

**DIAGNÓSTICO Y MEJORAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DE  
LA VENTILACIÓN DE UN RECINTO EN CLIMA TEMPLADO A PARTIR  
DE SISTEMAS PASIVOS**

**OMAR ANDRÉS GARCÍA BARACALDO  
JULIÁN ANDRÉS JEREZ SUAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

**DIAGNÓSTICO Y MEJORAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DE  
LA VENTILACIÓN DE UN RECINTO EN CLIMA TEMPLADO A PARTIR DE  
SISTEMAS PASIVOS**

**OMAR ANDRÉS GARCÍA BARACALDO  
JULIÁN ANDRÉS JEREZ SUAREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**DIRECTOR  
JULIÁN E. JARAMILLO IBARRA  
Ph.D en Ingeniería Térmica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

A mi familia por ser el motor de mi vida, especialmente a mis padres, por su incansable fe y apoyo a lo largo de mi proceso de formación, la fortuna más grande es tenerlos conmigo y el tesoro más valioso son todos y cada uno de los valores que me han inculcado.

Si algo me enseñó esta carrera es que existen personas valiosas como mis compañeros Cristian Ruiz, Jorge Illidge, German Velazco, Julián Jerez y Daniela Becerra, me queda la satisfacción de haber compartido con personas tan valiosas como ustedes, les doy las gracias por su apoyo y afecto.

*Omar Andrés García Baracaldo.*

## DEDICATORIA

A mis padres que son el eje impulsor de vida y un ejemplo a seguir, a mi familia que siempre ha estado ahí para apoyarme en todo momento, a la vida por darme esta oportunidad de mostrar mi valía, a mis compañeros y profesores que hicieron realizable este proyecto y a Mary Parada por toda su comprensión y cariño.

*Julián Andrés Jerez Suarez*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	18
1. OBJETIVOS .....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
2. METODOLOGÍA.....	21
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	21
2.2 MARCO TEÓRICO .....	23
2.2.1 Transferencia de calor.....	23
2.2.2 Mecanismos de transferencia de calor .....	24
2.2.3 Carga térmica.....	28
2.2.4 Cálculo de carga térmica .....	31
2.2.5 Confort térmico .....	31
2.2.6 Posicionamiento solar .....	33
2.2.7 Métodos pasivos de climatización .....	34
3. SOFTWARE DE SIMULACIÓN .....	45
3.1 ENERGY PLUS .....	45
3.1.1 Posibilidades de EnergyPlus .....	45
3.1.2 Modelo energético.....	46
3.1.3 Función del IDF .....	46
3.2 SKETCHUP .....	46
3.3 OPENSTUDIO.....	48
4. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	50

4.1 ESTUDIOS EXPERIMENTALES.....	50
4.1.1 Caracterización del recinto .....	50
4.1.2 Datos meteorológicos .....	53
4.2 MODELOS TEÓRICOS.....	63
4.2.1 Código Matlab .....	63
4.2.2 Método CLTD .....	74
4.2.3 Infiltraciones. ....	86
4.3 MODELAMIENTO EN EL SIMULADOR.....	93
4.3.1 Fichero climático.....	93
4.3.2 Modelamiento y simulación del Recinto Original .....	94
4.3.3 Modelamiento de métodos pasivos. ....	106
4.3.4 Resultados de simulación de métodos pasivos.....	106
4.3.5 Análisis de resultados de simulación de métodos pasivos .....	116
4.3.6 Análisis económico de implementación.....	116
4.3.7 Combinación de mejores resultados .....	119
4.3.8 Selección y resultados de alternativas a implementar.....	120
4.4 IMPLEMETACIÓN DEL MODELO PROPUESTO .....	124
4.4.1 Análisis de resultados de la propuesta.....	127
4.5 SIMULACIÓN DEL RECINTO CON CARGA INTERNA.....	129
4.5.1 Carga térmica.....	129
4.5.2 Selección de equipo y análisis de costos .....	130
5. CONCLUSIONES.....	138
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES .....	141
BIBLIOGRAFÍA .....	143

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Transferencia unidimensional de calor por conducción.....	25
Figura 2. Convección natural en un recinto cerrado.....	26
Figura 3. Desarrollo de la capa límite de la transferencia de calor por convección forzada. ....	26
Figura 4. Intercambio de calor por radiación y convección de una superficie .....	27
Figura 5. Factores dependientes del individuo.....	32
Figura 6. Ángulos de un rayo incidente.....	34
Figura 7. Ventilación unilateral.....	35
Figura 8. Ventilación cruzada.....	36
Figura 9. Muro Trombe.....	36
Figura 10. Sistema de doble fachada.....	37
Figura 11. Sistema de alero en ventana.....	38
Figura 12. Sistema de partesol en ventana simple.....	40
Figura 13. Aplicación de pintura térmica reflectora.....	41
Figura 14. Vidrio mono capa de acristalamiento neutro de control solar.....	42
Figura 15. Ventana a termopanel simple.....	42
Figura 16. Gráficas de amortiguamiento y retraso.....	44
Figura 17. Pantalla lista para el uso de SketchUp.....	47
Figura 18. Modelo terminado en SketchUp.....	47
Figura 19. Zona térmica en SketchUp.....	48
Figura 20. Interfaz inicial de OpenStudio.....	49
Figura 21. Recinto piloto para desarrollo del proyecto.....	51
Figura 22. Orientación del recinto.....	51
Figura 23. Geometría y dimensionamiento del recinto sin modificaciones.....	52
Figura 24. Estación meteorológica Vantage Vue 6250.....	54
Figura 25. Control de mando de la estación meteorológica Vantage Vue 6250...54	54

Figura 26. Piranómetro Davis DS6450.....	55
Figura 27. Equipo Agilent 34972A.....	56
Figura 28. Termocupla tipo K.....	56
Figura 29. Posicionamiento estratégico de las termocuplas en el recinto piloto...	56
Figura 30. Generador de electricidad TG 2800CX.....	57
Figura 31. Comportamiento de la temperatura ambiente e interna promedio del recinto sin modificaciones para día el 6 de Febrero.....	60
Figura 32. Ángulos límites para cada una de las paredes de la casa.....	65
Figura 33. Interacciones de los calores en la pared lateral izquierda.....	69
Figura 34. Energías que interactúan con el volumen de aire en el recinto.....	71
Figura 35. Comportamiento del recinto para el día crítico del modelo matemático.....	72
Figura 36. Diagrama de flujo del programa Matlab.....	73
Figura 37. Recomendación de manual para el factor K.....	83
Figura 38. Coeficiente de Stack para el recinto.....	86
Figura 39. Coeficiente de viento.....	87
Figura 40. Tipos de ventanas.....	88
Figura 41. Factor de área estimada para Ventanas y Puertas.....	88
Figura 42. Factores de área estimadas para marcos de ventanas y puertas.....	89
Figura 43. Programa Elements para creación de fichero climático.....	94
Figura 44. Diseño geométrico del recinto sin ninguna modificación.....	95
Figura 45. Modelo visual del recinto.....	96
Figura 46. Creación de un nuevo material.....	98
Figura 47. Termostato para el cálculo de carga térmica.....	99
Figura 48. Asignación de propiedades a las capas del recinto.....	100
Figura 49. Comportamiento de la temperatura interna del 18 Enero al 18 de Febrero.....	101
Figura 50. Comportamiento de la temperatura interna del 18 febrero al 18 de marzo.....	102
Figura 51. Comportamiento de la temperatura interna del 18 marzo al 18 de abril.....	102
Figura 52. Resultado de temperatura interna en simulación para todo el día crítico.....	103
Figura 53. Temperatura interna del recinto del simulador, modelo matemático y experimental.....	104

Figura 54. Carga térmica para el día crítico 6 de febrero del recinto sin ninguna modificación. ....	105
Figura 55. Posicionamiento geométrico de la ventana en la pared lateral izquierda del recinto. ....	110
Figura 56. Simulación del comportamiento de la temperatura para el día 6 de Febrero con los métodos aplicados al recinto. ....	122
Figura 57. Simulación del comportamiento de la carga térmica para el día 6 de Febrero con los métodos aplicados al recinto. ....	122
Figura 58. Comportamiento interno para el recinto modificado en el simulador y modelo matemático para el 6 de Febrero. ....	124
Figura 59. Instalación de la ventana izquierda. ....	125
Figura 60. Aplicación del aislante en la pared izquierda. ....	125
Figura 61. Instalación del Alero y proceso de pintado. ....	125
Figura 62. Montaje de sistemas de climatización. ....	126
Figura 63. Resultados de temperatura interna para el mes de prueba en el recinto piloto. ....	128
Figura 64. Equipo AO9RLNSB. ....	131
Figura 65. Especificaciones técnicas del equipo AO9RLNSB. ....	132

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación de protección solar horizontal.....	39
Tabla 2. Clasificación de protectores solares verticales.....	40
Tabla 3. Fases principales para el desarrollo del proyecto.....	50
Tabla 4. Materiales presentes en la casa sin modificaciones.....	53
Tabla 5. Temperatura máxima ambiental e interna máxima promedio del recinto sin modificaciones medidas en termocuplas.....	58
Tabla 6. Datos meteorológicos en el recinto piloto para el día 6 de Febrero.....	60
Tabla 7. Comportamiento térmico del aire interior del recinto en cada una de las termocuplas para el día 6 de Febrero.....	62
Tabla 8. Datos meteorológicos del recinto a las 8 a.m.....	64
Tabla 9. Condiciones para la radiación directa en paredes.....	65
Tabla 10. Reflectancia de tipos de suelos.....	66
Tabla 11. Temperaturas iniciales del simulador de MATLAB a las 8 a.m. en superficies externa e interna.....	70
Tabla 12. Notación usada para los calores del recinto.....	71
Tabla 13. Propiedades térmicas para casos generales.....	77
Tabla 14. Propiedades de materiales para comparación.....	78
Tabla 15. Tipos de muros en función del factor R.....	79
Tabla 16. Valor CLTD para 36° latitud norte.....	80
Tabla 17. Valor CLTD para 48° latitud norte.....	80
Tabla 18. Interpolación 36° latitud norte.....	80
Tabla 19. Interpolación 48° latitud norte.....	81
Tabla 20. Interpolación para 40°.....	81
Tabla 21. Corrección de latitud para factor LM.....	82
Tabla 22. Interpolación de la orientación de la pared.....	82
Tabla 23. Interpolación latitud 6,9°.....	82
Tabla 24. Factores calculados para el techo.....	84

