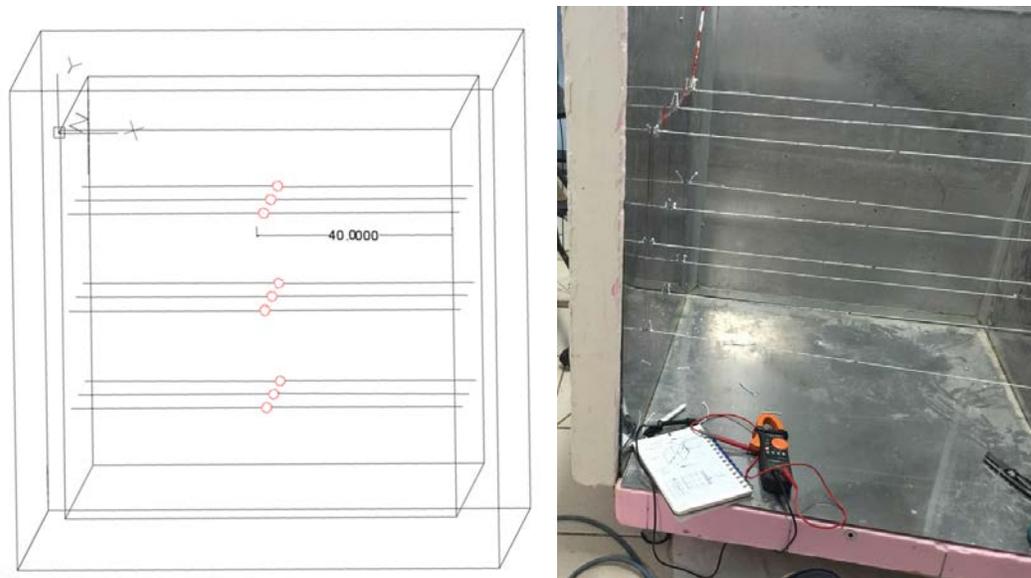


Figura 17. Disposición de termopares en el interior del prototipo

El objetivo de la matriz es poder determinar el cálculo de la transferencia de calor que se presente en el interior del prototipo el cual se manifiesta en el volumen de aire almacenado en este (Figura 18).

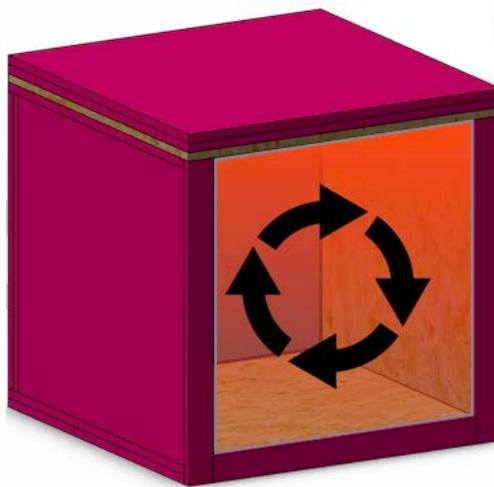


Figura 18. Calor en el aire almacenado en el interior

La siguiente expresión es la que será utilizada para el cálculo, en donde ρ_{air} es la densidad del aire, $C_{p_{\text{air}}}$ el calor específico de este, V el volumen de aire dentro del prototipo ($0.8 \times 0.8 \times 0.8$) y $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ la diferencia de temperatura con respecto al tiempo (Temperatura en Hora actual menos la temperatura en la hora anterior).

$$Q_{tot} = \rho_{air} C_{p_{air}} V \frac{\Delta T}{\Delta t} [W] \quad \text{Eq.1}$$

2.4.3 Instrumentación para la medición del flujo de calor al interior

Se tomó la medición en las paredes del prototipo para observar cómo manifiesta el flujo de calor a través de ellas, para esto se fabricaron termopilas las cuales consisten en termopares unidos en serie y estos tienen dos tipos de uniones, la unión de medición, que son los termopares que medirán la temperatura en el interior del prototipo experimental, y la unión de referencia que son los termopares opuestos a los de medición (figura 19).



Figura 19. Termopilas al exterior(derecha) e interior del prototipo experimental(izquierda).

El funcionamiento de los termopares se caracteriza por producir un pequeño valor de tensión en función de la temperatura, este se transforma mediante ecuaciones en un valor de temperatura, las termopilas realizan la misma función, como está formada de varios termopares, la tensión total en la salida de la termopila será la suma de la tensión en cada unión de medición menos la suma de la de cada unión de referencia (Figura 20).

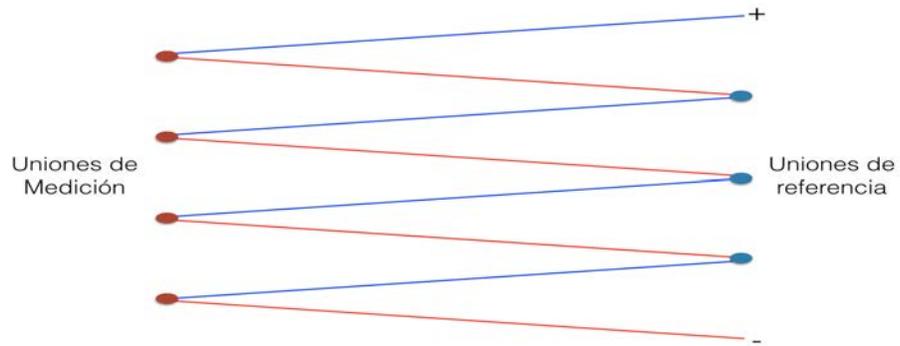


Figura 20. Conexión en serie de termopares.

Por la forma en la que fue colocada la termopila, unión de medición al interior y unión de referencia al exterior, esta proporciona la diferencia de temperatura que existe entre la superficie interior de la pared del prototipo y la exterior.

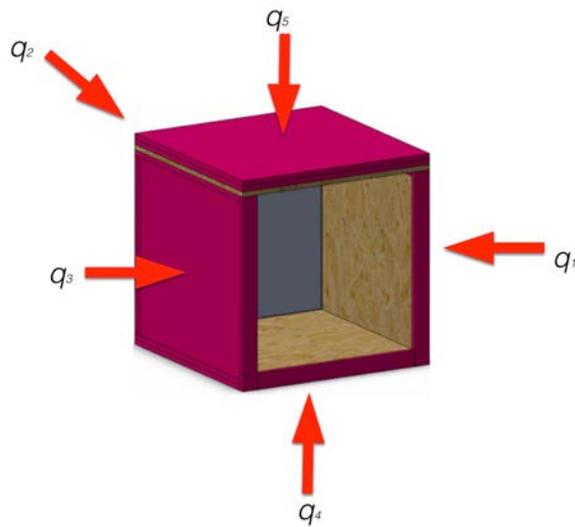


Figura 21. Transferencia de calor a través de las paredes

Para determinar la transferencia de calor a través de las 5 paredes (Figura 21) se utilizó la expresión de Fourier (Bergman, et al, 2011):

$$Q_{wall} = AK \frac{\Delta T}{dx} \quad \text{Eq.2}$$

En donde Q es la transferencia de calor por conducción y está dado en Watts, K es la conductividad térmica del material en $W/m.K$, ΔT la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior y dx es el espesor del material dado en m. Debido a que las paredes el prototipo están formadas por diferentes tipos de material la ecuación

resultante es la siguiente, teniendo en cuenta el espesor y la conductividad térmica por cada tipo de material:

$$Q_{wall} = \frac{\Delta T}{\frac{dx_m}{Ak_m} + \frac{dx_f}{Ak_f} + \frac{dx_c}{Ak_c}} \quad \text{Eq.3}$$

Los subíndices indican (m-madera OSB, f-foamular y c-crestuco) los materiales con los que está compuesta la pared de la cavidad.

La posición de los termopares y termopilas del prototipo en el sistema de adquisición de datos se encuentra en el Anexo 4.

2.4.4 Sistema de control del enfriador de agua(Chiller)

Para controlar la temperatura del agua que será circulada a través del contenedor se diseñó, programó y construyó un dispositivo controlador de temperatura, está implementado con el microcontrolador *Atmega328p* de *Atmel*, se eligió por la compatibilidad con el IDE, *Integrated Development Enviroment*, de Arduino para ser programado (Anexo 2) y configurado bajo la misma estructura (Figura 22).

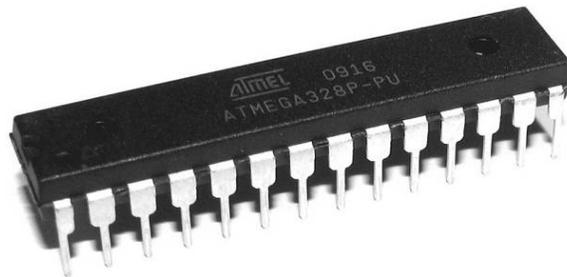


Figura 22. Atmega328p.

El dispositivo se construyó de forma modular con el propósito de mejorarlo, sin embargo, la placa base contiene un driver de control AD595 de *Analog Devices* el cual es un amplificador monolítico para termopares con compensador de unión en frío (Figura 23), esto le permite al driver combinar un punto de congelamiento de referencia y un amplificador pre calibrado para producir una salida de alto nivel (10 mV/°C) directamente de la señal de un termopar (Analog Devices, 1999), este driver esta calibrado para termopares tipo J o K pero debido a la semejanza de la fuerza

electromotriz térmica entre el termopar tipo K y el T puede ser usado con los tres, la ecuación de conversión que utiliza es la siguiente:

$$AD595 \text{ output: } (Type K \text{ Voltage} + 16 \mu V) * 247 \quad \text{Eq.4}$$

El rango de igualdad entre el K y el T esta entre 0 °C a +50 °C, fuera de este rango se necesitaría volver a calcular el valor de conversión de la señal de salida tomando la tabla de valores de temperatura de la hoja de datos del fabricante, sin embargo el error que puede presentar no varía más 0.2 °C.

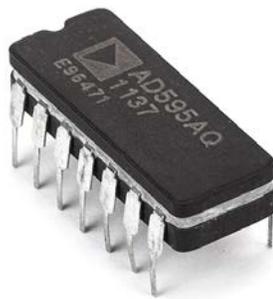


Figura 23. AD595.

Con el *Arduino IDE* se programó el microcontrolador para que procesara en grados centígrados la información obtenida del AD595, de igual manera se incluyó la programación de la interfaz del usuario que está formada por una pantalla de cristal líquido(LCD) de 16 x 2, 2 filas de 16 caracteres, para la visualización del proceso de control, temperatura sensada y temperatura programada, la manipulación de la temperatura programada se realiza mediante una resistencia variable (Figura 24).

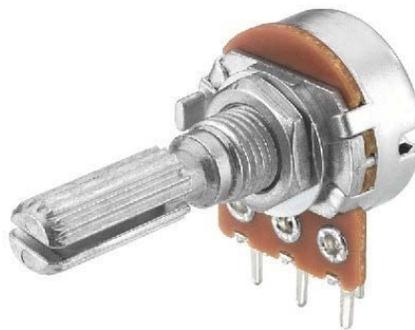


Figura 24. LCD 16 x 2 (superior) y resistencia variable (inferior).

Para la salida de control se utilizó un módulo que consiste en un transistor TIP3055 (Figura 25) con led indicador de encendido y apagado, este se utilizó porque el compresor del chiller está controlado mediante un relevador de 12VDC, volts de corriente directa, no se incluyó del módulo de salida dentro de la placa base tomando en cuenta los diversos tipos de controladores a los que tuviera que adaptarse el dispositivo de control.



Figura 25. Transistor TIP3055.

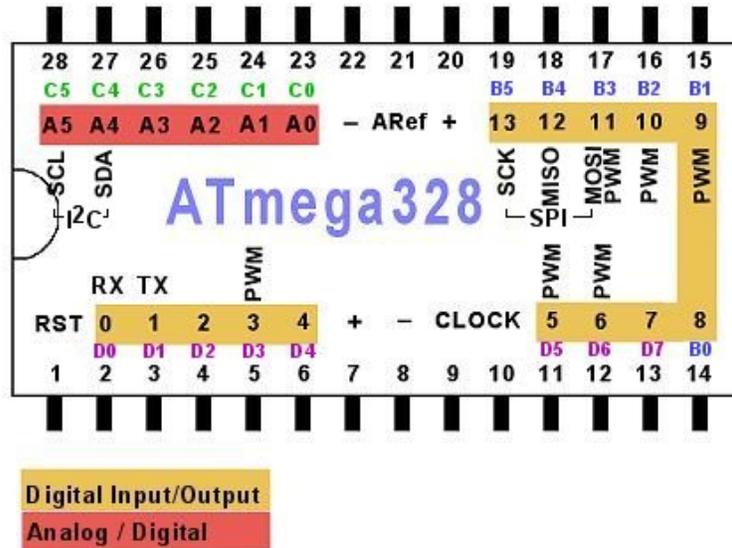


Figura 27. Distribución de terminales del Atmega328p.

De igual manera se obtuvo la configuración de puertos del AD595 de la hoja de datos del fabricante (Figura 28) junto con el circuito de conexión básica (Figura 29), el puerto 11 es utilizado para la alimentación para esta aplicación se utilizó 5 VDC, los puertos 7, 4, 1 y 13 son para el voltaje diferencial, en este caso 0 VDC, los puertos 9 y 8 fueron unidos para obtener la señal de salida, el puerto 14 es la entrada menos del termopar y el 1 la entrada más.

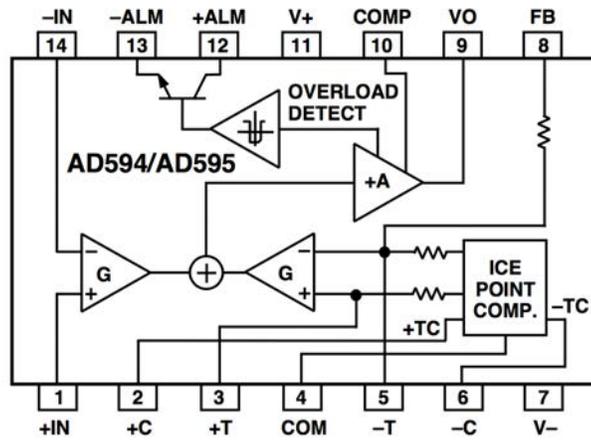


Figura 28. Distribución de terminales del AD595.

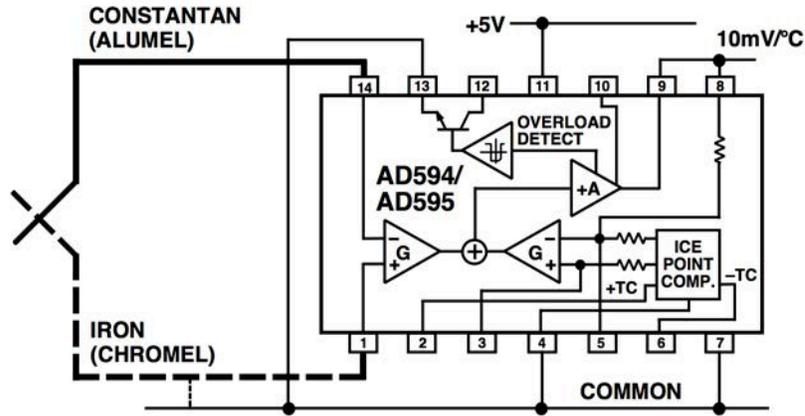


Figura 29. AD595, circuito de conexión básica.

La pantalla LCD, de igual manera, cuenta con una configuración predeterminada de sus puertos de conexión (Figura 30), para este sistema solo fue utilizada su modalidad de solo lectura por lo cual el puerto R/W fue conectado a 0 VDC junto con GND y K, VCC y A fueron conectados a 5 VDC, Vo está conectado a una resistencia variable de 5 K Ω con el propósito de variar el contraste de la pantalla, D0 a D3 no se conectan, D4 a D7 son conectados al microcontrolador junto con RS y E.

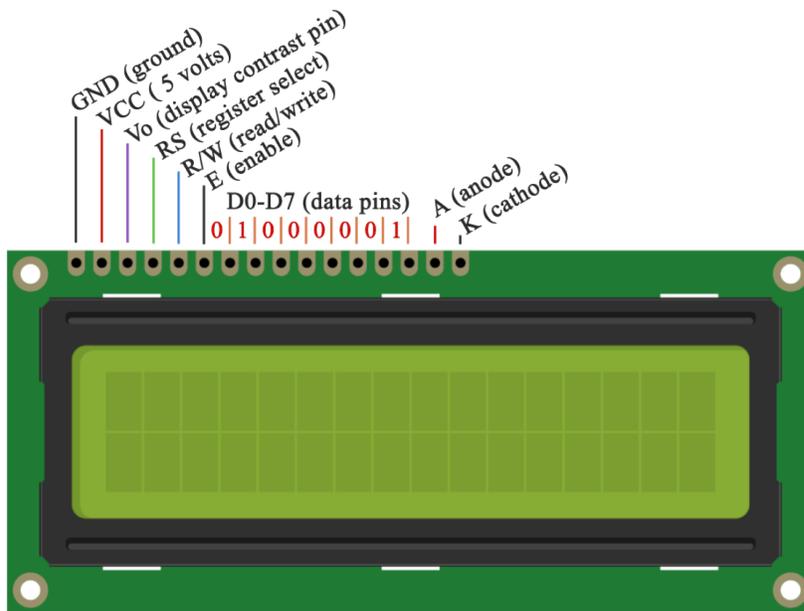


Figura 30. LCD 16 x 2, Pin-out.

Teniendo en cuenta la configuración de los elementos del circuito y el programa escrito para el microcontrolador (Anexo 1), se diseñó el PCB, printed circuit board, que incorpora todos los elementos de la placa base (Figura 31), así como el del

controlador de salida (Figura 32), todos los puertos del microcontrolador fueron impresos para poder utilizarse inmediatamente añadiéndole módulos o mejorándolos. Con todos los elementos del circuito incorporados a sus respectivas placas se conectó el alimentador y el termopar para comprobar que todo funcione adecuadamente (Figura 33) y finalmente introducir el circuito en alguna carcasa contenedora para su funcionamiento en intemperie.

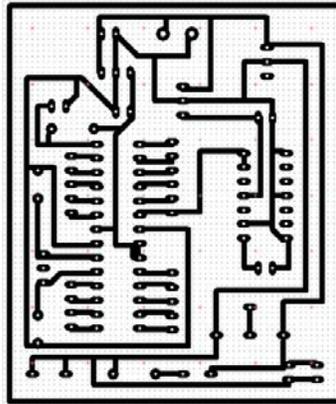


Figura 31. Placa Base

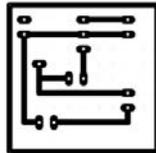


Figura 32. Módulo de salida

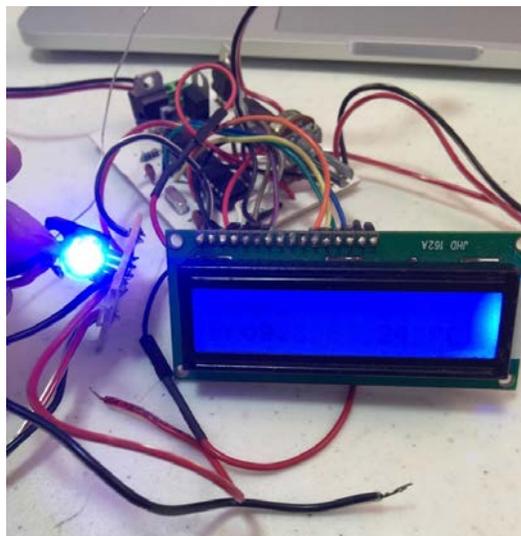


Figura 33. Circuito con elementos incorporados en funcionamiento

Capítulo 3. Caracterización

Cada elemento de medición que fue integrado al prototipo fue calibrado individualmente, la integración de todos los elementos al sistema fue calibrado obteniendo el coeficiente global de transferencia de calor (factor U), para un vidrio claro simple de 6 mm de espesor.

3.1 Caracterización de termopares y termopilas

Los termopares que se emplearon son alta pureza, debido a esta característica en la calibración presentaron resultados mejor aproximados a la temperatura medida que el termopar de referencia (Tabla 3), en una medición en puntos distribuidos entre los 0 °C y los 100 °C. La temperatura fue variada entre 0 - 25 °C con apoyo de hielo y agua fría, de 30 – 100 °C con apoyo de un horno seco de la marca Fluke, modelo 9100S, el cual tiene la capacidad de medir hasta 375 °C con una exactitud de $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ a 50 y 100 °C y ± 0.5 a 375 °C.



Figura 34. Horno Seco Fluke 9100S

Tabla 3. Calibración de termopares

Temperatura	Termopar	Referencia	
0	°C	0.1	0.0
14	°C	14.6	14.5
21	°C	21.5	21.5
30	°C	30.5	30.5
40	°C	40.4	40.5
50	°C	50.4	50.7
60	°C	60.3	60.6
70	°C	70.3	70.8
80	°C	80.3	80.8
90	°C	90.4	91.2
100	°C	100.4	101.3

Todos los termopares mostraron resultados similares, la longitud no determinó la exactitud de los mismos pues se evaluaron termopares de 1 m de longitud, de 2 y 3 m al igual que los termopares cortos los largos mostraron mejores resultados que el de referencia. Las termopilas se fabricaron con el mismo alambre con el que fueron fabricados los termopares, para comprobar que estas estén midiendo adecuadamente se instaló un termopar calibrado en el centro de cada pared para poder tener una referencia sobre la diferencia de temperatura, la diferencia de temperatura se obtuvo mediante un formulario hecho en una hoja de datos con un polinomio proporcionado por el fabricante del alambre para termopar, Omega. La Tabla 4 contiene una parte de uno de los formularios de las termopilas, en donde $E(V)$ es la tensión de la termopila en volts, $E(\mu V)$ es la tensión promedio en microvolts, ΔT °C es la diferencia de temperatura proporcionada por la termopila, T_{ext} y T_{int} son los valores de temperatura al exterior e interior en grados centígrados.

Tabla 4. Formulario para termopilas.

Numero de puntas de la termopila:			6		
time (s)	E(V)	E (μV)	ΔT °C	T_{ext}	T_{int}
10:00	-0.0025	-423.80	-11.13	42.77	30.41
10:10	-0.0026	-437.35	-11.49	43.15	30.82
10:20	-0.0026	-448.18	-11.78	43.73	31.41
10:30	-0.0028	-481.41	-12 .66	45.52	31.84
10:40	-0.0028	-475.34	-12 .09	45.73	31.98
10:50	-0.0026	-446.21	-11 .72	46.35	31.90
11:00	-0.0025	-428.91	-11 .26	46.26	32.43
11:10	-0.0024	-408.35	-10 .72	44.12	32.53
11:20	-0.0023	-393.53	-10 .32	43.74	32.47
11:30	-0.0023	-398.23	-10 .45	44.73	32.57
11:40	-0.0023	-393.86	-10 .33	45.42	32.91
11:50	-0.0020	-340.45	-8 .92	44.13	33.25
12:00	-0.0021	-360.07	-9 .43	44.66	33.40

La temperatura que proporcionaron los termopares centrales de la pared muestran la diferencia de temperatura en un punto, la diferencia de temperatura que muestra la termopila es el diferencial del promedio de toda la pared exterior con respecto a la interior, lo cual explica la pequeña diferencia en el delta de temperatura obtenido con la termopila con respecto a la diferencia de las temperaturas en el centro de las

paredes. El delta, diferencial, de temperatura se calculó con el polinomio que proporciono el fabricante, el cual es el siguiente:

$$t_{90} = C_0 + C_1E + C_2E^2 + \dots C_iE^i \quad \text{Eq.5}$$

Donde la temperatura t_{90} está calculada en función de un voltaje termoeléctrico E dado en microvolts y C el coeficiente respectivo proporcionado por el fabricante (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficientes para el polinomio del termopar

Temperature Range	-200 to 0 °C	0 to 400 °C
Voltage: Range:	-5,603 to 0 μV	0 to 20,872 μV
C0	0.000 000 0...	0.000 000
C1	2.594 919 2 x 10 ⁻²	2.592 800 x 10 ⁻²
C2	-2.131 696 7 x 10 ⁻⁷	-7.602 961 x 10 ⁻⁷
C3	7.901 869 2 x 10 ⁻¹⁰	4.637 791 x 10 ⁻¹¹
C4	4.252 777 7 x 10 ⁻¹³	-2.165 394 x 10 ⁻¹⁵
C5	1.330 447 3 x 10 ⁻¹⁶	6.048 144 x 10 ⁻²⁰
C6	2.024 144 6 x 10 ⁻²⁰	-7.293 422 x 10 ⁻²⁵
C7	1.266 817 1 x 10 ⁻²⁴	
Error Range:	0.04 to -0.02°C	0.03 to -0.03°C

El polinomio proporciona el valor de temperatura con respecto al voltaje de un solo termopar, por esta razón en la hoja de datos fue adaptado para proporcionar el valor promedio de una termopila, dividiendo el voltaje total entre el número de uniones de medición que esta tiene (Figura 35).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Numero de puntas de la termopila:											
2	time (s)	E (mV)	E (µC)	t ₉₀ (°C)	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	
3	2016-08-30 09:11:03.717	2.5549	283.8737	7.3001	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
4	2016-08-30 09:12:03.728	0.0001	0.0155	0.0004	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
5	2016-08-30 09:13:03.736	0.0001	0.0143	0.0004	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
6	2016-08-30 09:14:03.744	0.0001	0.0137	0.0004	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
7	2016-08-30 09:15:03.702	0.0001	0.0139	0.0004	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
8	2016-08-30 09:16:03.710	0.0001	0.0130	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
9	2016-08-30 09:17:03.720	0.0001	0.0129	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
10	2016-08-30 09:18:03.729	0.0001	0.0124	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
11	2016-08-30 09:19:03.737	0.0001	0.0127	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
12	2016-08-30 09:20:03.7	0.0001	0.0132	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
13	2016-08-30 09:21:03.702	0.0001	0.0130	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
14	2016-08-30 09:22:03.712	0.0001	0.0130	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
15	2016-08-30 09:23:03.720	0.0001	0.0126	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
16	2016-08-30 09:24:03.728	0.0001	0.0118	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	
17	2016-08-30 09:25:03.737	0.0001	0.0117	0.0003	0	2.592800E-02	-7.602961E-07	4.637791E-11	-2.165394E-15	6.048144E-20	-7.293422E-25	

Figura 35. Toma de pantalla del formulario para termopilas

3.2 Caracterización del dispositivo de control de temperatura

El AD595 está calibrado para entregar 10 mV(millivolts) por cada grado centígrado, el valor de tensión eléctrica es introducido al microcontrolador donde se obtiene la temperatura mediante la siguiente función:

$$T = \frac{5 \cdot V}{1023} * 100 \quad \text{Eq.6}$$

En donde V es el valor obtenido a través del puerto analógico del microcontrolador, el cual varía entre 0 y 1023 debido a la resolución de 10 bits, estos leen valores de tensión entre 0 y 5 volts tomando como 1023 los 5 volts.

La temperatura fue obtenida mediante un termopar tipo T de la misma calidad y fue comparada con el valor obtenido por los termopares conectados al adquisidor de datos obteniendo resultados que fueron muy aproximados con diferencia no mayor a 0.5 °C, el controlador fue programado para obtener valores enteros en la temperatura por lo tanto el valor obtenido lo redondea al entero superior (Figura 36).



Figura 36. Temperatura ambiente obtenida con ambos dispositivos

3.3 Caracterización del prototipo

Para determinar el correcto funcionamiento del prototipo se realizó una medición de 24 horas para el día 27-28 de septiembre con un vidrio claro de 6 mm de espesor, la numeración con respecto a la distribución de la matriz de termopares se muestra en la figura 37 (Anexo 4) y en la tabla 6 las mediciones puntuales y la temperatura promedio por cada hora.