Tabla 25. Resultados de carga de refrigeración en paredes y techo con método CLTD para el mes de Febrero.....	85
Tabla 26. Materiales presentes en la casa sin modificaciones.....	97
Tabla 27. Comparación de los valores de la carga térmica.....	106
Tabla 28. Resultados de simulación en paredes.....	106
Tabla 29. Resultados de simulación en el techo.....	108
Tabla 30. Temperatura máxima del recinto con diferentes configuraciones de ventanas.....	109
Tabla 31. Diferentes tipos de configuraciones para sombras y ventanas en el recinto sin modificaciones.....	111
Tabla 32. Resultados de las simulaciones de sombras horizontales y verticales en ventanas.....	112
Tabla 33. Temperaturas máximas internas para diferentes configuraciones.....	114
Tabla 34. Resultado de simulación de fachadas ventiladas.....	115
Tabla 35. Resultados de ventilación de muro trumbe.....	116
Tabla 36. Costos y porcentajes de mejora para aislantes preseleccionados.....	117
Tabla 37. Costos de implementación de sombras y ventanas.....	118
Tabla 38. Mejores combinaciones para el recinto.....	119
Tabla 39. Combinación de ventanas con alero a la mejor combinación de aislamiento.....	120
Tabla 40. Comparación del recinto con métodos pasivos y sin método pasivos.....	123
Tabla 41. Comparación de temperaturas medidas y simuladas para el mes de prueba en los días que superaron el día crítico.....	128
Tabla 42. Tipos de cargas internas a utilizar en el simulador.....	130
Tabla 43. Resultados de carga térmica para recinto con y sin modificaciones para el 19 de mayo.....	130
Tabla 44. Cantidad de energía que se necesita retirar del recinto para un Set Point de 25°C.....	131
Tabla 45. Valor del Kw-h Electrificadora de Santander.....	133
Tabla 46. Costos de implementación de sistemas pasivos de refrigeración e implementación de un sistema de aire acondicionado.....	134
Tabla 47. Tiempo de recuperación en meses.....	137

## ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. GEOMETRÍA SOLAR.....	146
ANEXO B. RESULTADOS EN LA APLICACIÓN DE MÉTODO CLTD .....	153
ANEXO C. CÁLCULO TIPO DE INFILTRACIONES.....	155
ANEXO D. PORCENTAJES DE ERROR DE SIMULADOR Y MODELO MATEMÁTICO .....	158
ANEXO E. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN .....	160
ANEXO F. PROGRAMA MATLAB PARA CASA MODIFICADA.....	163
ANEXO G. MODELAMIENTO DE MÉTODOS PASIVOS .....	186
ANEXO H: PROPUESTA TECHO VERDE .....	204
ANEXO I. RESULTADOS DE SIMULACIONES FINALES.....	207

## RESUMEN

**TITULO:** DIAGNÓSTICO Y MEJORAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y DE LA VENTILACIÓN DE UN RECINTO EN CLIMA TEMPLADO A PARTIR DE SISTEMAS PASIVOS\*

**AUTORES:** Julián Andrés Jerez Suarez  
Omar Andrés García Baracaldo\*\*

**PALABRA CLAVE:** Simulación, Carga térmica, Sistemas pasivos de refrigeración, EnergyPlus, OpenStudio, GoogleSketchup

### DESCRIPCIÓN:

El modelado y simulación de edificaciones ha sido una de las herramientas más utilizadas a nivel mundial en la búsqueda de una visión más completa del desempeño que pueda llegar a tener previo a su construcción cualquier tipo de edificación, o de la misma manera implementar cambios que conlleven a un mejoramiento de dicho desempeño para una construcción dada, en la actualidad dentro de las características importantes a prever es su comportamiento térmico, todo esto en la búsqueda de poder mitigar de alguna manera los altos costos energéticos que implican mantener cualquier edificación y el confort para las personas que estas lo habiten, como también contribuir a la disminución del calentamiento global y el cambio climático.

Este proyecto busca una solución amigable con el medio ambiente en el cual se vean cuantificados ahorros de consumo de energía, para nuestro caso de estudio en un clima templado para recintos cerrados (VIP). Para esto se propone la simulación de un recinto real ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará (Piedecuesta), al cual se analizará su carga térmica teniendo en cuenta sus características constructivas y meteorológicas iniciales, en donde se le implementarán por medio de simulación, estrategias pasivas para la reducción de la demanda energética, seleccionando una combinación adecuada teniendo en cuenta su desempeño y su costo para su posterior implementación real en el recinto mencionado.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

## ABSTRACT

**TITLE:** DIAGNOSIS AND IMPROVEMENT OF THERMAL BEHAVIOR AND VENTILATION OF AN ENCLOSURE IN TEMPERATE CLIMATE FROM PASSIVE SYSTEMS\*

**AUTHORS:** Julián Andrés Jerez Suarez  
Omar Andrés García Baracaldo\*\*

**KEYWORDS:** Simulation, thermal load, passive systems of refrigeration, EnergyPlus, OpenStudio, GoogleSketchup

### DESCRIPTION:

The modelling and simulation of buildings has been one of the most useful tool in the world, in the search for a more complete vision of the performance prior to the construction of any type of building, or in the same way implement changes for the developing of a building, within the important characteristics to be foreseen is its thermal behavior, all of this in the search of mitigation of the high cost of energy that involve maintaining any build and the comfort for the people who inhabit it, and make a contribution to the reduction of global warming and climate change.

This project searches for a friendly solution with the environment in which quantified savings of energy consumptions can be seen, for our case of study, in a temperate climate for closed enclosures (VIP). For this we propose a simulation of a real enclosure located in the technological park of Guatiguará (Piedecuesta), to which its thermal load will be analyzed taking into account the constructive and meteorological characteristics, where it will be implemented simulation means, passive strategies for the reduction of the energy demand by selecting an appropriate combination taking into account its performance and its cost for the subsequent implementation in the aforementioned enclosure.

---

\* Project of degree

\*\*Faculty of Mechanical physical engineering. School of mechanical engineering. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

## INTRODUCCIÓN

El alto costo de la energía, el agotamiento de los recursos naturales y el calentamiento global, obligan actualmente a la búsqueda de estrategias de climatización alternativas, pues las necesidades para confort térmico se siguen solucionando por medios activos que utilizan energía convencional para funcionar, con el consecuente consumo de recursos naturales, emisiones no favorables al medio ambiente y altos costos energéticos.

El análisis de sistemas de climatización pasiva permite reducir la dependencia energética que tiene la sociedad actual en la obtención de confort óptimo en lugares habitables, en diferentes tipos de climas. Además, da la oportunidad de ahorro de costos y mano de obra comparado con unidades de refrigeración convencionales que requieren de instalación y energía para su funcionamiento, el enfoque hacia el mejoramiento y el poco uso de la energía se evalúa mediante software y luego se valida con estudios experimentales.

La herramienta computacional EnergyPlus permitirá el análisis de cada una de las opciones para el comportamiento térmico, observando las ventajas y desventajas de cada una de éstas en un enfoque de eficiencia y de costos, para continuar con la construcción de los diversos sistemas en conjunto encontrados en la simulación en el recinto piloto, buscando demostrar los beneficios numérica y experimentalmente, con esto se busca encontrar soluciones amigables hacia el medio ambiente, a los problemas actuales y de impacto ecológico.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Contribuir con el cumplimiento de la misión de la Universidad industrial de Santander y de la Escuela de Ingeniería Mecánica, mediante el análisis, la implementación y construcción de métodos que mejoren el confort térmico de un recinto ubicado en un clima templado (Piedecuesta), sin consumos extras de energía, evitando la dependencia tanto de combustibles fósiles como de las energías renovables.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un análisis de la carga térmica sensible en un recinto piloto ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará sin ninguna modificación, la cual tiene dimensiones de 2 metros de ancho por 5 metros de profundidad y 2.3 metros de altura.

Para lo cual se deberá:

- Calcular el calor que llega al recinto por radiación solar.
- Calcular la transferencia de calor por convección debido a los flujos de aire por el recinto.
- Calcular la carga térmica por transmisión y radiación por las paredes y el techo exterior.

- Simular el recinto aplicando medidas pasivas de climatización en paredes, ventanas y techo mediante software libre.

Para lo anterior se contempla:

- Diseñar mediante el software el recinto cerrado sin modificaciones
- Aplicar al diseño cada uno de los métodos pasivos de climatización en el siguiente orden establecido.
  - Techo: simulación por separado para la disminución del coeficiente de absorción, buscando un mayor factor de reflectividad
  - Paredes: simulación de sistemas con aislamiento térmico por el interior con diferentes tipos de material buscando disminuir la transferencia de calor hacia el interior de recinto.
  - Implementación de ventanas: Diseño, simulación y comparación de sistemas de ventilación natural (ventanas abiertas) y método cerrado con ventanas típicas y a termopanel, como también simulación de sombras en ventanas.
- Cuantificar la carga térmica sensible de cada uno de los métodos pasivos de climatización por medio del software y sus costos de implementación, buscando un óptimo balance entre confort y economía de un diseño para la vivienda piloto en un clima templado.
- Seleccionar y construir la mejor combinación de métodos obtenidos en la simulación, realizando un análisis experimental de los mismos, demostrando los beneficios numéricos y experimentalmente

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático actual se presenta como el problema ambiental más crítico de este siglo y uno de los mayores desafíos globales a los que se enfrenta el ser humano (IPCC, 2015<sup>1</sup>). Asimismo, las Naciones Unidas (UN, 2015<sup>2</sup>), establecen que una de las grandes causas del calentamiento global es provocado por el continuo aumento en la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático<sup>3</sup> recalca que los edificios representaban el 30% del consumo de energía del total mundial y el 17% de las emisiones GEI, así como también recomienda varios métodos para mitigar los problemas ambientales a los que nos estamos enfrentando.

En Colombia según el ministerio de minas y energía<sup>4</sup> el consumo final de energía nacional en el sector residencial significa un 21,2% del total consumido en Colombia (52.963 Gwh), donde los electrodomésticos, la iluminación y la climatización son los principales factores del consumo en las principales ciudades de Colombia donde se ha realizado este análisis (Bogotá, Medellín, Barranquilla, Pasto). Colombia es

---

<sup>1</sup> Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Cambio climático 2014: Causas del cambio climático. En: IPCC Disponible en: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf). Fecha de consulta: 31 de octubre de 2016

<sup>2</sup> NACIONES UNIDAS. Convención Marco sobre el Cambio Climático 2015: París. Aprobación de acuerdo de París. En: UN [en línea] Disponible en: <http://www.un.org/press/docs/2015/20151215.unfccc.cmpa.es.shtml> Fecha de consulta: 31 de octubre de 2016

<sup>3</sup> El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es el principal órgano internacional para la evaluación del cambio climático. Fue creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1988 para ofrecer al mundo una visión científica clara del estado actual de los conocimientos sobre el cambio climático y sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas.

<sup>4</sup> MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales - proude. Grafico 22. Participación del consumo final de energía por sectores - 2008.

uno de los países con los precios energéticos más altos a nivel de América Latina después de Chile e igualando a Brasil, siendo en 2015 incluso más altas que las tarifas energéticas de USA<sup>5</sup>, durante los últimos años en nuestro país se han vivido crisis energéticas, gracias a las pérdidas de las plantas térmicas, que están enfrentando problemas financieros por un aumento sustancial en sus costos, haciendo que el costo de un aire acondicionado no solo sea fuerte en su instalación y mantenimiento, sino también en su alimentación día a día.