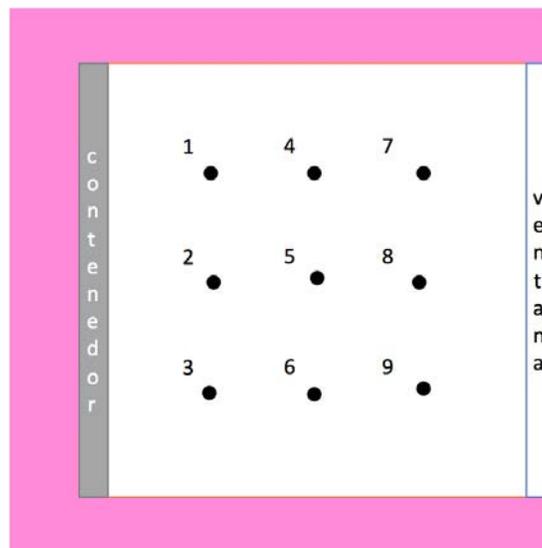


Figura 37. Numeración de termopares de la matriz

Tabla 6. Temperatura promedio en el interior del prototipo

Time(h)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	T ₅ (°C)	T ₆ (°C)	T ₇ (°C)	T ₈ (°C)	T ₉ (°C)	T _{prom} (°C)
15:00	37.19	37.05	36.69	37.15	37.10	37.17	37.60	37.24	37.20	37.15
16:00	35.97	35.72	35.52	36.05	35.85	35.88	36.31	35.97	35.91	35.91
17:00	34.35	34.14	34.00	34.44	34.26	34.32	34.62	34.34	34.33	34.31
18:00	32.48	32.33	32.20	32.63	32.50	32.48	32.65	32.54	32.48	32.47
19:00	30.87	30.55	30.44	30.95	30.67	30.62	30.85	30.75	30.52	30.69
20:00	29.58	29.30	29.16	29.65	29.42	29.32	29.54	29.43	29.22	29.40
21:00	28.54	28.32	28.19	28.58	28.42	28.32	28.50	28.35	28.20	28.38
22:00	27.68	27.52	27.38	27.74	27.62	27.52	27.68	27.57	27.41	27.57
23:00	26.91	26.77	26.64	26.99	26.88	26.79	26.95	26.82	26.67	26.82
0:00	26.14	26.02	25.89	26.21	26.11	26.04	26.18	26.05	25.94	26.07
1:00	25.53	25.40	25.29	25.58	25.51	25.44	25.55	25.45	25.32	25.45
2:00	24.92	24.86	24.72	24.97	24.93	24.87	24.95	24.88	24.78	24.87
3:00	24.71	24.66	24.55	24.81	24.74	24.71	24.78	24.70	24.59	24.69
4:00	24.88	24.84	24.74	24.92	24.91	24.90	24.93	24.93	24.88	24.88
5:00	24.92	24.90	24.83	24.94	24.98	25.00	24.98	24.98	24.87	24.93
6:00	24.92	24.93	24.84	24.97	25.03	25.06	24.96	24.93	24.82	24.94
7:00	25.37	25.43	25.42	25.44	25.51	25.55	25.53	25.53	25.59	25.49
8:00	31.19	31.59	31.46	31.43	31.44	31.38	32.58	32.23	32.40	31.75
9:00	36.46	36.71	36.34	36.62	36.56	36.89	37.27	38.31	38.62	37.08
10:00	41.92	41.73	40.99	41.73	41.83	41.92	41.94	43.47	44.97	42.28
11:00	43.42	43.21	42.36	43.62	43.20	43.33	43.64	44.22	45.02	43.56
12:00	41.07	41.11	40.90	41.45	41.49	41.37	41.77	41.75	42.52	41.49
13:00	40.06	40.20	40.10	40.59	40.49	40.42	40.76	40.77	40.67	40.45
14:00	40.65	40.81	40.60	40.98	40.98	41.14	41.51	41.14	41.14	40.99
15:00	39.39	39.46	39.23	39.80	39.59	39.62	40.17	39.88	39.63	39.64

Aplicando la ecuación 1 con los datos de temperatura mostrados en la Tabla 1, es posible calcular el flujo de calor al interior de la habitación durante un día de mediciones. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 7. Flujo de calor al interior

Time	$T_{prom}(^{\circ}C)$	$Q_{tot}(W)$
15:00	37.15	
16:00	35.91	-747.08
17:00	34.31	-957.78
18:00	32.47	-1102.54
19:00	30.69	-1069.92
20:00	29.40	-773.44
21:00	28.38	-613.60
22:00	27.57	-486.88
23:00	26.82	-446.12
0:00	26.07	-455.62
1:00	25.45	-368.07
2:00	24.87	-346.32
3:00	24.69	-109.19
4:00	24.88	113.10
5:00	24.93	30.66
6:00	24.94	4.07
7:00	25.49	327.65
8:00	31.75	3756.08
9:00	37.08	3203.45
10:00	42.28	3115.93
11:00	43.56	767.05
12:00	41.49	-1238.21
13:00	40.45	-624.34
14:00	40.99	324.44
15:00	39.64	-810.11
	Integral	2271.62[Wh]

De igual manera, aplicando la ecuación 3 a la medición de la diferencia de temperatura entre las superficies externa e interna de las paredes, se calculó el flujo de calor a través de estas (Tabla 8). De acuerdo a la nomenclatura utilizada, los valores positivos indican que el flujo de calor se dirige al interior de la cavidad, por tanto, signos negativos indican que el calor sale de la cavidad.

Tabla 8. Flujo de calor en paredes

Time	Q ₁ [W]	Q ₂ [W]	Q ₃ [W]	Q ₄ [W]	Q ₅ [W]	Q _{wall} [W]
15:00	-0.66	2.42	0.87	-0.87	0.99	2.75
16:00	-0.86	1.96	-0.44	-0.96	-0.71	-1.02
17:00	-0.85	1.47	-0.56	-0.87	-1.11	-1.91
18:00	-1.10	0.94	-0.55	-1.06	-1.41	-3.17
19:00	-0.29	0.97	-0.03	-0.45	-0.18	0.02
20:00	-0.01	1.12	0.09	-0.17	-0.01	1.03
21:00	0.04	1.29	0.13	-0.09	0.07	1.46
22:00	-0.13	0.94	0.06	-0.16	-0.15	0.57
23:00	-0.18	0.74	0.00	-0.22	-0.26	0.07
0:00	-0.12	0.73	-0.03	-0.15	-0.20	0.24
1:00	-0.08	0.68	0.02	-0.11	-0.14	0.36
2:00	-0.06	0.63	0.03	-0.08	-0.09	0.42
3:00	-0.03	0.62	0.10	-0.03	-0.04	0.62
4:00	0.02	0.62	0.13	0.02	0.03	0.82
5:00	0.07	0.64	0.15	0.07	0.09	1.02
6:00	0.09	0.64	0.15	0.11	0.11	1.11
7:00	0.07	0.57	0.11	0.01	0.17	0.93
8:00	0.65	1.04	-0.75	-0.59	1.32	1.67
9:00	0.13	1.51	-0.52	-0.67	0.64	1.11
10:00	-0.11	1.86	-0.56	-0.99	0.62	0.83
11:00	-0.22	2.56	-0.16	-1.54	1.41	2.04
12:00	-0.48	2.87	0.18	-1.62	1.79	2.73
13:00	-1.40	2.74	0.24	-1.56	1.27	1.30
14:00	-1.13	2.19	-0.38	-1.38	-0.28	-0.98
				Integral		13.11[Wh]

Una vez calculado el flujo de calor a través de paredes y el total que entra a la habitación, se calcula el flujo de calor a través de la ventana. La tabla 9 muestra los resultados.

Tabla 9. Flujo de calor total, a través de las paredes y por la ventana a lo largo del día

Time	Q _{tot} [W]	Q _{walls} [W]	Q _{window} [W]
15:00	-746.96	2.75	-749.71
16:00	-958.22	-1.02	-957.20
17:00	-1101.90	-1.91	-1099.99
18:00	-1070.37	-3.17	-1067.20
19:00	-773.42	0.02	-773.44
20:00	-613.32	1.03	-614.34
21:00	-486.76	1.46	-488.22
22:00	-446.71	0.57	-447.28
23:00	-455.30	0.07	-455.37
0:00	-368.15	0.24	-368.39
1:00	-346	0.36	-346.86
2:00	-109	0.42	-109.12
3:00	112.53	0.62	111.91
4:00	30.67	0.82	29.85
5:00	4.12	1.02	3.10
6:00	327.97	1.11	326.86
7:00	3756.12	0.93	3755.19
8:00	3203.17	1.67	3201.50
9:00	3116.23	1.11	3115.12
10:00	766.80	0.83	765.98
11:00	-1238.21	2.04	-1240.25
12:00	-624.34	2.73	-627.07
13:00	324.80	1.30	323.50
14:00	-810.87	-0.98	-809.89
Integral	2271.62 [Wh]	13.11 [Wh]	2258.51 [Wh]

El valor del flujo de calor a través de la ventana integrado a lo largo del día, es de 2258 Wh (2.2258 kWh), que es casi la totalidad del valor que se gana a través de todas las paredes de la cavidad. Es importante observar que la mayor ganancia de calor (99.43%) corresponde a la ganada a través del vidrio.

Como se instrumentó la pared de vidrio para medir las temperaturas en el interior y exterior de éste, se puede calcular el flujo de calor que entró a la habitación con la ley de Fourier (Ecuación 2). En la tabla 10 se presentan los resultados.

Tabla 10. Flujo de calor a través de la ventana

Time	T (°C)	Qwindow [W]
15:00	1.27	108.29
16:00	1.55	131.85
17:00	1.29	110.45
18:00	1.03	88.25
19:00	0.84	71.71
20:00	1.17	99.93
21:00	1.18	100.69
22:00	1.20	102.81
23:00	1.11	94.56
0:00	1.06	90.77
1:00	1.08	92.14
2:00	1.05	89.50
3:00	1.08	91.74
4:00	1.10	93.97
5:00	1.11	94.89
6:00	1.11	95.09
7:00	1.06	90.88
8:00	1.12	95.51
9:00	0.95	80.76
10:00	1.10	93.84
11:00	0.69	58.62
12:00	0.43	36.90
13:00	0.74	63.31
14:00	1.27	108.29
Integral		2076.45 [Wh]

Se puede ver de los resultados obtenidos, que hay una diferencia cercana al 8% entre los valores calculados y el valor medido directamente en la ventana, esto puede deberse a filtraciones de energía menores hacia el interior, producto de las grietas en las uniones o entre la tapa y el cuerpo. Los resultados se consideran satisfactorios para el vidrio claro de 6 mm.

Capítulo 4. Resultados

Las pruebas experimentales se realizaron bajo las condiciones climáticas de Chetumal, Quintana Roo. En esta sección se presentan los resultados de temperatura y tensión obtenidos del prototipo en un día de evaluación por ventana, dos ventanas fueron analizadas, una de vidrio claro de 0.80 x 0.80 m y 6 mm de espesor, la cual se usó como referencia, y una de doble vidrio con recubrimiento Low-e de 2.4 cm de espesor, dos paneles de 6 mm con una cavidad entre vidrios de 12 mm. El prototipo fue orientado al sur para aprovechar la incidencia solar de todo el día (Figura 38).

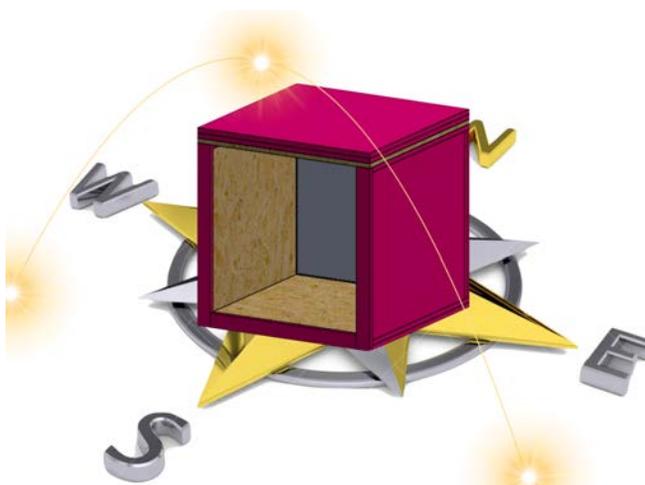


Figura 38. Orientación del prototipo y recorrido solar

Se realizaron mediciones durante dos días completos (24h). La primera medición se realizó de las 18 horas del día 02 de noviembre a las 17 horas del día 03 de noviembre. La segunda medición fue de las 19 horas del 03 de noviembre a las 18 horas del 04 de noviembre, los días fueron escogidos por el promedio de temperatura ambiente que mostraron (Figura 39). De aquí en adelante se mencionarán como día 1 y día 2, respectivamente.

En el día 1 se realizó el experimento utilizando una ventana de vidrio doble construido con un vidrio claro de 6 mm en contacto con el interior de la cavidad y un vidrio de baja emisividad de 6 mm de espesor en contacto con el exterior y en el día dos se usó la ventana de referencia. La temperatura de la pared interna, frente al vidrio, se mantuvo a una temperatura $\sim 24^{\circ}\text{C}$, aunque se tuvieron ligeras variaciones durante el día, que no excedieron de 25°C .

Las temperaturas en las paredes exteriores e interiores del prototipo son afectadas proporcionalmente tanto por la temperatura ambiente como por la radiación solar, las paredes exteriores presentaron una mayor temperatura por calentamiento en la medición del día 1, sin embargo, las temperaturas en las paredes interiores mostraron un menor calentamiento siendo la pared 4, inferior interior, la que mostró el valor de temperatura más alto en las mediciones con 39.38°C a diferencia con las mediciones del día 2 donde la pared interior que mostró la mayor temperatura fue la pared interior oeste, con 43.31°C , esto es debido a la acción de la ventana, ya que la ventana de vidrio doble provee de mayor aislamiento al flujo de energía que la ventana de vidrio claro.

El análisis realizado para ambos días es análogo al realizado en el capítulo anterior agregando la ventana de vidrio doble y sus características propias para poder determinar el flujo de calor a través de ella.

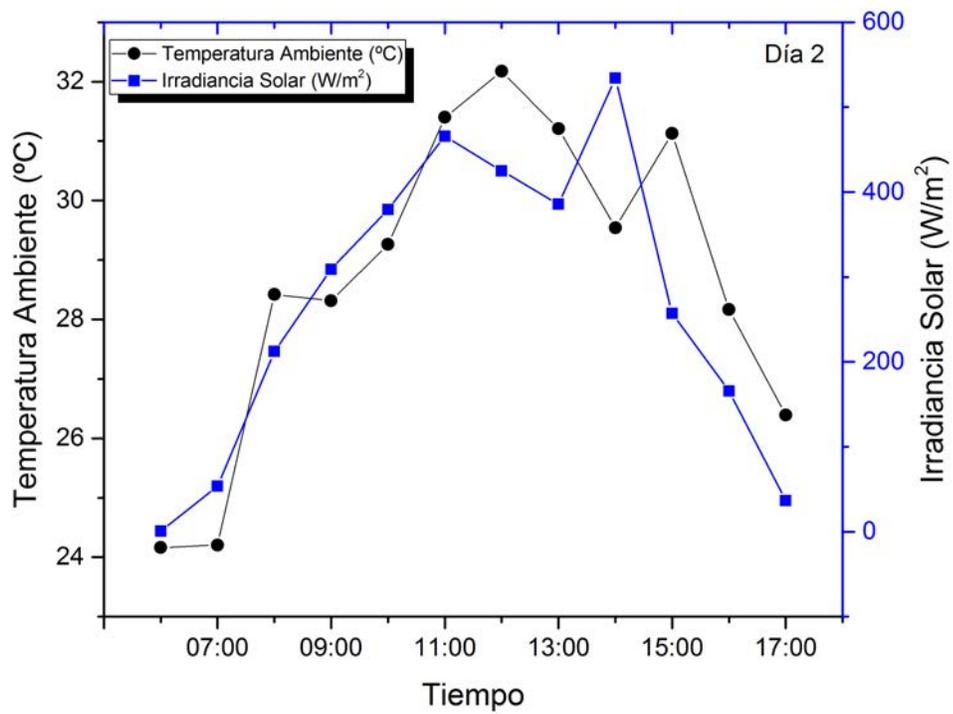
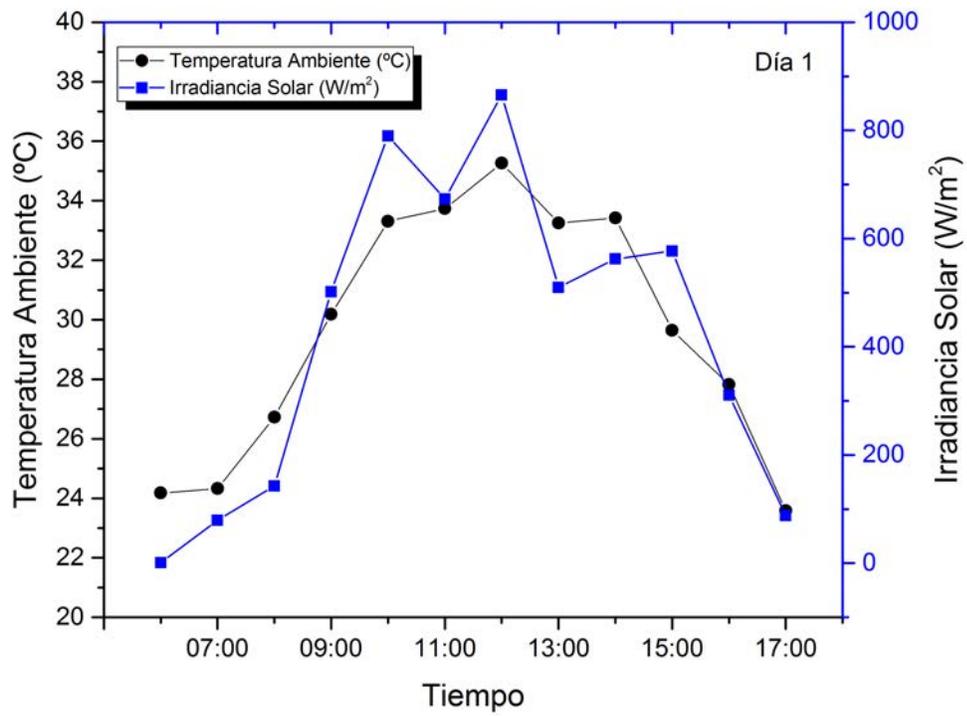


Figura 39. Radiación solar y temperatura ambiente de los días de medición.

4.1 Ventana de vidrio doble con película de control solar Low-e

En esta sección se describen los resultados obtenidos de las mediciones y el análisis de transferencia de calor al interior del prototipo con la ventana de vidrio doble instalada.

Las temperaturas que se registraron en el interior vienen descritas en la Tabla 11.

Tabla 11. Temperatura interior con la ventana de vidrio doble con recubrimiento Low-e

Time(h)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	T ₅ (°C)	T ₆ (°C)	T ₇ (°C)	T ₈ (°C)	T ₉ (°C)	T _{prom} (°C)
18:00	25.10	24.99	24.95	25.22	25.17	25.16	25.27	25.11	25.12	25.12
19:00	24.94	24.86	24.83	25.03	25.00	25.02	25.07	24.94	24.93	24.96
20:00	24.80	24.74	24.69	24.87	24.84	24.88	24.89	24.81	24.77	24.81
21:00	24.61	24.57	24.53	24.70	24.68	24.73	24.72	24.65	24.62	24.65
22:00	24.56	24.54	24.49	24.62	24.63	24.66	24.64	24.60	24.57	24.59
23:00	24.44	24.42	24.40	24.52	24.54	24.58	24.56	24.52	24.50	24.50
0:00	24.39	24.39	24.34	24.47	24.50	24.53	24.51	24.47	24.46	24.45
1:00	24.33	24.31	24.26	24.38	24.39	24.41	24.39	24.35	24.32	24.35
2:00	24.21	24.22	24.18	24.29	24.32	24.36	24.33	24.30	24.28	24.28
3:00	24.09	24.11	24.06	24.17	24.21	24.24	24.21	24.19	24.17	24.16
4:00	24.05	24.05	24.01	24.12	24.13	24.19	24.15	24.11	24.08	24.10
5:00	23.93	23.95	23.90	24.00	24.04	24.07	24.04	24.03	23.99	24.00
6:00	23.80	23.83	23.79	23.90	23.94	23.99	23.97	23.93	23.92	23.90
7:00	23.79	23.81	23.79	23.87	23.91	23.96	23.91	23.90	23.87	23.87
8:00	24.20	24.26	24.24	24.36	24.40	24.43	24.38	24.30	24.34	24.32
9:00	25.63	25.67	26.20	25.80	25.78	25.72	25.91	25.73	25.68	25.79
10:00	30.73	31.00	30.84	30.85	31.49	32.47	32.45	32.16	31.64	31.52
11:00	32.14	32.12	31.96	32.15	32.21	33.54	32.54	33.37	32.77	32.53
12:00	33.35	33.11	32.46	33.22	33.46	33.32	33.47	34.60	33.94	33.44
13:00	32.27	31.96	31.68	32.50	32.34	32.04	32.88	32.75	32.09	32.28
14:00	31.73	31.28	30.97	31.98	31.67	31.25	32.23	31.83	31.13	31.56
15:00	30.23	29.60	29.32	30.36	29.89	29.51	30.43	29.79	29.26	29.82
16:00	28.95	28.50	28.31	29.05	28.71	28.52	29.15	28.38	28.26	28.65
17:00	25.16	24.61	24.50	25.23	24.86	24.76	25.19	24.78	24.54	24.85

Aplicando la ecuación 1, $Q_{tot} = \rho_{air} C_{p,air} V \frac{\Delta T}{\Delta t}$ [W], a los resultados de la tabla anterior se calculó el flujo de calor al interior del prototipo durante el día de medición, los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Flujo de calor al interior del prototipo con la Ventana de vidrio doble

Time(h)	$T_{prom}(^{\circ}\text{C})$	$Q_{tot}(\text{W})$
18:00	25.12	118.00
19:00	24.96	-98.00
20:00	24.81	-88.66
21:00	24.65	-98.66
22:00	24.59	-33.33
23:00	24.50	-55.33
0:00	24.45	-28.00
1:00	24.35	-61.33
2:00	24.28	-43.33
3:00	24.16	-69.33
4:00	24.10	-37.33
5:00	24.00	-62.66
6:00	23.90	-58.66
7:00	23.87	-17.33
8:00	24.32	273.32
9:00	25.79	880.63
10:00	31.52	3433.87
11:00	32.53	611.31
12:00	33.44	541.98
13:00	32.28	-694.64
14:00	31.56	-429.32
15:00	29.82	-1045.29
16:00	28.65	-703.97
17:00	24.85	-2279.91
	Integral	1034.96[Wh]

Por otra parte, la ganancia de calor a través de paredes, se calcula usando la ecuación 3, $Q_{wall} = \frac{\Delta T}{\frac{dx_m}{Ak_m} + \frac{dx_f}{Ak_f} + \frac{dx_c}{Ak_c}}$, y la diferencia de temperaturas registradas por las termopilas. La Tabla 13 muestra los flujos de calor a través de cada una de las paredes que conforman la cavidad (exceptuando la pared de vidrio).

Tabla 13. Flujo de calor por las paredes del prototipo con la Ventana de vidrio doble

Time(h)	Q ₁ [W]	Q ₂ [W]	Q ₃ [W]	Q ₄ [W]	Q ₅ [W]	Q _{wall} [W]
18:00	0.380	1.387	0.306	0.339	0.423	2.836
19:00	0.206	1.072	0.203	0.277	0.173	1.931
20:00	0.127	0.899	0.155	0.236	0.078	1.496
21:00	0.121	0.804	0.137	0.202	0.115	1.379
22:00	0.161	0.788	0.170	0.244	0.134	1.497
23:00	0.207	0.775	0.205	0.274	0.205	1.666
0:00	0.195	0.740	0.187	0.239	0.187	1.548
1:00	0.162	0.716	0.179	0.253	0.166	1.477
2:00	0.170	0.765	0.194	0.244	0.178	1.550
3:00	0.194	0.689	0.205	0.268	0.213	1.568
4:00	0.051	0.593	0.113	0.181	0.065	1.002
5:00	0.107	0.601	0.133	0.220	0.138	1.199
6:00	0.121	0.596	0.148	0.229	0.148	1.241
7:00	0.170	0.655	0.193	0.253	0.205	1.475
8:00	0.636	1.035	0.472	0.506	0.783	3.432
9:00	1.591	1.768	1.076	0.973	2.040	7.448
10:00	2.010	2.617	0.153	-0.357	4.230	8.654
11:00	1.394	3.068	0.323	-0.784	4.410	8.411
12:00	0.850	3.419	0.647	-1.102	4.422	8.236
13:00	-0.065	3.218	0.418	-1.080	1.822	4.313
14:00	-0.146	3.175	0.911	-0.715	2.280	5.506
15:00	-0.672	2.633	-0.039	-0.879	-0.429	0.614
16:00	-0.707	2.160	-0.185	-0.897	-0.480	-0.109
17:00	-1.064	1.247	-1.142	-0.836	-1.263	-3.059
					Integral	65.42[Wh]

El flujo de calor total a través de paredes, durante el día es de 65.42 Wh, de acuerdo al balance de energía, la energía total ganada por la cavidad es igual a la suma de la energía ganada (o cedida) por paredes más la energía ganada (o cedida) por la ventana de vidrio doble. Con los valores medidos de flujo de calor a través de paredes y el cálculo de la energía total ganada por la cavidad. En la Tabla 14 se presenta la ganancia de calor a través de la ventana de vidrio doble.

Tabla 14. Flujo de calor total a través de paredes y de la ventana de vidrio doble Low-e

Time(h)	$Q_{tot}(W)$	Qwall [W]	Qwindow [W]
18:00	118.00	2.836	115.16
19:00	-98.00	1.931	-99.93
20:00	-88.66	1.496	-90.16
21:00	-98.66	1.379	-100.04
22:00	-33.33	1.497	-34.83
23:00	-55.33	1.666	-57.00
0:00	-28.00	1.548	-29.55
1:00	-61.33	1.477	-62.81
2:00	-43.33	1.550	-44.88
3:00	-69.33	1.568	-70.90
4:00	-37.33	1.002	-38.33
5:00	-62.66	1.199	-63.86
6:00	-58.66	1.241	-59.91
7:00	-17.33	1.475	-18.81
8:00	273.32	3.432	269.89
9:00	880.63	7.448	873.18
10:00	3433.87	8.654	3425.21
11:00	611.31	8.411	602.90
12:00	541.98	8.236	533.74
13:00	-694.64	4.313	-698.95
14:00	-429.32	5.506	-434.82
15:00	-1045.29	0.614	-1045.91
16:00	-703.97	-0.109	-703.86
17:00	-2279.91	-3.059	-2276.85
	1034.96[Wh]	65.42[Wh]	969.54 [Wh]

La ganancia de calor a través de la ventana es un equivalente al 93.6% de la energía ganada por la cavidad, el otro 6.4% restante se gana a través de las paredes.

4.2 Ventana de vidrio claro de 6 mm

En esta sección se detallan los resultados obtenidos del análisis de las mediciones del día 2, las temperaturas que se registraron ese día vienen descritas en la tabla 15.