Colombia es un país con diversidad de climas dependientes de los aspectos geográficos y atmosféricos, pero tanto en territorios con climas templados y cálidos es usual el uso de sistemas de climatización, los cuales requieren alimentación eléctrica, haciendo que la demanda de energía para las viviendas sea cada vez mayor<sup>6</sup>, también se debe tener en cuenta que el gobierno y las empresas privadas tratan de aumentar la oferta de vivienda para los estratos medios y bajos.

Teniendo en cuenta que actualmente en proyectos de vivienda de interés social prioritario, se tiene como preferencia la masificación de construcción de viviendas a gran escala, sin tener en cuenta aspectos fundamentales como el confort térmico y la sostenibilidad de dichas viviendas a lo largo de los años para albergar a personas de más escasos recursos. Estas personas en muchos casos acceden a las viviendas pero posteriormente no pueden afrontar el pago de una factura de consumo energético elevada.

---

<sup>5</sup> OTERO PRADA, Diego. “Altos precios de la energía eléctrica en Colombia” Disponible en: <http://www.razonpublica.com/index.php/econom%C3%ADa-y-sociedad/8742-los-altos-precios-de-la-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica-en-colombia.html>. Fecha de publicación: 30 de Noviembre de 2016.

<sup>6</sup> MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales - proude. Gráfico 9. Proyección de la demanda final de energía - 2008. En: Ministerio de Minas y energía. Disponible en: [https://www.minminas.gov.co/documents/10180/558752/Informe\\_Final\\_Consultoria\\_Plan\\_de\\_accion\\_Procedure.pdf/e8cdf796-d7b1-4bb1-90b9-e756c7f48347](https://www.minminas.gov.co/documents/10180/558752/Informe_Final_Consultoria_Plan_de_accion_Procedure.pdf/e8cdf796-d7b1-4bb1-90b9-e756c7f48347) Fecha de consulta: 31 de octubre de 2016

## 2.2 MARCO TEÓRICO

Para la realización adecuada del proyecto es necesario establecer ciertos conceptos y fenómenos que se tendrán en cuenta dentro del desarrollo de los objetivos ya planteados, en donde la termodinámica y la transferencia de calor serán fundamentales. Igualmente conceptos teóricos implementados en la realización del proyecto y de las herramientas computacionales que se implementaran: EnergyPlus, Google SketchUP y OpenStudio

Todo lo anterior se enfoca al análisis de un recinto que interactúa con un medio a cierta temperatura, centrándonos principalmente en el mejoramiento del comportamiento térmico del recinto implementando métodos de climatización pasiva.

**2.2.1 Transferencia de calor.** La termodinámica es el estudio de los estados de equilibrio y de la cantidad de energía que un sistema gana o pierde a medida que pasa de un estado estable a otro, pero la ingeniería también está interesada en la rapidez de esta interacción de energías, así que es ahí donde se constituye el tema de la transferencia de calor<sup>7</sup>, el cual se enfoca en las tasas de energía transferida por unidades de tiempo, dando una idea clara de cuánto tarda en calentarse un trozo de acero en una fragua y en el caso del proyecto, en como la cantidad de energía dada por la radiación solar afecta la temperatura interna de un recinto durante un día caluroso y que cantidad de energía puede evitar transmitirse.

Ya que el sistema a desarrollar es un modelo para el aislamiento de un recinto, se debe entender los mecanismos de la transferencia de calor, los cuales se tratan de

---

<sup>7</sup> CENGEL, Yunes. Termodinámica y transferencia de calor en: Transferencia de Calor y masa. Introducción y conceptos básicos. Cuarta Edición. Mc Graw Hill 2011. P. 1.

modificar para la climatización pasiva, un objetivo es permitir que en días muy cálidos el calor del exterior no entre con la misma facilidad al interior, lo cual se puede lograr con diversas capas de materiales en las paredes del recinto o modificaciones en el techo o agregando modificaciones en las ventanas.

Se sabe que el calor es la energía que se transfiere entre dos sistemas, o un sistema y su exterior gracias a la diferencia de temperatura<sup>8</sup>, es decir, sin una diferencia de la temperatura no existirá una transferencia de calor y nos indicaría que el estado es invariante o estable.

**2.2.2 Mecanismos de transferencia de calor.** Las diferentes energías presentes en el medio ambiente, alrededor del recinto se transmitirán por conducción, convección y radiación hacia el interior del recinto.

**2.2.2.1 Conducción<sup>9</sup>.** Se considera como la transferencia de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas, este tipo de transferencia de calor requiere del contacto directo entre los diferentes cuerpos.

$$Q_x'' = -k * A * \frac{dT}{dx} \text{ [W]}$$

Donde:

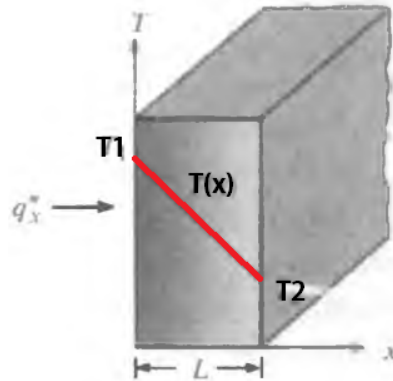
- K es la conductividad térmica del material (w/m\*K).
- A es el área de la sección perpendicular por donde atraviesa la energía.
- Dx es el espesor que recorre la energía.

---

<sup>8</sup> CENGEL, Yunes. Termodinámica y transferencia de calor en: Transferencia de Calor y masa. Introducción y conceptos básicos. Cuarta Edición. Mc Graw Hill 2011. P. 60.

<sup>9</sup> INCROPERA, Frank. Introducción. En: Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Pablo Eduardo Roig Vázquez, 1999. P. 3.

**Figura 1. Transferencia unidimensional de calor por conducción.**



Fuente: Fundamentos de Transferencia de Calor Incropera [23]

**2.2.2.2 Convección<sup>10</sup>.** Es la transferencia de calor que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante.

$$Q'' = hA_s(T_s - T_a) \quad [W]$$

Donde:

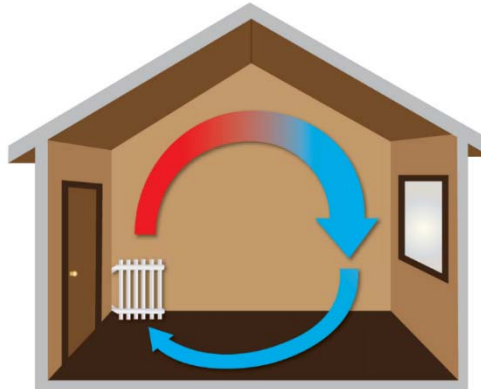
- $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2 \cdot K$ ).
- $A_s$  es el área superficial donde ocurre la transferencia de calor en contacto con el fluido.

Dentro de la transferencia de calor por convección existen dos tipos importantes a tener en cuenta, el primero es la convección natural, la cual se da por la diferencia de temperaturas del fluido y por la fuerza de flotabilidad, pues el fluido más caliente tendera a subir y a ser reemplazado por el fluido con menor temperatura, para un caso concreto como un recinto cerrado, en donde la posibilidad de tener una corriente de aire es bajo, se tendrá convección natural (ver figura 2).

---

<sup>10</sup> INCROPERA, Frank. Introducción. En: Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Pablo Eduardo Roig Vázquez, 1999. P. 5.

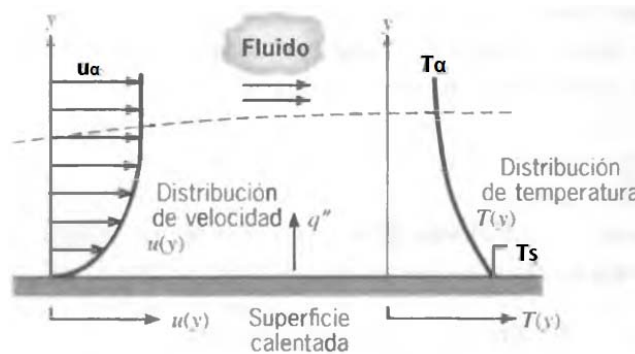
**Figura 2. Convección natural en un recinto cerrado.**



Fuente: Casas restauradas, diseño de una vivienda sostenible. Disponible en: <http://www.casasrestauradas.com/diseño-de-una-vivienda-sostenible-fachadas/>

Por otro lado la convección forzada presenta una velocidad del fluido que pueden ser generadas de forma mecánica como una bomba o un soplador, o de manera natural como corrientes de aire (ver figura 3). La fórmula para el cálculo de calor para estas dos convecciones es la misma, lo que difiere es el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$ , en donde para convección natural este valor es mucho menor comparado a la convección forzada.

**Figura 3. Desarrollo de la capa límite de la transferencia de calor por convección forzada.**



Fuente: Fundamentos de Transferencia de Calor Incropera

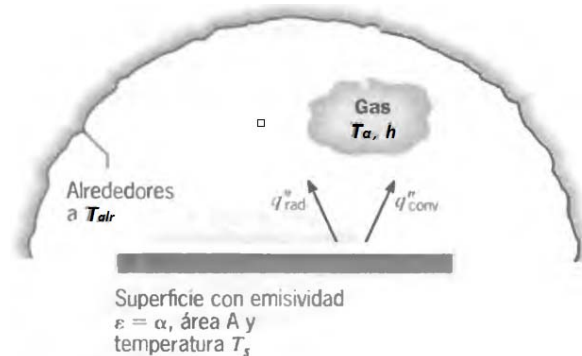
**2.2.2.3 Radiación:**<sup>11</sup> Es la energía emitida por la materia que se encuentra a temperatura finita, la energía por radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente fotones) por tanto puede existir una transferencia de calor sin requerir de un medio de transmisión, como si lo requieren la convección y la conducción, su cálculo analítico viene dado por la siguiente ecuación.

$$Q''_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{air}^4) \text{ [W]}$$

Donde:

- $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie que puede tomar un valor entre 0 y 1.
- $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzman  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$
- A es el área de transferencia de calor por radiación.
- $T_s$  es la temperatura de la superficie en análisis.
- $T_{air}$  es la temperatura de los alrededores.

**Figura 4. Intercambio de calor por radiación y convección de una superficie.**



Fuente: Fundamentos de Transferencia de Calor Incropera

<sup>11</sup> INCROPERA, Frank. Introducción. En: Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Pablo Eduardo Roig Vázquez, 1999. P. 3.