Tabla 15. Temperatura interior con la ventana de vidrio claro de 6 mm

Time(h)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$T_4(^{\circ}\text{C})$	$T_5(^{\circ}\text{C})$	$T_6(^{\circ}\text{C})$	$T_7(^{\circ}\text{C})$	$T_8(^{\circ}\text{C})$	$T_9(^{\circ}\text{C})$	$T_{prom}(^{\circ}\text{C})$
19:00	26.37	26.34	26.16	26.47	26.47	26.37	26.42	26.39	26.32	26.37
20:00	26.06	25.99	25.93	26.15	26.13	26.13	26.22	26.07	26.04	26.08
21:00	25.75	25.70	25.59	25.86	25.85	25.84	25.89	25.85	25.79	25.79
22:00	25.13	25.07	24.97	25.20	25.19	25.20	25.22	25.20	25.12	25.15
23:00	24.84	24.79	24.70	24.88	24.89	24.89	24.89	24.90	24.85	24.85
0:00	24.60	24.58	24.51	24.69	24.71	24.72	24.72	24.73	24.69	24.66
1:00	24.50	24.46	24.41	24.53	24.54	24.59	24.55	24.57	24.53	24.52
2:00	24.31	24.31	24.23	24.35	24.39	24.40	24.38	24.40	24.36	24.35
3:00	24.16	24.18	24.12	24.23	24.28	24.32	24.28	24.30	24.26	24.24
4:00	23.99	24.02	23.98	24.11	24.13	24.18	24.16	24.13	24.12	24.09
5:00	23.94	23.96	23.93	24.06	24.09	24.14	24.11	24.10	24.07	24.04
6:00	23.93	23.97	23.94	24.03	24.07	24.14	24.08	24.06	24.04	24.03
7:00	24.11	24.18	24.19	24.27	24.33	24.40	24.40	24.33	24.35	24.29
8:00	28.21	28.46	28.80	28.52	29.10	29.56	30.05	29.29	28.58	28.95
9:00	28.57	28.56	28.37	28.75	28.78	28.70	29.41	29.12	28.68	28.77
10:00	29.78	29.74	29.58	30.03	29.95	29.90	30.57	30.41	29.95	29.99
11:00	32.58	32.48	32.08	32.72	32.72	32.58	33.25	33.45	32.79	32.74
12:00	33.50	33.16	33.08	33.81	33.91	34.02	34.09	34.90	34.83	33.92
13:00	33.18	32.80	32.68	33.47	33.26	33.13	33.76	33.60	33.97	33.32
14:00	30.93	30.64	30.56	31.12	30.98	30.93	31.45	31.01	30.90	30.95
15:00	30.82	30.32	30.11	31.07	30.71	30.41	31.38	30.65	30.35	30.65
16:00	28.88	28.45	28.28	29.01	28.77	28.63	29.10	28.27	28.57	28.66
17:00	27.77	27.40	27.30	27.88	27.66	27.59	27.82	27.61	27.46	27.61
18:00	26.64	26.35	26.26	26.71	26.55	26.51	26.62	26.62	26.55	26.54

De igual manera, con los valores de la tabla anterior, se aplicó la ecuación 1 para determinar el flujo de calor en el interior del prototipo, los resultados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Flujo de calor al interior del prototipo con la Ventana de vidrio claro de 6 mm

Time(h)	$T_{prom}(^{\circ}\text{C})$	$Q_{tot}(\text{W})$
19:00	26.37	
20:00	26.08	-172.66
21:00	25.79	-173.33
22:00	25.15	-387.99
23:00	24.85	-177.99
0:00	24.66	-112.00
1:00	24.52	-84.66
2:00	24.35	-103.33
3:00	24.24	-66.66
4:00	24.09	-87.33
5:00	24.04	-28.00
6:00	24.03	-9.33
7:00	24.29	153.33
8:00	28.95	2800.56
9:00	28.77	-108.66
10:00	29.99	731.31
11:00	32.74	1649.27
12:00	33.92	709.97
13:00	33.32	-363.32
14:00	30.95	-1421.95
15:00	30.65	-179.99
16:00	28.66	-1190.62
17:00	27.61	-631.31
18:00	26.54	-645.31
	Integral	508.980[Wh]

A los valores de temperatura obtenidos de las termopilas se les aplica la ecuación 3 para determinar el flujo de calor a través de las paredes (Tabla 17).

Tabla 17. Flujo de calor por las paredes del prototipo con la Ventana de vidrio claro de 6 mm

Time(h)	Q ₁ [W]	Q ₂ [W]	Q ₃ [W]	Q ₄ [W]	Q ₅ [W]	Q _{wall} [W]
19:00	-0.293	0.972	-0.033	-0.452	-0.177	0.018
20:00	-0.009	1.121	0.094	-0.169	-0.010	1.026
21:00	0.045	1.295	0.134	-0.085	0.071	1.459
22:00	-0.126	0.938	0.064	-0.157	-0.153	0.566
23:00	-0.183	0.740	0.001	-0.222	-0.264	0.071
0:00	-0.122	0.733	-0.029	-0.145	-0.195	0.241
1:00	-0.085	0.676	0.017	-0.109	-0.139	0.362
2:00	-0.060	0.626	0.026	-0.078	-0.091	0.423
3:00	-0.032	0.616	0.101	-0.029	-0.041	0.615
4:00	0.017	0.623	0.129	0.023	0.030	0.823
5:00	0.069	0.641	0.154	0.069	0.087	1.020
6:00	0.094	0.644	0.154	0.105	0.110	1.107
7:00	0.069	0.570	0.111	0.012	0.166	0.929
8:00	0.651	1.037	-0.751	-0.589	1.319	1.667
9:00	0.135	1.510	-0.515	-0.669	0.645	1.105
10:00	-0.109	1.857	-0.558	-0.985	0.620	0.826
11:00	-0.217	2.555	-0.156	-1.543	1.406	2.045
12:00	-0.483	2.874	0.178	-1.625	1.790	2.733
13:00	-1.397	2.740	0.241	-1.557	1.271	1.298
14:00	-1.129	2.186	-0.383	-1.379	-0.277	-0.982
15:00	-0.664	2.424	0.870	-0.871	0.991	2.750
16:00	-0.861	1.955	-0.445	-0.956	-0.713	-1.020
17:00	-0.851	1.465	-0.558	-0.866	-1.105	-1.915
18:00	-1.098	0.939	-0.547	-1.063	-1.406	-3.174
					Integral	15.048[Wh]

El flujo de calor a través de las paredes es menor que en el caso de la ventana de vidrio doble. Lo anterior se debe a que las condiciones climáticas para ambos días fueron diferentes, en la tabla 18 se presenta la ganancia de calor a través del vidrio durante el día de medición.

Tabla 18. Flujo de calor total, a través de las paredes y de la ventana de vidrio claro de 6 mm

Time(h)	$Q_{tot}(W)$	Qwall [W]	Qwindow [W]
19:00		0.018	-0.02
20:00	-172.66	1.026	-173.69
21:00	-173.33	1.459	-174.79
22:00	-387.99	0.566	-388.55
23:00	-177.99	0.071	-178.06
0:00	-112.00	0.241	-112.24
1:00	-84.66	0.362	-85.03
2:00	-103.33	0.423	-103.75
3:00	-66.66	0.615	-67.28
4:00	-87.33	0.823	-88.15
5:00	-28.00	1.020	-29.02
6:00	-9.33	1.107	-10.44
7:00	153.33	0.929	152.40
8:00	2800.56	1.667	2798.89
9:00	-108.66	1.105	-109.77
10:00	731.31	0.826	730.48
11:00	1649.27	2.045	1647.23
12:00	709.97	2.733	707.24
13:00	-363.32	1.298	-364.62
14:00	-1421.95	-0.982	-1420.96
15:00	-179.99	2.750	-182.74
16:00	-1190.62	-1.020	-1189.60
17:00	-631.31	-1.915	-629.39
18:00	-645.31	-3.174	-642.13
Integral	508.980[Wh]	15.048[Wh]	493.933[Wh]

Se puede observar que el 97.04% de la energía está entrando a través de la ventana, comparado con un 93.6% que presentó la ventana de vidrio doble destacando la presencia de mayor radiación solar en el día 1 de medición.

Obteniendo el flujo de calor en las horas solares en donde ambas mediciones coincidieron, en cuanto a radiación el día 2 tuvo 36.62% menos que el día 1 presentando una ganancia de calor al interior del 139% con respecto a la ventana de vidrio doble, 99.5% de la energía entró por la ventana (Tabla 19).

Tabla 19. Flujos de calor en horas solares para ambas ventanas

Time(h)	Q_{tot} (W) Ventana Low-e	Q_{tot} (W) Ventana 6 mm	Qwindow [W] Ventana Low-e	Qwindow [W] Ventana 6 mm	Radiacion Solar[W/m ²] Día 1	Radiacion Solar[W/m ²] Día 2
6:00	-58.66	-9.33	-59.91	-10.44	0.67	0.83
7:00	-17.33	153.33	-18.81	152.40	79.17	53.50
8:00	273.32	2800.56	269.89	2798.89	143.00	212.50
9:00	880.63	-108.66	873.18	-109.77	501.67	309.00
10:00	3433.87	731.31	3425.21	730.48	789.83	379.33
11:00	611.31	1649.27	602.90	1647.23	673.33	465.83
12:00	541.98	709.97	533.74	707.24	865.33	425.00
13:00	-694.64	-363.32	-698.95	-364.62	509.50	385.67
14:00	-429.32	-1421.95	-434.82	-1420.96	562.29	534.14
15:00	-1045.29	-179.99	-1045.91	-182.74	577.17	257.00
16:00	-703.97	-1190.62	-703.86	-1189.60	310.83	165.67
17:00	-2279.91	-631.31	-2276.85	-629.39	87.83	36.50
Integral	1719.27	2387.58	1673.55	2377.435	5016.45	3179.14

4.3 Perfiles de temperatura

En las siguientes figuras se presentan algunas imágenes de la distribución de temperatura al interior de la cavidad.

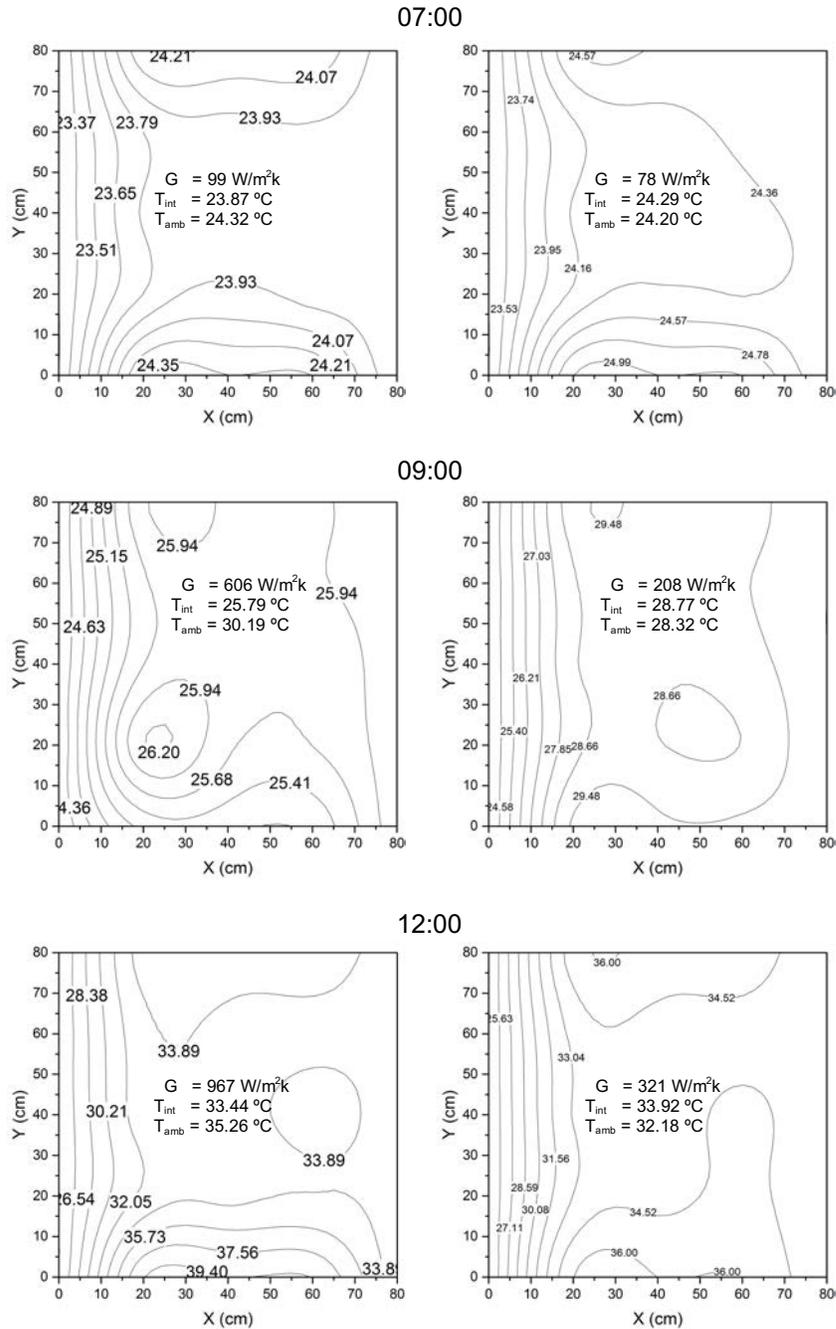


Figura 40. Perfiles de temperatura. Derecha Ventana de vidrio de 6mm, Izquierda Ventana de vidrio doble Low-e

En la figura 40 se aprecia como con una presencia de radiación y temperatura ambiente bajas, ambas ventanas tienen una temperatura interior similar ligeramente inferior en el caso de la ventana de vidrio doble pero la ventana de vidrio claro tuvo una transferencia de calor de 153 W al interior en esta hora.

A las 09:00 horas se aprecia una diferencia de 3°C entre ambas ventanas con la ventana de 6 mm con la temperatura mayor, se aprecia que la radiación solar en el día 1 es 2 veces mayor que la del día 2 y la temperatura ambiente está casi 2°C arriba.

El mayor valor de radiación solar para ambas mediciones se presentó en el día 1, se aprecia que la temperatura en el interior está casi 2°C debajo de la temperatura ambiente, a diferencia de la ventana de vidrio claro en donde con 2 veces menos radiación solar, tiene una temperatura interior superior a la de ambiente. A esta hora se registró una transferencia de calor de 534 W por la ventana de vidrio doble y 708 W por la ventana de vidrio de 6 mm.

4.4 Ahorro de energía

Con los resultados obtenidos del experimento, se puede realizar una simulación sobre el ahorro de energía que podría presentarse con la utilización de la ventana de vidrio doble, tomando como base del análisis la tabla 19.

Para el día 1, del total de la energía proporcionada por el sol, un 34.27% entro al prototipo, mientras que para el día 2, entro un 75.10%, con base a estos porcentajes se realizó un análisis del ahorro de energía que se podría presentar con el uso de la ventana de vidrio doble al estar expuesta a la radiación solar de los días del experimento, los resultados se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Análisis de ahorro de energía con el uso de la ventana de vidrio doble

Tipo	Q _{int} [5.01 Kwh]	Q _{int} [3.17 Kwh]
Vidrio claro de 6 mm	3.76	2.38
Vidrio doble Low-e	1.72	1.09
Ahorro	-2.05	-1.29

Este análisis indica que con el uso de una ventana de vidrio doble como la analizada en el experimento, se tiene un ahorro, para todo el periodo tarifario de invierno (1/2 año), de \$559.98 pesos mexicanos con una radiación solar de 5.01KWh y de \$354.32 con una radiación de 3.17KWh al día, sabiendo que la energía que entra por la ventana se tiene que remover con un sistema de acondicionamiento ambiental, este ahorro es por una sola ventana (orientada al sur) y con un precio medio por la energía de \$1.5 pesos mexicanos, sabiendo que el precio máximo es de \$2.82 para el mes de febrero.

Tabla 21. Análisis de costos

Radiación solar(KWh)	Precio medio por Kwh	Energía añadida para mantener confort (KWh/día)		Costo anual de energía (Pesos/KWh)	
		Vidrio claro	Vidrio doble	Vidrio claro	Vidrio doble
5.01	\$1.50	2.05	0	\$559.98	\$0.00
3.17	\$1.50	1.29	0	\$354.32	\$0.00

Conclusiones

- El prototipo experimental cumple con el propósito de evaluar el desempeño térmico de ventanas de vidriado mexicano.
- Por el análisis de una ventana de vidrio doble con película Low-E de control solar comparándola con un vidrio claro de 6 mm, se concluyó que, con las condiciones climatológicas de la región sureste del país, se pueden presentar ahorros del 46% en comparación con el uso de las ventanas tradicionales, de un solo vidrio.
- La ventana de vidrio doble proporcionó temperaturas menores en el interior del prototipo durante las horas solares de análisis a pesar de estar sujeta a una irradiancia del 36.62% mayor, esto representa que, en comparación con una ventana tradicional, los sistemas activos de acondicionamiento ambiental, tratamiento del aire, necesitaran de menor energía para poder alcanzar temperaturas de confort en una residencia usando este tipo de ventana.
- El experimento no solo sirvió para evaluar la ventana sino permitió comprobar tecnologías pasivas como el Foamular y el crestuco, los cuales en la experimentación probaron que con el uso adecuado de estas proveen de buen aislamiento térmico a las instalaciones, pues como lo demostró el análisis la energía que fluyó a través de las paredes conformadas por estos materiales fue muy pequeña.
- Los resultados experimentales de la matriz de temperatura del aire al interior de la cavidad sirven para validar códigos numéricos, los cuales se podrán usar para estudios más extensos.

Recomendaciones para trabajos futuros

1. Cambiar el módulo de control en el controlador de temperatura, usar un optoacoplador en vez de un transistor para optimizar el uso de la corriente en el circuito, esto evitara errores en la visualización de los datos en la pantalla.
2. Utilizar para la pared isotérmica un entorno para controlar la temperatura que no dependa del uso de agua, se propone el uso de sistema de tratamiento del aire.
3. Utilizar termopilas individuales para cada parte de la pared (interior y exterior) en vez de diferenciales, estas proporcionarían el promedio de temperatura de toda la pared, de la superficie exterior y la interior.
4. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor (Factor U) para poder determinar el aislamiento exacto de las ventanas a analizar.
5. Realizar la evaluación con dos o más celdas (prototipo experimental) para poder analizar simultáneamente las ventanas a evaluar y que estas estén sujetas a las mismas condiciones ambientales.

Referencias

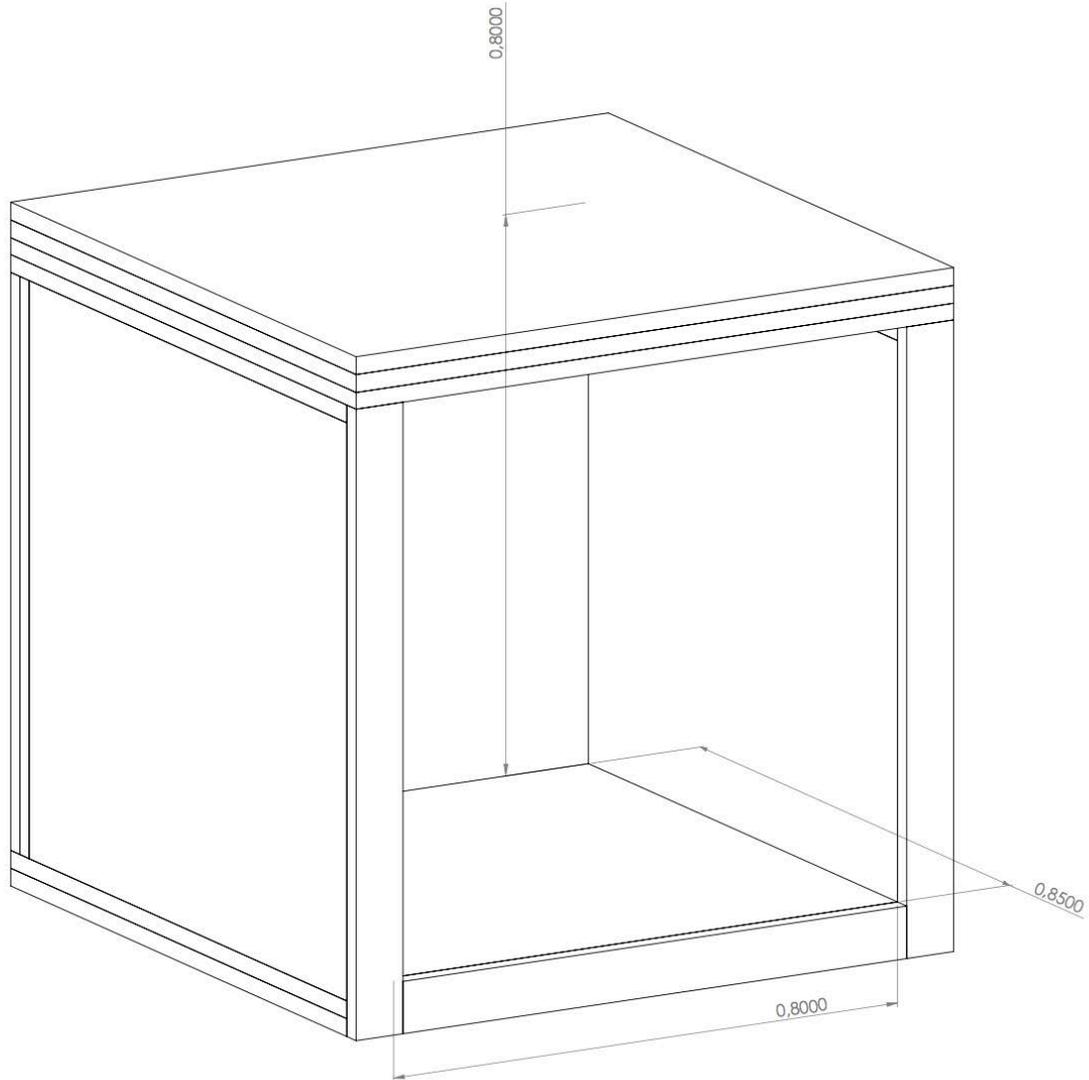
- Aguilar, J., & Xamán, J. (2015). *Informe Técnico: Estudio de propiedades ópticas y térmicas de vidrios de control solar disponibles en el mercado mexicano*. Universidad de Quintana Roo; Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Elsevier.
- Aguilar, J., Xamán, J., Álvarez, G., Hernández-Pérez, I., & Lopez-Mata, C. (2015). Thermal performance of a double pane window using glazing available on the Mexican market. *Renewable Energy*, 81, 785-794.
- Aleman-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cardenas-Chavez, D. L., Diaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J.F., Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140-153.
- Álvarez, G., Palacios, M., & Flores, J. (2000). A test method to evaluate the thermal performance of window glazings. *Applied Thermal Engineering*, 20, 803-812.
- Analog Devices. (1999). *Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation*. Recuperado el Junio de 2016, de AD594/AD595 Data sheet: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD594_595.pdf
- Arici, M., & Karabay, H. (2010). Determination of optimum thickness of double-glazed windows for the climatic regions of Turkey. *Energy and Buildings*, 42, 1773-1778.
- Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F., & Dewitt, D. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Inc.
- CFE. (12 de 2016). *Página Web de la Comisión Federal de electricidad*. Recuperado el 21 de 01 de 2017, de Información Operacional: <http://www.cfe.gob.mx/inversionistas/InformacionOperacional/Paginas/Clientes.aspx>
- CFE. (2017). *Página Web de la Comisión Federal de Electricidad*. Recuperado el 21 de 01 de 2017, de Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2016 - 2017) : http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_casa.asp
- Ferronato vidrios. (2014). Recuperado el 21 de 01 de 2017, de Tipos de vidrios: <http://www.ferronatovidrios.com/detalle/tipos-de-vidrios/>
- Gijon-Rivera, M., Álvarez, G., Beausoleil-Morrison, I., & Xamán, J. (2011). Appraisal of thermal performance of a glazed office with a solar control coating: Cases in Mexico and Canada. *Building and Environment*, 46, 1223-1233.
- Gugliermetti, F., & Bisegna, F. (2007). Saving energy in residential buildings: The use of fully reversible windows. *Energy*, 32, 1235-1247.

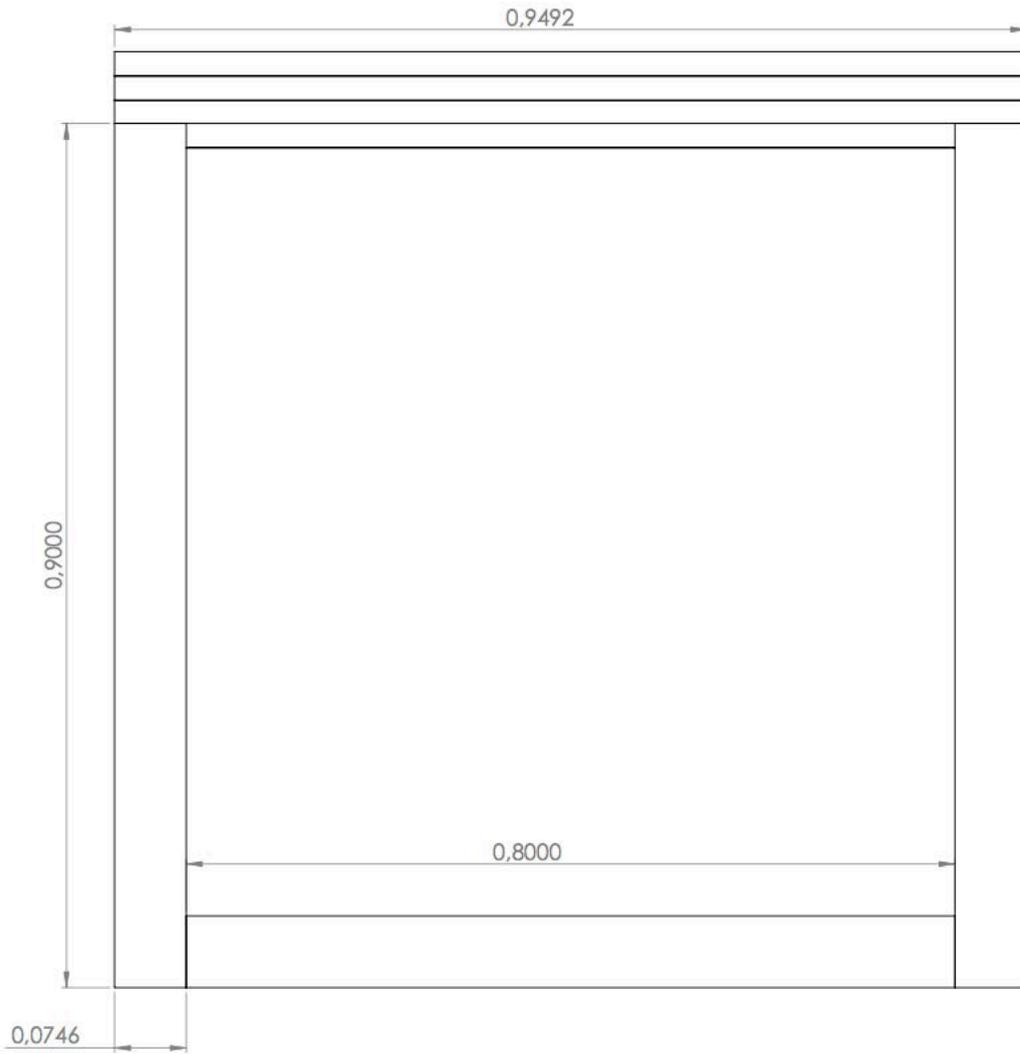
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. (2017). *Banco de Información Económica*. Recuperado el 21 de 01 de 2017, de Sitio Web de Instituto Nacional de Estadística y Geografía:
<http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/?idserpadre=1160122001800070#D1160122001800070>
- Ismail, K., & Henriquez, J. (2003). Modeling and simulation of a simple glass window. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 80, 355-374.
- Ismail, K., & Henriquez, J. (2005). Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window. *Heat and Mass Transfer*, 48, 461-475.
- Ismail, K., Henriquez, J., & Salinas, C. T. (2009). A comparative study of naturally ventilated and gas filled windows for hot climates. *Energy Conversion and Management*, 50, 1691-1703.
- Jiménez, I. (2012). *Estudio de la Transferencia de Calor en Ventanas Mexicanas en Condiciones de Clima Frío Mediante una Cámara de Ambiente Controlado*. Cuernavaca, Morelos, México.
- Long, L., Ye, H., Zhang, H., & Gao, Y. (2015). Performance demonstration and simulation of thermochromic double glazing in buildings applications. *Solar Energy*, 120, 55-64.
- Medved, S., & Novak, P. (1998). Heat transfer through a double pane window with an insulation screen open at the top. *Energy and Buildings*, 28, 257-268.
- Mundo-Hernández, J., & de Celis Alonso, B. (2014). An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 140-153.
- Noh-Pat, F., Xamán, J., Chávez, Y., Arce, J., & Álvarez, G. (2011). Thermal analysis for a double glazing unit with and without a solar control film (SnS-CuxS) for using in hot climates. *Energy and Buildings*, 43, 704-712.
- Orhan, A. (2000). Determination of optimum air-layer thickness in double-pane windows. *Energy and Buildings*, 32, 303-308.
- Orhan, A. (2006). Conjugate heat transfer analysis of double pane windows. *Building and Environment*, 41, 109-116.
- Pérez Nucamendi, C. M. (2012). Análisis Térmico de una Ventana de Vidrio Doble. Tesis de Maestría, CENIDET. Cuernavaca, Morelos, Mexico.
- Secretaría de Energía. (2015). *Balance Nacional de Energía 2015*. Secretaría de Energía. Secretaría de Energía. Recuperado el 06 de 05 de 2016, de Balance nacional de energía:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44353/Balance_Nacional_de_Energ_a_2014.pdf

- Xamán, J. P., Álvarez, G., Hinojosa, J., & Flores, J. (2009). Conjugate turbulent heat transfer in a square cavity with a solar control coating deposited to a vertical semitransparent wall. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 237-248.
- Xamán, J., Álvarez, G., Chávez, Y., Aguilar, J., & Arce, J. (2012). Average Air Temperature Inside a Room With a Semitransparent Wall With a Solar Control Film: Effect of The Emissivity . *Journal of Applied Research and Technology*, 10, 327-339.
- Xamán, J., Olazo-Gómez, Y., Chávez, Y., Hinojosa, J., Hernández-Pérez, I., Hernández-López, I., & Zavala-Guillén, I. (2016). Computational fluid dynamics for thermal evaluation of a room with a double glazing window with a solar control film. *Renewable Energy*, 94, 237-250.
- Xamán, J., Pérez-Nucamendi, C., Arce, J., Hinojosa, J., Álvarez, G., & Zavala-Guillén, I. (2014). Thermal analysis for a double pane window with a solar control film for using in cold and warm climates. *Energy and Buildings*, 76, 429-439.