**2.2.3 Carga térmica.**<sup>12</sup> También nombrada como carga de enfriamiento, se denomina como la cantidad de energía que se necesita en determinada área, para conservar unas condiciones deseadas de temperatura y humedad, esta energía necesaria, comúnmente se calcula para poder dimensionar de manera adecuada los sistemas de refrigeración, donde comercialmente se calculan y se especifican por su capacidad en toneladas de refrigeración, la cual equivale a 3,517 Kw.

Si el recinto no dispone de climatización, su temperatura se adaptará a la del ambiente, tendiendo en la mayoría de los casos a una temperatura más alta que la del ambiente, pero esto depende de muchos factores de construcción, como su orientación, el número de ventanas, la ubicación del recinto y los materiales de construcción.

**2.2.3.1 Cargas externas.**<sup>13</sup> Son aquellas que provienen del exterior del recinto en análisis, tales como:

- Cargas a través de las paredes.
- Cargas a través de las superficies acristaladas, ventanas y claraboyas.
- Cargas por ventilación del aire exterior.
- Cargas a través del techo por radiación solar.

Todas las cargas anteriormente nombradas se presentan como cargas sensibles al recinto.

Para el cálculo de la carga externa sensible total  $Q_s$  se usa la siguiente expresión<sup>14</sup>.

---

<sup>12</sup> DÍAZ, Victorio Santiago. Condiciones de diseño - estudio de cargas térmicas En: Acondicionamiento térmico de edificios. Buenos Aires Editorial Nobuko, 2005 P. 47.

<sup>13</sup> DÍAZ, Óp. Cit. 47-49

$$Q_s = Q_{rsv} + Q_{tt} + Q_{tp} + Q_{cv}$$

$Q_{rsv}$  Es el calor por radiación que entra por las ventanas acristaladas.

$Q_{tp}$  Es el calor que se transmite por las paredes desde el exterior.

$Q_{tt}$  Es el calor que se transmite por el techo desde el exterior.

$Q_{cv}$  Es el calor que se intercambia con el flujo de aire que entra a la casa

- **Calor por radiación que entra por las ventanas acristaladas**<sup>15</sup>. Para iniciar el análisis de las ventanas se debe tener en cuenta que el vidrio permite que la radiación visible llegue a profundidades considerables, antes de que se presente la absorción por parte de la superficie, el material al no ser opaco presenta tres propiedades relativas a la radiación solar la absorptividad, la reflectividad y la transmisividad, mientras que en materiales opacos solo se presenta la transmisividad y la absorptividad.
- **Calor que se transmite por las paredes desde el exterior.** El fenómeno de la transferencia de calor por conducción se ve presente en las paredes del recinto, ya que dependiendo del material de las paredes y su espesor el calor que pase por estas puede ser mayor o menor. Se define:

$$Q_{tp} = -(K * A) * \frac{dT}{dx}$$

Donde:

(A) Es el área por donde pasa el calor en forma perpendicular.

(K) La conductividad térmica de la pared a estudiar (W/m\*K)

(dx) Depende del espesor de la pared.

(dT) Es la variación de temperatura puede ir desde la temperatura del ambiente exterior hasta el interior.

---

<sup>15</sup> CENGEL, Óp. Cit. P704

- **Calor que se transmite por el techo desde el exterior.** El fenómeno de la transferencia de calor por conducción se ve presente también en el techo del recinto, ya que dependiendo del material de este y su espesor, el calor que pase por este puede ser mayor o menor. Se define como:

$$Q_{tt} = -(K_t * A_t) * \frac{dT}{dx}$$

Donde:

( $A_t$ ) Es el área de la sección lateral del techo por donde pasa el calor en forma perpendicular.

( $K_t$ ) La conductividad térmica del techo a estudiar ( $W/m^*K$ )

( $dx$ ) Depende del espesor del techo.

( $dT$ ) Es la variación de la temperatura desde el ambiente exterior hacia el interior del techo.

- **Calor que se intercambia con el flujo de aire que entra al recinto.** Si se implementa un sistema con ventanas abiertas habrán corrientes de aire que entren al recinto, aireando el interior generando transferencia de calor. Se define:

$$Q_{cv} = \rho * V * C_{p_{aire}} * \Delta T$$

Siendo:

- $\rho$  la densidad del aire ( $1.18 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ )
- $V$  el caudal volumétrico de aire que entra desde el exterior ( $m^3/s$ )
- $C_{p_{aire}}$  es el calor específico del aire ( $1212 \frac{J}{Kg^*^{\circ}C}$ )
- $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior y el interior.

**2.2.3.4 Cargas internas**<sup>16</sup>. Las cargas internas se evalúan más en edificaciones, ya sea para vivienda u oficina, pues estas cargas dependen de las emisiones de calor dadas por los ocupantes, la iluminación y los aparatos eléctricos en sus horas de funcionamiento normal, es decir, tanto los ocupantes, como la iluminación y la electrónica aumentan la temperatura del aire del recinto.

**2.2.4 Cálculo de carga térmica.** Dentro de un recinto será la suma de la carga sensible y la carga latente, se debe tener presente que las condiciones climáticas a las que se verá expuesto el recinto serán diferentes y de la misma manera se deberá realizar el cálculo de la carga térmica total en el momento del día que la carga llegue a su pico máximo, el cual se presentará cuando las condiciones ambientales de ese día sean caracterizadas por radiaciones solares altas y corrientes de aire bajas.

$$Q_T = Q_L + Q_S$$

**2.2.5 Confort térmico**<sup>17</sup>. Está definido como el estado de sensación de bienestar físico de las personas, en base a las condiciones ambientales a las que el sujeto este rodeado. En donde los factores que pueden afectar este término se pueden clasificar en las que dependen del individuo y las que dependen del medio ambiente.

El cuerpo por lo general representa una fuente de calor al ambiente, el cual se puede llegar a producir por los siguientes factores que gráficamente se ven en la figura 5:

- Radiación de la superficie de la piel y la vestimenta a la paredes y demás objetos que estén a su alrededor.
- Conducción y convección de la superficie de la piel y de la vestimenta al aire del

---

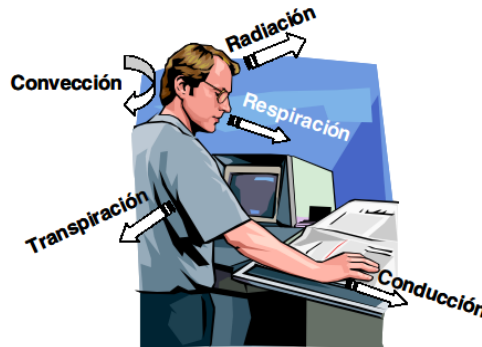
<sup>16</sup> DÍAZ, Óp. Cit. P 79.

<sup>17</sup> Ibid, P 41.

recinto

- Evaporación del vapor de agua por la transpiración.
- Respiración caliente y prácticamente saturada de humedad.

**Figura 5. Factores dependientes del individuo.**



Fuente: DÍAZ, Victorio. Acondicionamiento térmico de edificios.

El calor transmitido por radiación, conducción y convección se denota como el calor sensible del cuerpo humano, mientras que el calor por evaporación y respiración se denomina calor latente del cuerpo humano, la suma de estos dos calores dependerán en gran medida de la edad, la dimensión, la condición física, el sexo y su vestimenta, por lo cual la suma del calor sensible y de calor latente permanecerá constante para diferentes temperaturas.

$$Q_{L-corporal} = Q_{S-corporal}$$

El mejoramiento de confort térmico se dará cuando el calor sensible y latente del cuerpo sean iguales.

Dentro de los factores del medio ambiente que afectan el confort térmico está la temperatura media del recinto, la humedad relativa y la velocidad del aire. Como se

puede analizar el confort térmico depende de muchas variables y no hay valores absolutos con lo que se pueda determinar exactamente, ya que la sensación para cada individuo puede llegar a ser diferente por factores independientes como lo pueden ser el grado de fatiga, el estado de salud, alimentación y el modo de vivir. Dentro de unas recomendaciones generales dadas por la ASHRAE, para un confort térmico adecuado se tiene que<sup>18</sup>:

- La temperatura del aire para refrigeración debe estar entre 23 y 25 °C.
- La temperatura de rocío no debe ser menor a 2 °C evitando de esta manera, la sequedad en nariz, garganta, ojos y piel.
- La humedad relativa no debe superar el 60%
- La velocidad del aire dentro del recinto no debe superar 0,25 m/s para recintos que se encuentren en ambientes no calurosos y 0,5 m/s para ambientes calurosos.

En el desarrollo del proyecto se tendrá en cuenta únicamente los valores de temperatura interna del recinto de análisis, el cual será la variable a analizar durante todo el proyecto.

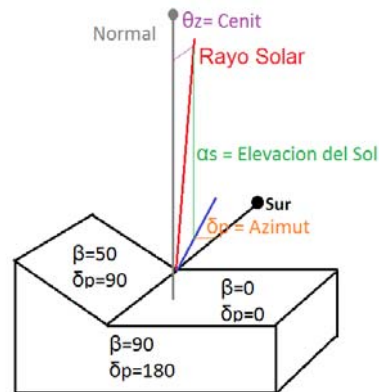
**2.2.6 Posicionamiento solar<sup>19</sup>.** Los factores que determinan la cantidad de energía solar que puede transformarse en energía útil son la dirección de los rayos de radiación respecto de la superficie del colector y la magnitud de la radiación  $I_b$ [W/m<sup>2</sup>]. Las ecuaciones para el cálculo teórico de ángulos solares y cálculo de radiación incidente sobre una superficie se pueden observar en el Anexo A.

---

<sup>18</sup> ASHRAE, Handbook Fundamentals. Atlanta:ASHRAE research, 2009.

<sup>19</sup> DUFFIE, John & BECKMAN, William. Solar Engineering of Thermal Processes: Direction of Beam Radiation. 4ta Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, inc. 2013. P 12.

**Figura 6. Ángulos de un rayo incidente.**



**2.2.7 Métodos pasivos de climatización.** Dentro de las formas para poder acondicionar un recinto, se pueden encontrar dos grandes grupos, existen las estrategias pasivas y activas. Se denomina estrategia pasiva a aquellas que no implican un gasto energético para favorecer al acondicionamiento, si no por el contrario busca de forma natural, por medio ya sea de sus propiedades como material, su forma, distribución, orientación o diseño que logren disminuir la carga térmica que posea un determinado recinto.

Dentro de los sistemas pasivos de enfriamiento se pueden clasificar dependiendo de los factores ambientales que se pueden llegar a controlar.<sup>20</sup>

- Movimiento del aire.
- Temperatura del aire.
- Radiación.
- Humedad.