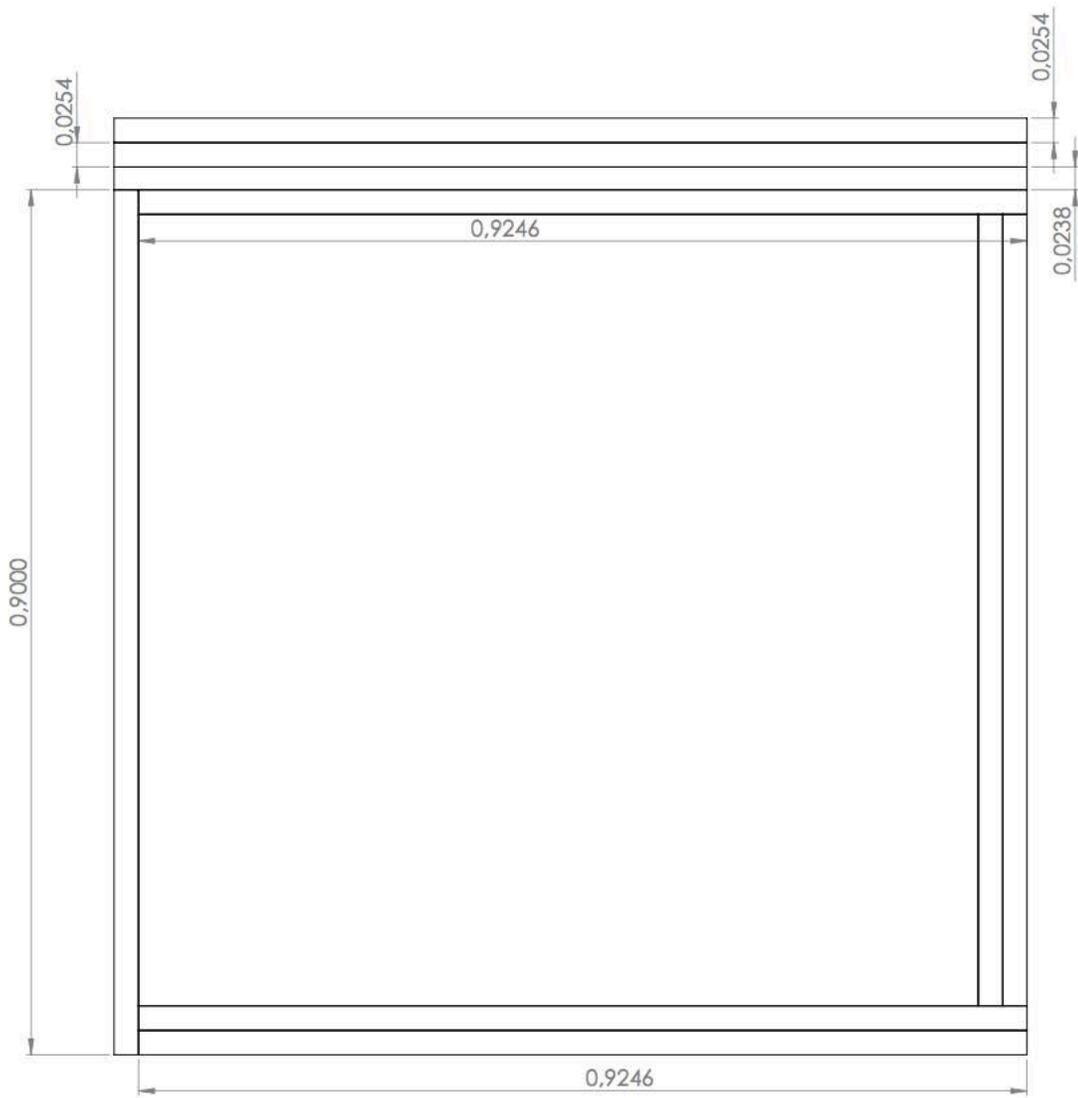
Anexos

Anexo 1. Planos del prototipo experimental

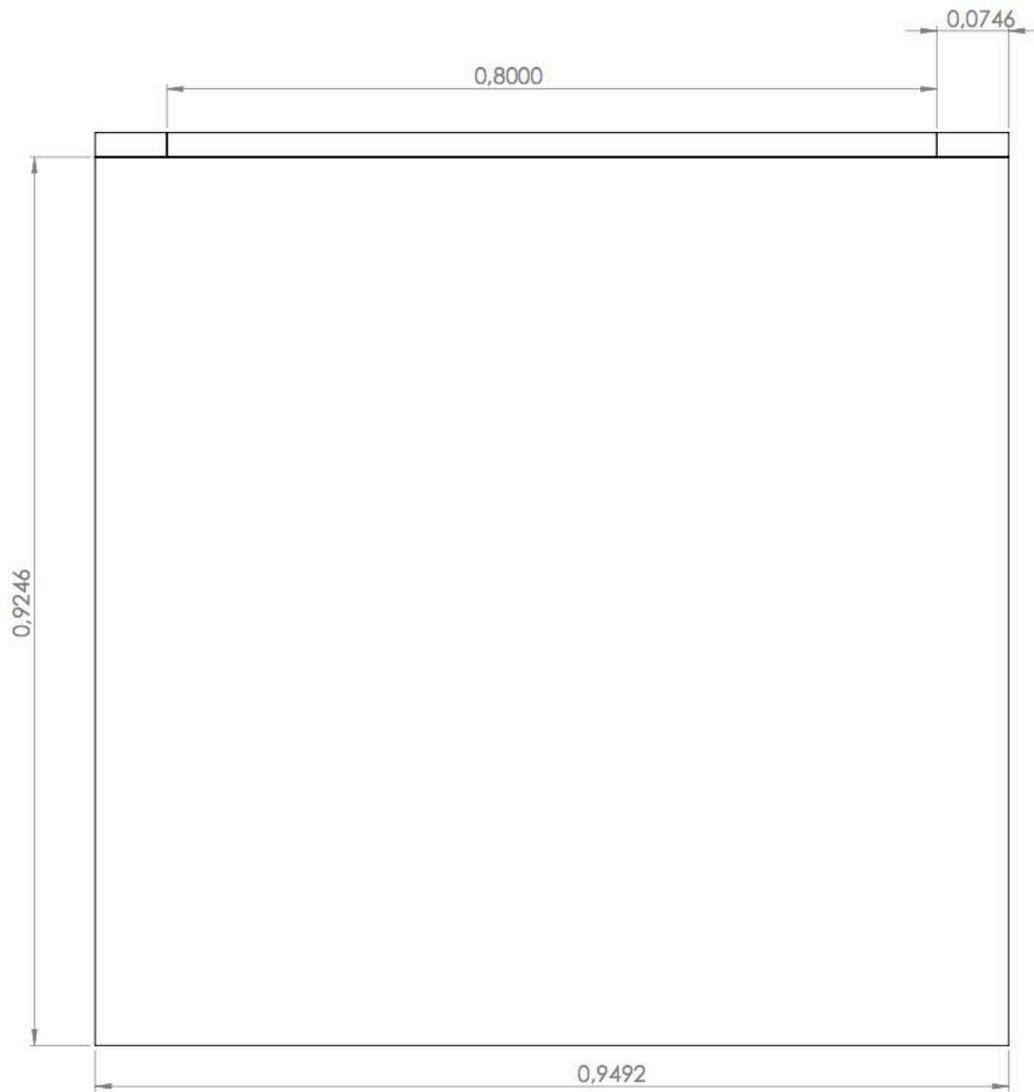




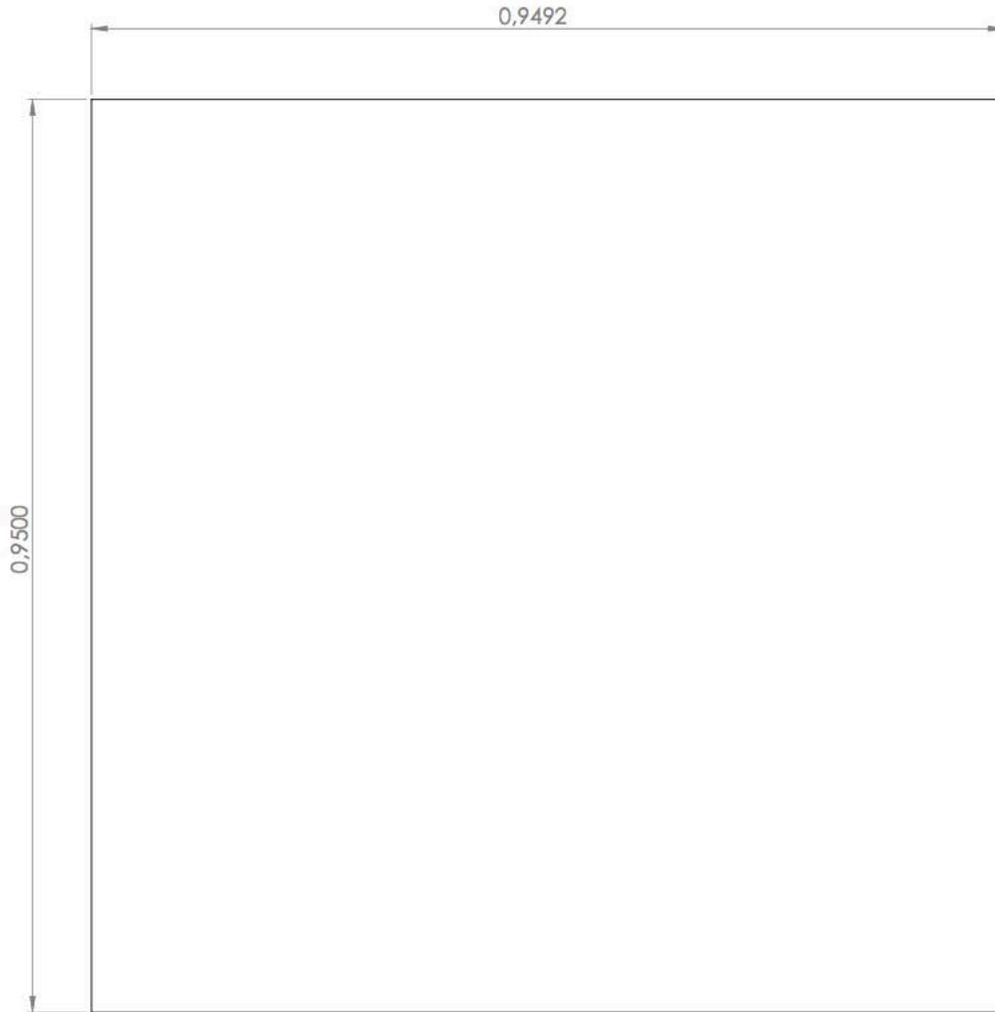
Delantera



Lateral



Trasera



Superior

Anexo 2. Programación para el control de temperatura

```
/*Controlador de Temperatura
 * by NHPA*/
byte grado[8] =
{
0b00001100, 0b00010010,
0b00010010, 0b00001100,
0b00000000, 0b00000000,
0b00000000, 0b00000000
};
int tmc = A0; int tmcvalue = 0;
int potpin = A1; int potvalue = 0;
int potmapvalue = 0;
int lcdvalue = 0;
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
void setup()
{
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.createChar(1, grado);
  pinMode(13, OUTPUT);
}
void loop()
{
  //      C, F  <--- Columnas, Filas
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temp.");
  lcd.setCursor(10, 0); lcd.print(lcdvalue);
  lcd.setCursor(13, 0); lcd.write(1); lcd.print("C");
  lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Prog.");
  lcd.setCursor(10, 1); lcd.print(potmapvalue);
  lcd.setCursor(13, 1); lcd.write(1); lcd.print("C");
  potvalue = analogRead(potpin);
  potmapvalue = map(potvalue, 0, 1023, 0, 100);
  tmcvalue = analogRead(tmc);
  lcdvalue = (((5.0 * tmcvalue)/1023)*100);
  if(potmapvalue < lcdvalue)
  {
    digitalWrite(13,1);
  }
  if(potmapvalue > lcdvalue)
  {
    digitalWrite(13,0);
  }
  delay(500);
}
```

Anexo 3. Temperaturas puntuales y diferenciales de las paredes del prototipo

Día 1

Time	101	102	101-102	103	104	105	104-105	106	107	108	107-108	109	110	111	110-111	112	113	114	113-114	115	116	117	116-117	118	Tamb	Tavint	Tamb-Tavin
18:00	26.37	25.77	0.60	1.21	26.99	23.40	3.60	4.40	26.76	25.82	0.94	0.97	26.38	25.93	0.45	1.08	26.95	26.29	0.66	1.34	26.46	25.12	1.34	2.24	26.44	25.12	1.32
19:00	25.60	25.60	0.00	0.65	26.78	23.80	2.98	3.40	25.65	25.58	0.08	0.65	25.87	25.73	0.14	0.88	25.70	25.96	-0.26	0.55	25.52	24.95	0.56	1.66	25.73	24.96	0.77
20:00	25.17	25.39	-0.22	0.40	26.11	23.79	2.33	2.86	25.15	25.33	-0.18	0.49	25.60	25.56	0.04	0.75	25.12	25.69	-0.57	0.25	25.02	24.77	0.25	1.42	25.33	24.81	0.52
21:00	24.95	25.20	-0.25	0.38	25.94	23.79	2.15	2.55	24.83	25.10	-0.28	0.43	25.35	25.39	-0.05	0.64	25.04	25.45	-0.41	0.37	24.81	24.65	0.15	1.32	25.36	24.65	0.71
22:00	24.99	25.08	-0.08	0.51	25.89	23.75	2.14	2.50	24.86	24.98	-0.12	0.54	25.37	25.30	0.07	0.77	24.89	25.23	-0.35	0.43	24.73	24.53	0.20	1.36	25.16	24.59	0.57
23:00	24.94	24.95	-0.01	0.66	25.85	23.78	2.07	2.46	24.83	24.82	0.01	0.65	25.34	25.14	0.20	0.87	25.01	25.09	-0.08	0.65	24.79	24.50	0.29	1.41	25.29	24.50	0.79
0:00	24.85	24.83	0.02	0.62	25.80	23.74	2.06	2.35	24.67	24.74	-0.06	0.59	25.12	25.11	0.01	0.76	24.81	24.97	-0.16	0.59	24.59	24.42	0.17	1.32	25.18	24.45	0.73
1:00	24.57	24.67	-0.10	0.52	25.59	23.55	2.05	2.27	24.48	24.57	-0.09	0.57	25.06	24.94	0.12	0.80	24.59	24.81	-0.22	0.53	24.40	24.27	0.14	1.28	24.79	24.35	0.44
2:00	24.50	24.60	-0.11	0.54	25.74	23.53	2.21	2.43	24.44	24.47	-0.03	0.62	24.93	24.84	0.08	0.77	24.52	24.73	-0.20	0.57	24.38	24.21	0.17	1.33	24.72	24.28	0.44
3:00	24.49	24.50	-0.00	0.61	25.43	23.54	1.89	2.19	24.41	24.45	-0.04	0.65	24.89	24.80	0.09	0.85	24.52	24.60	-0.07	0.68	24.31	24.15	0.17	1.33	24.87	24.16	0.71
4:00	23.88	24.41	-0.52	0.16	25.02	23.46	1.57	1.88	23.79	24.23	-0.43	0.36	24.54	24.60	-0.06	0.58	23.94	24.52	-0.58	0.21	23.80	24.06	-0.25	0.98	24.30	24.10	0.20
5:00	24.00	24.27	-0.27	0.34	25.08	23.38	1.70	1.91	23.87	24.22	-0.35	0.42	24.57	24.59	-0.02	0.70	24.02	24.35	-0.33	0.44	23.86	23.92	-0.06	1.11	24.35	24.00	0.35
6:00	23.96	24.20	-0.24	0.38	25.01	23.31	1.70	1.89	23.81	24.05	-0.24	0.47	24.51	24.48	0.03	0.73	24.01	24.30	-0.29	0.47	23.84	23.87	-0.03	1.15	24.18	23.90	0.28
7:00	23.99	24.10	-0.11	0.54	25.10	23.23	1.87	2.08	23.91	23.98	-0.07	0.61	24.45	24.35	0.10	0.80	24.11	24.17	-0.06	0.65	23.96	23.81	0.15	1.27	24.32	23.87	0.46
8:00	25.60	24.29	1.31	2.02	26.39	23.45	2.94	3.29	25.87	24.51	1.37	1.50	25.31	24.56	0.75	1.61	26.17	24.45	1.72	2.48	25.64	24.22	1.42	2.99	26.72	24.32	2.40
9:00	29.15	25.07	4.09	5.05	28.89	24.10	4.79	5.61	30.04	26.21	3.84	3.41	27.34	25.22	2.11	3.09	31.74	25.90	5.83	6.48	30.31	26.12	4.19	7.00	30.19	25.79	4.40
10:00	32.24	28.32	3.91	6.38	32.02	24.99	7.03	8.31	32.53	34.26	-1.73	0.49	29.59	33.68	-4.09	-1.13	39.43	30.77	8.66	13.43	40.97	31.31	9.66	12.18	33.31	31.52	1.79
11:00	33.68	30.62	3.05	4.42	32.01	24.28	7.73	9.74	34.18	34.15	0.04	1.03	30.91	37.63	-6.72	-2.49	47.05	33.02	14.03	14.00	40.40	32.33	8.08	11.29	33.73	32.53	1.20
12:00	33.99	32.82	1.17	2.70	33.80	24.74	9.06	10.85	37.17	34.38	2.79	2.05	31.97	39.37	-7.40	-3.50	50.33	34.80	15.52	14.04	41.00	33.08	7.92	9.87	35.26	33.44	1.83
13:00	32.12	33.81	-1.69	-0.21	32.97	23.86	9.11	10.22	35.39	34.34	1.05	1.33	30.55	35.24	-4.70	-3.43	40.07	35.08	4.99	5.78	36.34	32.33	4.01	6.33	33.25	32.28	0.97
14:00	32.36	34.31	-1.95	-0.46	32.15	23.60	8.55	10.08	39.54	33.91	5.63	2.89	30.88	34.06	-3.18	-2.27	41.57	35.35	6.23	7.24	37.01	31.38	5.63	7.68	33.43	31.56	1.86
15:00	29.80	32.83	-3.03	-2.13	31.03	23.66	7.37	8.36	31.08	32.61	-1.54	-0.12	29.06	32.65	-3.59	-2.79	31.06	33.93	-2.87	-1.36	30.53	29.87	0.66	1.99	29.65	29.82	-0.17
16:00	28.60	31.42	-2.82	-2.24	28.53	22.81	5.71	6.86	29.79	31.26	-1.47	-0.59	28.06	31.71	-3.65	-2.85	29.29	32.22	-2.93	-1.52	28.83	29.07	-0.24	2.15	27.82	28.65	-0.83
17:00	24.14	27.67	-3.53	-3.38	26.08	20.16	5.91	3.96	24.01	27.42	-3.41	-3.63	24.41	27.18	-2.77	-2.65	23.61	28.83	-5.22	-4.01	23.50	25.00	-1.50	0.15	23.58	24.85	-1.26

Día 2

Time	101	102	101-102	103	104	105	104-105	106	107	108	107-108	109	110	111	110-111	112	113	114	113-114	115	116	117	116-117	118	Tamb	Tavint	Tamb-Tavin
19:00	25.991	27.34	-1.35	-0.93	26.54	23.81	2.73	3.09	26.40	27.26	-0.86	-0.10	26.26	28.44	-2.18	-1.43	26.24	27.73	-1.49	-0.56	26.27	26.29	-0.02	0.84	25.96	26.37	-0.41
20:00	26.40	26.99	-0.59	-0.03	27.03	24.03	3.00	3.56	26.36	26.93	-0.57	0.30	26.59	27.94	-1.35	-0.54	26.45	27.33	-0.88	-0.03	25.88	25.79	0.09	1.17	26.44	26.08	0.36
21:00	26.15	26.65	-0.51	0.14	28.17	23.93	4.24	4.11	26.09	26.55	-0.46	0.43	26.42	27.52	-1.10	-0.27	26.39	26.95	-0.56	0.22	25.56	25.53	0.03	1.18	26.53	25.79	0.74
22:00	25.09	26.09	-0.99	-0.40	25.92	23.14	2.78	2.98	25.03	25.94	-0.90	0.20	25.62	26.89	-1.27	-0.50	25.03	26.40	-1.36	-0.49	24.70	24.69	0.01	1.20	24.92	25.15	-0.22
23:00	24.53	25.67	-1.14	-0.58	25.25	23.22	2.03	2.35	24.31	25.52	-1.22	0.00	24.98	26.47	-1.48	-0.71	24.27	25.94	-1.68	-0.84	24.17	24.20	-0.04	1.11	24.24	24.85	-0.60
0:00	24.36	25.32	-0.96	-0.39	25.24	23.29	1.94	2.33	24.29	25.22	-0.93	-0.09	24.91	26.12	-1.21	-0.46	24.17	25.58	-1.41	-0.62	24.07	24.10	-0.04	1.06	24.12	24.66	-0.54
1:00	24.28	25.06	-0.78	-0.27	25.10	23.35	1.75	2.15	24.18	25.01	-0.82	0.06	24.73	25.86	-1.12	-0.35	24.07	25.26	-1.19	-0.44	23.97	23.98	-0.01	1.08	24.25	24.52	-0.27
2:00	24.09	24.82	-0.73	-0.19	25.02	23.32	1.70	1.99	24.08	24.71	-0.63	0.08	24.61	25.56	-0.96	-0.25	24.02	25.00	-0.98	-0.29	23.86	23.88	-0.01	1.05	24.23	24.35	-0.12
3:00	23.94	24.60	-0.67	-0.10	24.97	23.27	1.70	1.95	23.99	24.56	-0.57	0.32	24.53	25.35	-0.81	-0.09	23.95	24.78	-0.84	-0.13	23.76	23.76	-0.01	1.08	24.17	24.24	-0.07
4:00	23.94	24.54	-0.60	0.06	24.99	23.26	1.73	1.98	23.98	24.38	-0.40	0.41	24.49	25.06	-0.58	0.07	24.02	24.60	-0.57	0.10	23.77	23.75	0.02	1.10	24.19	24.09	0.09
5:00	23.97	24.39	-0.42	0.22	25.04	23.23	1.81	2.03	24.04	24.28	-0.25	0.49	24.44	24.90	-0.47	0.22	24.06	24.45	-0.39	0.28	23.78	23.74	0.04	1.11	24.16	24.04	0.12
6:00	23.93	24.26	-0.33	0.30	24.99	23.19	1.80	2.04	24.00	24.24	-0.24	0.49	24.40	24.79	-0.40	0.33	24.02	24.35	-0.33	0.35	23.78	23.72	0.06	1.11	24.16	24.03	0.13
7:00	24.01	24.50	-0.49	0.22	24.86	23.32	1.55	1.81	24.15	24.72	-0.57	0.35	24.22	24.99	-0.77	0.04	24.42	24.55	-0.13	0.53	24.58	24.41	0.17	1.06	24.20	24.29	-0.08
8:00	26.52	26.57	-0.05	2.07	26.70	24.27	2.43	3.29	27.53	35.99	-8.47	-2.38	25.44	29.53	-4.09	-1.87	32.07	27.85	4.23	4.19	34.59	33.01	1.58	1.12	28.42	28.95	-0.53
9:00	27.74	28.50	-0.76	0.43	27.96	23.76	4.20	4.79	28.27	32.32	-4.05	-1.64	26.71	29.65	-2.94	-2.12	30.45	29.17	1.28	2.05	31.33	30.29	1.04	0.95	28.32	28.77	-0.46
10:00	28.91	30.55	-1.65	-0.34	29.24	24.16	5.08	5.89	29.48	33.41	-3.93	-1.77	27.58	31.68	-4.10	-3.13	31.91	30.94	0.97	1.97	32.56	29.97	2.59	1.10	29.26	29.99	-0.72
11:00	31.34	33.43	-2.09	-0.69	31.30	24.90	6.40	8.11	33.18	35.51	-2.33	-0.50	29.49	36.39	-6.90	-4.90	37.76	34.22	3.54	4.46	36.54	32.45	4.09	0.69	31.40	32.74	-1.34
12:00	32.24	35.24	-3.00	-1.53	31.34	24.19	7.15	9.12	35.70	35.77	-0.07	0.56	30.16	35.98	-5.81	-5.16	41.01	35.34	5.67	5.68	38.34	33.29	5.04	0.43	32.18	33.92	-1.75
13:00	31.43	37.71	-6.28	-4.44	31.07	24.05	7.02	8.70	37.86	35.96	1.90	0.77	29.83	34.70	-4.87	-4.94	40.59	36.51	4.08	4.03	37.33	32.92	4.41	0.74	31.21	33.32	-2.11
14:00	29.92	34.52	-4.60	-3.58	29.52	24.18	5.34	6.94	31.15	33.95	-2.80	-1.22	28.80	33.71	-4.90	-4.38	32.23	34.39	-2.15	-0.88	31.63	31.03	0.60	1.27	29.54	30.95	-1.41
15:00	30.59	33.68	-3.08	-2.11	30.47	24.16	6.31	7.69	40.15	33.75	6.40	2.76	29.37	33.01	-3.64	-2.77	33.67	34.42	-0.75	3.15	31.60	30.62	0.98	1.57	31.13	30.65	0.49
16:00	28.40	31.93	-3.52	-2.73	28.72	23.52	5.20	6.21	28.81	31.62	-2.81	-1.41	28.10	31.71	-3.60	-3.03	28.88	32.42	-3.54	-2.26	28.16	28.84	-0.68	1.55	28.17	28.66	-0.50
17:00	27.09	30.38	-3.29	-2.70	27.36	23.66	3.70	4.65	26.63	30.08	-3.46	-1.77	27.33	30.65	-3.32	-2.75	26.32	31.00	-4.67	-3.51	26.28	27.89	-1.61	1.29	26.39	27.61	-1.21
18:00	24.95	28.92	-3.97	-3.48	25.92	23.56	2.36	2.98	24.46	28.65	-4.19	-1.74	25.75	29.69	-3.94	-3.37	23.93	29.58	-5.65	-4.46	24.53	26.79	-2.26	1.03	24.25	26.54	-2.29

Anexo 4. Posición de sensores en el sistema de adquisición de datos

Canal	Posición
101	Pared Este Exterior
102	Pared Este Interior
103	Pared Este Termopila
104	Pared Norte Exterior
105	Pared Norte Interior
106	Pared Norte Termopila
107	Pared Oeste Exterior
108	Pared Oeste Interior
109	Pared Oeste Termopila
110	Pared Base Exterior
111	Pared Base Interior
112	Pared Base Termopila
113	Pared Techo Exterior
114	Pared Techo Interior
115	Pared Techo Termopila
116	Ventana Exterior
117	Ventana Interior
118	Ventana Termopila

Canal	Posición
201	1
202	2
203	3
204	4
205	5
206	6
207	7
208	8
209	9