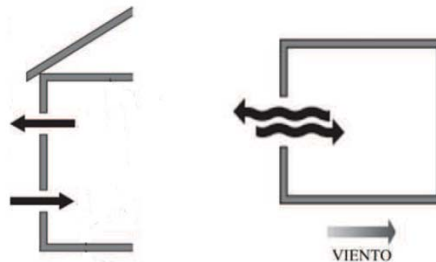
---

<sup>20</sup> Universidad Rafaela Urdaneta, Acondicionamiento ambiental, Escuela de Arquitectura [Diapositivas]

**2.2.7.1 Ventilación Natural<sup>21</sup>.** La ventilación ocurre como el resultado de presiones creadas sobre un recinto, en donde las diferencias de presiones (interna y externa) producen un flujo de aire hacia el interior del edificio. Estas medidas pasivas se utilizan cuando la temperatura ambiente es inferior a la temperatura de confort deseada, con el fin de poder realizar el enfriamiento esperado.

- **Ventilación Unilateral.** Es aquella que toma el efecto de la flotabilidad térmica únicamente con aberturas a un solo lado del recinto, es decir que por el mismo lado que ingresa el flujo de aire y por el mismo lado se extrae como se indica en la figura 7.

**Figura 7. Ventilación unilateral.**

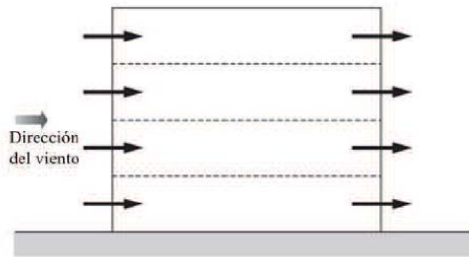


- **Ventilación cruzada.** Este tipo de ventilación se caracteriza por el flujo entre dos fachadas opuestas como se puede observar en la figura 8. Esta ventilación crea una diferencia de presiones en la entrada y salida del aire, la aplicación de este método es uno de los más usados en cuanto a ventilación natural se refiere.

---

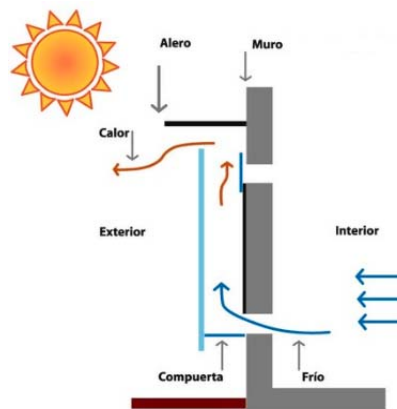
<sup>21</sup> KASTILLO, Juan Pablo. Optimización energética para el aprovechamiento de ventilación natural en edificaciones en climas cálidos del ecuador. Trabajo de grado tesis de Ingeniería. Quito. Universidad Politécnica Nacional. 2015. P 7

**Figura 8. Ventilación cruzada.**



- **Pared trombe**<sup>22</sup>. Su diseño consiste en una superficie acristalada y una superficie de gran capacidad térmica, entre ellos circulará un flujo de aire que por su tipo de construcción como se muestra en la figura 9, capta radiación solar directa en el cristal, produciendo una diferencia de temperaturas, creando un flujo de aire, promoviendo una ventilación natural en un recinto en donde sus condiciones de velocidad de aire exterior sea lo suficiente para lograr un flujo continuo.

**Figura 9. Muro Trombe.**

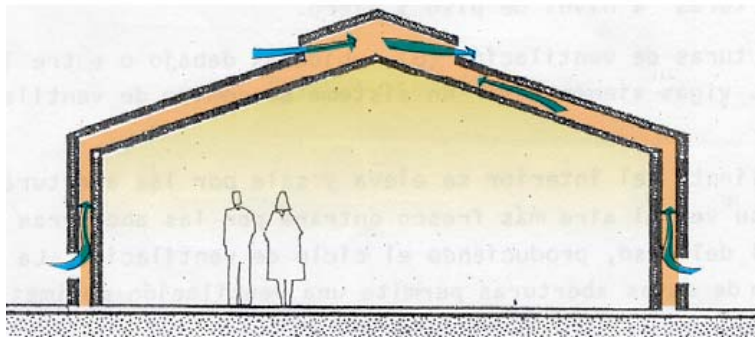


Fuente en detalle: un muro trombe. Disponible en: <http://www.archdaily.co/co/02-68622/en-detalle-muro-trombe>.

<sup>22</sup> DE JUANA, José María. Aprovechamiento pasivo en: Energías renovables para el desarrollo, Thomson ediciones Spain edición 2008 P. 90-92

- **Fachadas ventiladas dobles.** Este sistema consiste en manejar paredes dobles, que se pueden aplicar en diferentes posiciones según la necesidad y el comportamiento ambiental donde se requiera aplicar este método, ya que si en el terreno del recinto cuenta con una gran variabilidad de direcciones de viento se podría plantear la utilización de fachadas dobles por todo el recinto, en donde el aire calentado por el sol se eleva dentro de las cavidades de la pared arrastrando por la parte inferior de las paredes el aire más fresco como se muestra en la figura 10.

**Figura 10. Sistema de doble fachada.**



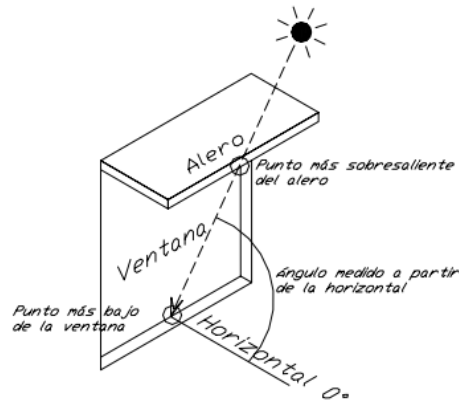
**2.2.7.2 Reducción de radiación<sup>23</sup>:** El uso de dispositivos de control solar es uno de los más importantes a la hora de buscar reducir el consumo energético y mejoramiento del comportamiento térmico dentro de los elementos pasivos de climatización, pues es la radiación solar uno de los factores externos que más impacta las condiciones internas de un recinto. Dentro de estos métodos se busca que los elementos a utilizar ayuden a evitar que la radiación directa y difusa logren incidir al interior del recinto de forma rápida.

---

<sup>23</sup> MORILLÓN, David. Principios básicos del control solar en: Modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios. Instituto de ingeniería UNAM, 2004. P 25.

- **Aleros.** Son dispositivos horizontales que sobresalen de la parte superior de la ventana, el cual evita el paso de la radiación solar. Estos dispositivos se caracterizan según su ángulo de protección, el cual forma un plano horizontal en la base de la ventana y una línea imaginaria que une la parte más alejada del alero con el punto más bajo de la ventana como se puede observar en la figura 11.<sup>24</sup>

**Figura 11. Sistema de alero en ventana.**



---

<sup>24</sup> Ibíd. P 39

**Tabla 1. Clasificación de protección solar horizontal<sup>25</sup>.**

	FORMA	POSICIÓN RELATIVA		
		PERPENDICULARES	PARALELOS	OBLICUOS
<b>HORIZONTALES</b>	RECTOS			
	CURVOS			
	QUEBRADOS			
	MIXTOS			

- **Partesol.** Son elementos verticales que se ubican cerca de las ventanas, con el fin de obstruir la componente horizontal de la radiación solar, con gran énfasis en su funcionamiento en las horas de salida y puesta de sol. Estos dispositivos se caracterizan por su ángulo de protección que viene dado por el plano vertical de la ventana y una línea imaginaria que une el punto más alejado del partesol al opuesto de la ventana como se puede observar en la figura 12.

<sup>25</sup> GONZÁLEZ, Dania; MARTÍNEZ, Rolando. Sistema de elementos de protección solar para los edificios en Cuba. .En: Arquitectura y Urbanismo. 2014.

Figura 12. Sistema de partesoal en ventana simple.

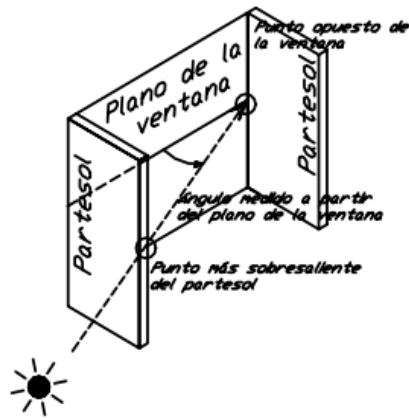


Tabla 2. Clasificación de protectores solares verticales<sup>26</sup>.

	FORMA	POSICIÓN RELATIVA		
		PERPENDICULARES	PARALELOS	OBLICUOS
VERTICALES	RECTOS			
	CURVOS			
	QUEBRADOS			
	MIXTOS			

- **Elementos combinados.** Dentro de los elementos combinados se extienden varias aplicaciones que son combinaciones de los diferentes tipos de forma y posición relativa entre aleros y parte soles, de los cuales se destacan el marco que está formado básicamente por un alero y un partesoal simple, y comercialmente se conocen como celosía o postigos.

<sup>26</sup> GONZÁLEZ, MARTÍNEZ, Óp. Cit.

**2.2.7.3 Aplicaciones reflectoras.** Este tipo de aplicaciones busca de manera concreta reflejar la radiación solar sobre las superficies del recinto, con el fin de reducir la cantidad de calor que pueda llegar a ingresar a las superficies, dentro de estas aplicaciones se busca principalmente que tengan una alta reflectividad y emisividad. Estas características se encuentran en gran número de productos en forma de pinturas (ver figura 13), esmaltes, estucos y resinas aplicables en la parte externa del recinto.

**Figura 13. Aplicación de pintura térmica reflectora.**



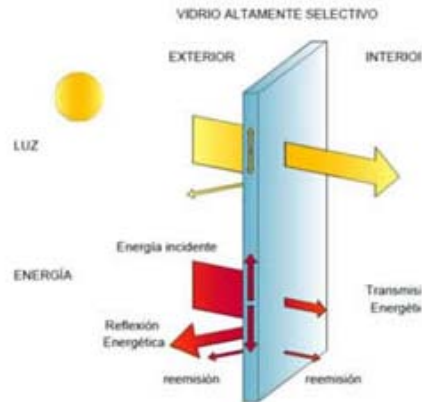
**2.2.7.4 Vidrios aislantes<sup>27</sup>.** Es claro que en la mayoría de los casos, las superficies donde están ubicados los acristalamientos, son las zonas térmicas más débiles de un recinto, pero en la actualidad, los cerramientos acristalados han evolucionado permitiendo dar una mayor respuesta a las exigencias térmicas y de diseño.

- **Vidrios mono capa.** Vidrios mono capa de acristalamiento neutro de control solar, el cual es considerado de primer nivel en vidrios selectivos, pues tiene la característica de poder seleccionar la radiación que va dejar pasar al recinto, frenando así las radiaciones energéticas y permitiendo el paso a la luz (ver figura 14).

---

<sup>27</sup> Comunidad de Madrid. Unidades de vidrio aislantes en: Guía sobre materiales aislantes y eficiencia energética. M22032-2012. Madrid, 2012. P 129

**Figura 14. Vidrio mono capa de acristalamiento neutro de control solar.**



- **Ventanas a termo panel.** Para este tipo de aplicación hay una definición importante denominado UVA (Unidad De Vidrio Aislante), el cual representa como mínimo dos paneles de vidrio, separados por uno a más espacios en los que tendrán presente un gas, por lo tanto deben estar sellados herméticamente. El valor de este concepto se toma en función del tipo de espaciador utilizado, tipo de sellado, y contenido de la cámara que separa las dos o tres capas de vidrio en cuestión. Referente a los tipos de ventanas a termo panel se pueden encontrar las simples (ver figura 15), las cuales están formadas por dos vidrios y una cámara de aire deshidratado sin ningún tratamiento especial, así como también se puede agregar un gas diferente en vez del aire, y su mejora en rendimiento no es muy significativa.

**Figura 15. Ventana a termopanel simple.**



Otro tipo de acristalamiento es el térmico reforzado o ATR, en este grupo de ventanas a termo panel se encuentra la utilización de vidrios de baja emisividad, los cuales son utilizados para mantener recintos con una temperatura mayor a la del ambiente, especial para zonas con temporadas de invierno, como también pueden contribuir a la alta reducción de la transmitancia térmica de la UVA.

**2.2.7.5 Retraso de la inercia térmica.** Inicialmente el término de inercia térmica se refiere básicamente a la capacidad que tiene una masa, para nuestro caso un recinto de conservar la energía térmica recibida, esta depende de la masa, del calor específico y del coeficiente de conductividad térmica de los materiales que componen cualquier recinto, local o edificio. La inercia térmica se utiliza para un diseño óptimo en el desempeño térmico, buscando conservar la temperatura del interior lo más estable posible a lo largo del día, por medio de los materiales de construcción de los que estén fabricados principalmente las paredes y techos del recinto. Se debe tener presente que la inercia térmica conlleva consigo dos términos importantes: Amortiguamiento y Retraso (ver figura 16).

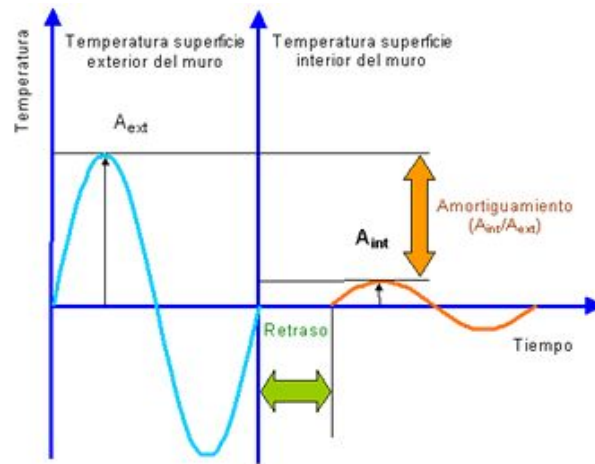
- El retraso<sup>28</sup>: Es el tiempo transcurrido desde que la parte de calor absorbida por un muro llega a la cara opuesta.
- Amortiguamiento<sup>29</sup>: Es la diferencia de energía que hay entre la cara expuesta del muro y la interior.

---

<sup>28</sup> ROUX, Rubén; GALLEGOS, Diana. Construcción sustentable, análisis de retraso térmico a bloques de tierra comprimidos. Revista de la facultad de arquitectura universidad autónoma de nuevo león, 2015 P 59.71

<sup>29</sup> *Ibíd.*

**Figura 16. Gráficas de amortiguamiento y retraso.**



Fuente: ClimaBlock, Construcción sostenible, Inercia térmica. Disponible en: <http://www.climablock.com/Construccion%20Sostenible-02.06-Inercia-termica-Bloque-aislante.htm>

Principalmente la aplicación de aislamiento térmico dentro de los recintos, tiene como función aumentar el retraso del paso del calor por muros y techo de cualquier recinto, logrando así, que el pico de temperatura se dé después de un tiempo transcurrido con lo que permite que la temperatura ambiente ya no esté tan elevada o ya esté disminuyendo gracias al retraso del aislamiento térmico.

### 3. SOFTWARE DE SIMULACIÓN

En el desarrollo del proyecto se plantea el uso de software libre EnergyPlus, que al ser uno de los mejores motores de cálculo térmico libre que hay en la actualidad, puede trabajar de la mano con OpenStudio y SketchUp, los cuales le dan un rango de trabajo mucho mayor, lo que permite la utilización del mismo a un nivel avanzado sin la necesidad de utilizar el entorno básico de EnergyPlus, en el cual en sus capacidades gráficas y de programación es bastante limitado.

#### 3.1 ENERGY PLUS

Este programa es una herramienta utilizada para cálculo de balances térmicos creado por el *U.S department of energy*, el cual posee un motor de cálculo a partir de las herramientas de simulación DOE-2 y BLAST, actualmente es utilizado por arquitectos e ingenieros para poder definir las necesidades energéticas de cualquier establecimiento, optimizar el rendimiento térmico, y en definitiva mejorar la eficiencia basado en sus condiciones térmicas específicas.

**3.1.1 Posibilidades de EnergyPlus.** El software se destaca por tener la capacidad para realizar soluciones integrales en zonas térmicas que tengan interacciones tanto externas como sistemas HVAC, simular climatización, muestras temporales, el usuario puede definir intervalos de tiempo para la interacción entre las zonas térmicas, temperatura ambiente y de los sistemas, realizar cálculos de conducción de calor transitoria a través de elementos de construcción tales como paredes, techos, pisos, etc. Posibilita realizar cálculos de acristalamientos para el análisis de métodos de eficiencia térmica en ventanas.

**3.1.2 Modelo energético.**<sup>30</sup> En EnergyPlus, el espacio de análisis es dividido en zonas térmicas, estas comprenden un volumen de aire a temperatura uniforme y superficies de transferencia o almacenamiento de calor, internas o que las bordean en cada zona, en ellas se plantea el balance de calor que tiene en cuenta la energía almacenada en el aire de la zona, el calor específico, la suma de cargas internas convectivas, la transferencia de calor convectivo desde las superficies de la zona, la transferencia de calor por mezcla de aire entre zonas, fuentes y sumideros si existen sistemas de climatización.

**3.1.3 Función del IDF.** Es la interfaz de manipulación de EnergyPlus donde se pueden añadir todas las características del recinto a simular, cabe aclarar que este IDF cuenta con una interfaz de difícil manipulación y no cuenta con una interfaz visual para un diseño de los recintos a analizar y es por esto la razón de la utilización de OpenStudio y SketchUp, en donde Sketchup se encarga de la parte geométrica y OpenStudio del modelamiento de sistemas, el cálculo y la visualización de resultados, Energy Plus en casos muy necesarios para modelamientos más complejos.

## 3.2 SKETCHUP

Este software está desarrollado para las etapas conceptuales del diseño, el cual es un programa de diseño en tres dimensiones fácil de utilizar y extremadamente potente, en donde combina un conjunto de herramientas sencillas (ver figura 17) y facilitan el diseño estructural de cualquier tipo edificación.

---

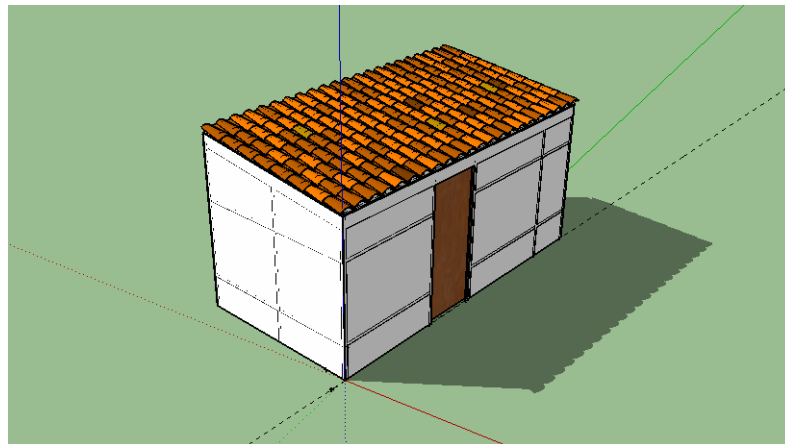
<sup>30</sup> U.S department of Energy. EnergyPlus versión 8.8.0 Documentation, Engineering Reference, septiembre, 2017, ref 94fe00376f. [en línea] <  
[https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v8.8.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.8.0/EngineeringReference.pdf)> [20 de Noviembre de 2016]

**Figura 17. Pantalla lista para el uso de SketchUp.**



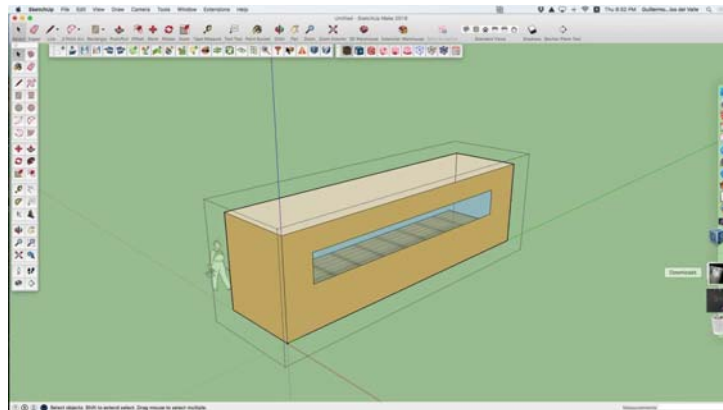
El programa permite darle detalles de materiales al modelo dándole un mayor realismo a la simulación (ver figura 18), recordando que este programa solo realiza la parte visual y geométrica para la unión con los otros dos programas logrando un análisis térmico de la manera más real y exacta posible, utilizando programas dedicados específicamente a tareas o funciones para lo que están verdaderamente calificados.

**Figura 18. Modelo terminado en SketchUp.**



Las herramientas relacionadas a la simulación térmica se centran en la creación de zonas térmicas (ver figura 19), las cuales se crean en este programa y serán sobre estas, en las que posteriormente se trabajarán más específicamente en OpenStudio. Sobre esta zona térmica se pueden realizar los diseños relacionados con las puertas, las ventanas, los números de niveles de la edificación y características de sombras de una manera gráfica y precisa.

**Figura 19. Zona térmica en SketchUp.**

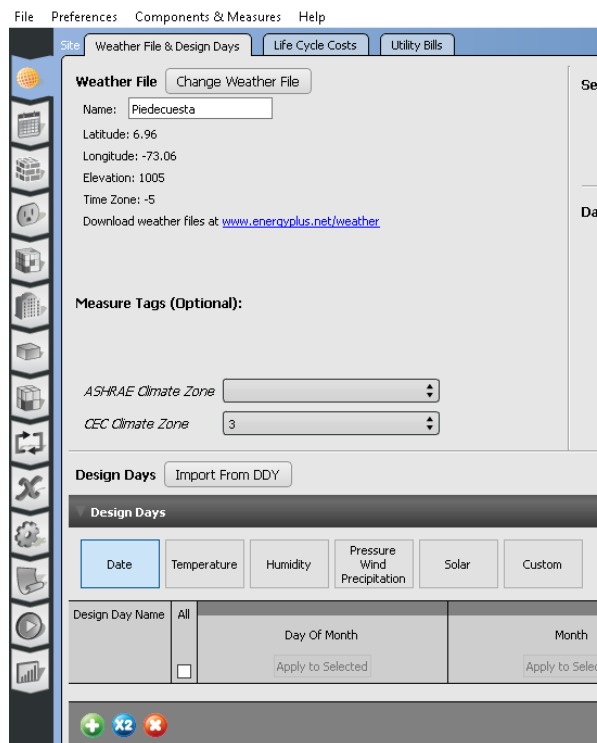


### 3.3 OPENSTUDIO

Este programa es un conjunto de aplicaciones que permiten modelar edificios y simularlos con EnergyPlus. Este plugin permite lanzar simulaciones en EnergyPlus y ver los resultados sin dejar SketchUp, para lo cual este elemento permite interactuar entre los dos programas en actividades como: crear, abrir y guardar archivos comunes, crear nuevas zonas en los dos programas, opción de perfilador en donde muestra todos los objetos que existen en el modelo y todas las zonas diferentes existentes, podemos iniciar la simulación desde este plugin en donde podremos ajustando las opciones de control desde el mismo.

La importancia de la utilización de OpenStudio es su facilidad y su favorabilidad para el uso del usuario, su interfaz viene subdividida por 14 pestañas en la parte izquierda como se puede observar en la figura 20, donde cada opción tiene una gran variedad de posibilidades en las cuales se podrá ingresar el fichero climático del que el programa se va a basar en sus cálculos, los horarios interiores, en el cual se crea o añade cualquier tipo de consumo interno como actividad de personas, equipos eléctricos, de agua y gas a los cuales se puede crear un horario de uso a cada uno. Para mayor información acerca del funcionamiento de cada pestaña se puede obtener en *OpenStudio-user-documentation*<sup>31</sup>.

**Figura 20. Interfaz inicial de OpenStudio.**



<sup>31</sup> OPENSTUDIO. Creating your model [en línea] < [https://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/tutorials/creating\\_your\\_model/](https://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/tutorials/creating_your_model/) > [citado el 20 de noviembre de 2016]

## 4. DESARROLLO DEL PROYECTO

El desarrollo del proyecto fue realizado en cinco fases principales, las cuales tienen como propósito cumplir con los objetivos específicos del proyecto, las cual se puede observar en la Tabla 3.

**Tabla 3. Fases principales para el desarrollo del proyecto.**

Núm.	Fase
1	Estudios experimentales.
2	Modelos teóricos.
3	Modelado en el simulador.
4	Implementación de modelo propuesto.
5	Análisis y Documentación.

### 4.1 ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Para la primera fase se plantea inicialmente una recolección de datos necesarios para las distintas necesidades de cálculo y simulación para el desarrollo del proyecto, la información necesaria para la evaluación, análisis de carga térmica , información meteorológica y características propias del recinto ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará para un análisis inicial de su comportamiento sin ninguna modificación y su posterior alteración.

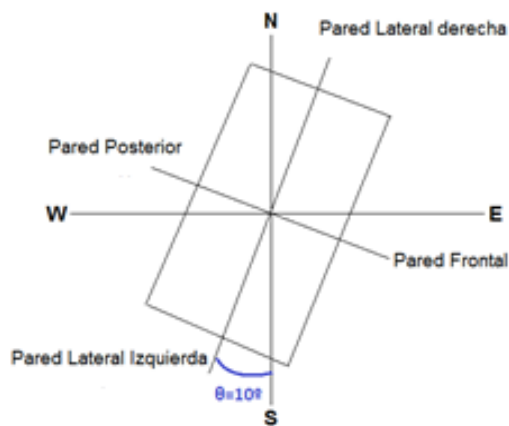
**4.1.1 Caracterización del recinto.** El desarrollo del proyecto se plantea dentro de un recinto cerrado (ver figura 21) ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará

UIS, este parque conocido como un espacio de investigación y desarrollo, ubicado en el municipio de Piedecuesta, Santander, posee dos recintos piloto para el desarrollo de proyectos. Uno de estos recintos fue el seleccionado para la implementación de los métodos de climatización. La ubicación del recinto cuenta con una latitud de  $6.96^\circ$  Norte y Longitud de  $73.11^\circ$  Oeste. En la figura 22 se puede observar la orientación del recinto. Por otra parte las dimensiones del recinto se muestran en metros en las figura 23.

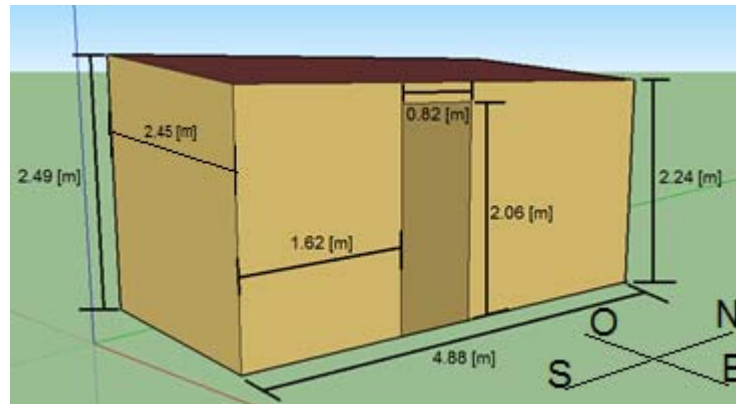
**Figura 21. Recinto piloto para desarrollo del proyecto.**



**Figura 22. Orientación del recinto.**



**Figura 23. Geometría y dimensionamiento del recinto sin modificaciones.**



Los datos termodinámicos del recinto se presentan en la tabla 4, en la cual se muestra las características de cada uno de los materiales que componen el recinto donde:

- $K$  [W/m\*K] es la conductividad térmica del material.
- Esp. [m] Es el espesor en que se encuentra dicho material en la casa.
- $\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>] Es la densidad del material.
- $C_p$  [J/Kg\*K] Es el calor específico del material.
- $\epsilon$  Es la emisividad del material.
- $\alpha_s$  Es la absorptividad Solar del material.

**Tabla 4. Materiales presentes en la casa sin modificaciones.**

Material	K [w/m-k]	Espesor [m]	P [Kg/m3]	Cp [J/KgK]	$\epsilon$	$\alpha_s$
Madera (puerta)	0,29	0,035	900	1600	0,9	0,7
<b>Paredes</b>						
Etherboard	0,263	0,006	1250	1000	0,9	0,5
Sapam	0,29	varía	950	1600	0,72	0,5
<b>Techo</b>						
Madera frondosa	0,21	0,008	800	1255	0,9	0,65
Hormigón de arena	0,6	0,02	1500	837	0,9	0,65
Tejas	1	0,015	2000	800	0,9	0,36

Fuente: Propiedades de materiales arquitectónicos URSA.\*

**4.1.2 Datos meteorológicos.** Para el desarrollo de la simulación y realización de del proyecto es necesario contar con datos meteorológicos propios del lugar donde está ubicado el recinto de análisis, de igual manera es necesario conocer la temperatura interna del recinto con el fin de poder comparar los datos medidos con los datos obtenidos de la simulación.

Los datos meteorológicos fueron recolectados mediante una estación meteorológica Vantage Vue 6250 (ver figura 24), la cual permite al obtención de datos de temperatura ambiente, presión, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, y precipitaciones. La estación meteorológica fue instalada en uno de los recintos de análisis.

---

\* URSA es una empresa dedicada a la producción y comercialización de materiales de aislamiento térmico y acústico orientados a la sostenibilidad y eficiencia energética en edificaciones.

**Figura 24. Estación meteorológica Vantage Vue 6250.**



Fuente: Weather Shack, productos Disponible en: <https://www.weathershack.com/product/davis-instruments-6250.html>

La estación cuenta con un control de mando como se muestra en la figura 25, la información es obtenida por medio de conexión USB enlazándola a un computador y utilizando el programa Weather Link 5.92, dicho software permite programar la estación meteorológica teniendo en cuenta las unidades que se desea que la estación registre las características meteorológicas, como también se debe dar información propia del lugar como la altura, longitud y latitud, la zona horaria y por último el intervalo de tiempo en que se desea que la estación capte los datos.

**Figura 25. Control de mando de la estación meteorológica Vantage Vue 6250.**



De la misma manera fue necesario la utilización de un piranómetro Davis DS6450 mostrado en la figura 26, el cual proporciona la radiación global. La implementación de este sensor se realizó por medio de la plataforma arduino, en el cual se usó un programa para poder obtener la radiación global y guardarla en una memoria micro sd, para su posterior procesamiento y cálculo teórico de la radiación difusa y directa.

**Figura 26. Piranómetro Davis DS6450.**



Para la obtención de la temperatura interna del recinto se usó el equipo Agilent 34972A (ver figura 27) el cual es una unidad de adquisición de datos a la cual se le conectan termocuplas tipo K (ver figura 28) en diversas entradas de lectura, el Agilent 34972A funciona mediante el software BenchLink Data Logger 3, el cual permite tanto activar las entradas de datos como el tiempo en que estas deben funcionar, es decir, las termocuplas tomaran datos instantáneos en un intervalo de tiempo determinado por el usuario, el programa las leerá y obtendrá la recopilación total de éstos. Dichas termocuplas son posicionadas de forma estratégica (ver figura 29) en forma de cruz, los datos son obtenidos cada 30 minutos, con lo cual se pudo tener una gran cantidad de datos diarios durante el periodo de estudio.

**Figura 27. Equipo Agilent 34972A.**

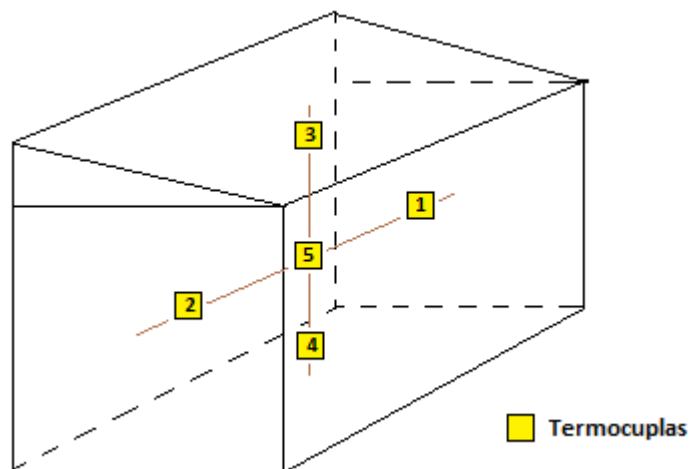


Fuente: Think Allied, productos disponibles en: <https://www.alliedelec.com/keysight-technologies-34972a/70180386/>

**Figura 28. Termocupla tipo K.**



**Figura 29. Posicionamiento estratégico de las termocuplas en el recinto piloto.**



Teniendo todos los equipos anteriormente mencionados en funcionamiento, se dio inició la toma de datos meteorológicos el día 18 enero de 2017 hasta el 18 de abril de 2017, es decir, que se pudo establecer tres meses de información meteorológica. Se debe aclarar que se midieron durante este periodo todos los datos a excepción de la temperatura interna del recinto, esto debido a que para el funcionamiento de la unidad Agilent es necesario que este acoplado a un computador y alimentado a corriente alterna, con la cual no se contó en ese momento dadas las características propias de la ubicación alejada a punto de energía del recinto analizado.

Los datos de temperatura interna se midieron con la unidad Agilent en horarios de 8 am a 4 pm con la finalidad de poder conocer el comportamiento térmico del recinto, la energía eléctrica necesaria para todo el sistema de medición se realizó con un generador de electricidad TG 2800CX mostrado en la figura 30, esto se planteó inicialmente con la misma fecha de inicio de 18 de enero de 2017 hasta el 18 de febrero de 2017.

**Figura 30. Generador de electricidad TG 2800CX.**



Fuente: Rrmaquinas, generadores de energía a gasolina, disponible en: <http://www.rmaquinas.com.br/gerador-de-energia-a-gasolina-4t-bivolt-2-7kva-tg-2800-cx-toyama.html>

**4.1.2.1 Análisis de datos adquiridos:** Con los datos obtenidos de las temperaturas internas en el periodo mencionado y analizando la temperatura ambiente del mismo periodo donde se obtiene la temperatura interna del recinto, se concluye que la temperatura máxima promedio que alcanzo la temperatura interna promedio, como también la temperatura ambiente más alta durante este periodo, se dieron el día 6 de Febrero de 2017. En la tabla 5 se puede observar las temperaturas máximas promedio del recinto en cada día, junto con la temperatura ambiente máxima del mismo día. De la misma manera en la figura 31 se muestra el comportamiento térmico de la temperatura interna promedio y ambiente del día 6 de Febrero, se debe también tener presente que se analizarán las temperaturas máximas de la temperatura ambiente del periodo total de obtención de datos (18 de Enero al 18 de abril Abril) y ningún otro día superó los 31,4°C mostrados como el máximo para el día 6 de Febrero, por lo cual se toma como día crítico propuesto y de posterior verificación en los cálculos de carga térmica y simulación, sus datos meteorológicos se muestran en la tabla 6.

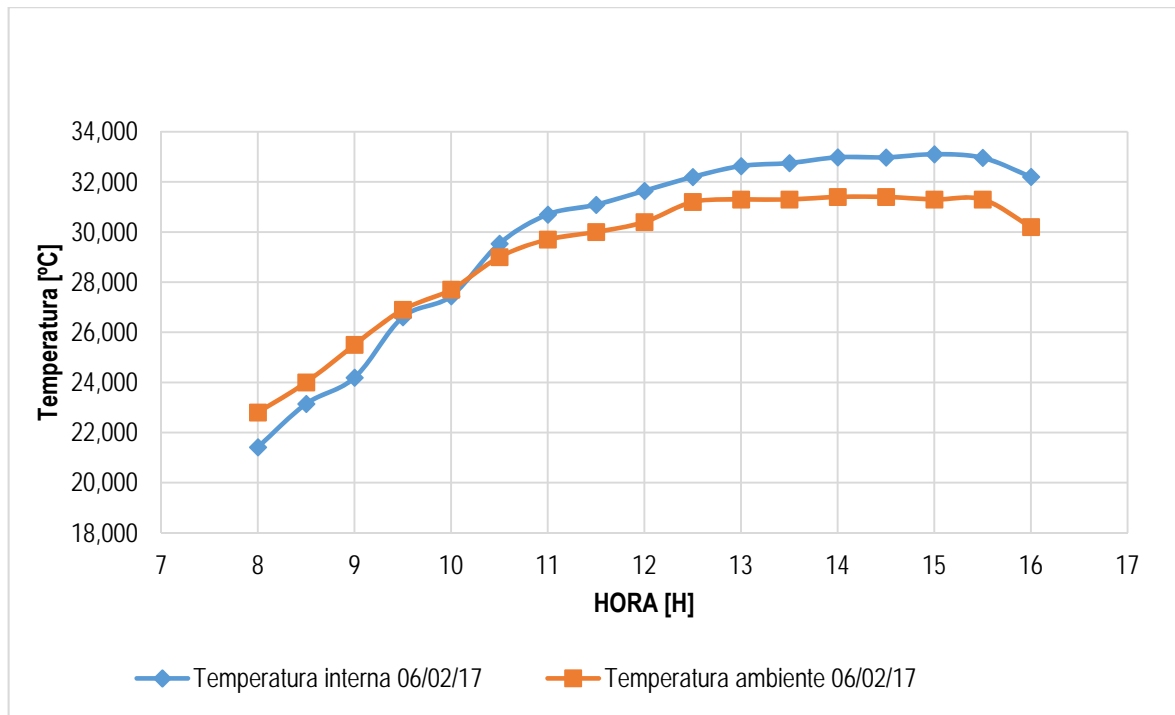
**Tabla 5. Temperatura máxima ambiental e interna máxima promedio del recinto sin modificaciones medidas en termocuplas.**

Fecha	Temperatura ambiente máxima [°C]	Hora	Temperatura interna promedio máxima [°C]	Hora
18/01/2017	28,7	12:30	31,3	12:30
19/01/2017	27,2	12:00	31,3	11:30
20/01/2017	28,4	14:00	32,3	14:00
21/01/2017	28,1	15:00	31,0	12:30
22/01/2017	29,9	13:00	30,7	14:00
23/01/2017	29,1	13:00	32,1	15:30
24/01/2017	27,8	11:30	32,3	11:30
25/01/2017	25,2	12:30	28,5	12:00
26/01/2017	28,8	13:00	32,3	1:00
27/01/2017	29,3	12:30	32,6	12:30

Fecha	Temperatura ambiente máxima [°C]	Hora	Temperatura interna promedio máxima [°C]	Hora
28/01/2017	30,3	13:00	31,3	13:00
29/01/2017	30,6	13:30	31,7	13:00
30/01/2017	26,3	14:30	30,3	14:30
31/01/2017	28,5	13:00	31,5	14:30
01/02/2017	29,6	13:30	31,9	14:30
02/02/2017	29,7	11:30	31,9	11:30
03/02/2017	29,4	15:00	32,4	14:30
04/02/2017	29,3	13:30	32,0	13:30
05/02/2017	31,1	14:30	32,4	12:00
<b>06/02/2017</b>	<b>31,4</b>	<b>14:30</b>	<b>33,1</b>	<b>15:00</b>
07/02/2017	30,0	13:30	32,3	13:30
08/02/2017	30,9	13:00	32,8	12:30
09/02/2017	29,8	14:30	32,7	12:30
10/02/2017	29,0	15:00	32,6	14:30
11/02/2017	29,2	14:00	32,0	14:00
12/02/2017	29,3	14:00	31,7	14:30
13/02/2017	29,1	14:30	30,7	14:30
14/02/2017	30,2	14:00	31,7	15:00
15/02/2017	30,1	14:30	30,8	11:00
16/02/2017	29,6	14:00	30,2	14:00
17/02/2017	29,1	16:00	31,7	14:00
18/02/2017	31,1	14:00	31,7	15:00

Se observa también en la tabla 5 que en el periodo de toma de la temperatura interna promedio solo hubo un día en el cual su temperatura máxima no superó los 30°C (25 de Enero), mientras para el resto de días se mantuvo por encima, mostrando una temperatura bastante elevada para habitarla.

**Figura 31. Comportamiento de la temperatura ambiente e interna promedio del recinto sin modificaciones para día el 6 de Febrero.**



**Tabla 6. Datos meteorológicos en el recinto piloto para el día 6 de Febrero.**

Hora	Temperatura ambiente [°C]	% Hn	Presión[Kpa]	Radicación total [W]	Dirección del viento [°]	Velocidad del viento[m/s]
6:00	19,1	88	90,42	0	203	1,33
6:30	19,4	86	90,45	17,59	203	0,44
7:00	19,7	83	90,50	46,91	203	0,44
7:30	21,5	76	90,51	328,34	0	0
8:00	22,8	72	90,53	423,65	0	0
8:30	24,9	64	90,55	518,89	0	0
9:00	25,5	55	90,59	313,68	0	1,33
9:30	26,9	53	90,56	624,43	315	1,77
10:00	27,7	49	90,54	832,57	23	1,77
10:30	29,0	49	90,47	861,89	0	2,69
11:00	29,7	47	90,40	677,20	0	2,22
11:30	30,0	48	90,34	732,90	45	3,00
12:00	30,4	47	90,27	979,15	337,5	4,47

12:30	30,8	48	90,22	952,77	315	4,91
13:00	31,3	49	90,17	905,86	293	5,36
13:30	31,3	48	90,13	829,64	338	7,00
14:00	31,4	49	90,09	794,46	338	6,69
14:30	31,4	49	90,06	659,61	0	7,13
15:00	31,3	47	90,01	539,41	0	8,94
15:30	31,3	51	89,98	454,40	0	8,50
16:00	31,1	52	89,98	404,32	338	5,36
16:30	31,1	55	89,98	257,27	68	5,80
17:00	29,9	54	89,99	146,32	23	4,47
17:30	28,27	61	90,02	14,76	315	5,36
18:00	27,5	65	90,06	0	293	4,02

Donde la dirección del viento se mide en grados, partiendo de una referencia de 0° para el norte, pues la estación meteorológica está instalada apuntando hacia el norte, 90° para el oeste, 180° para el sur y 270° para el este. Se puede observar que la mayoría de corrientes de viento vienen direccionadas desde el norte, golpeando la gran mayoría del tiempo la pared derecha y la pared trasera del recinto.

El posicionamiento en cruz de las termocuplas permitió observar un comportamiento total del interior del recinto, y a partir de este tomar un promedio para todo el aire interno, se debe tener en cuenta que las medidas nunca tuvieron diferencias muy grandes entre ellas, por las que obtener un promedio no dejaba ningún valor extremo que no coincidiera con el comportamiento de la temperatura del aire interior.

**Tabla 7. Comportamiento térmico del aire interior del recinto en cada una de las termocuplas para el día 6 de Febrero.**

Hora	TERMOCUPLA					Promedio
	1	2	3	4	5	
8:00	20,3	21,1	22,1	22,4	21,0	21,4
8:30	21,4	23,9	24,7	23,9	21,6	23,1
9:00	23,1	24,5	25,4	24,6	23,2	24,1
9:30	25,6	26,9	27,3	26,9	26,1	26,6
10:00	26,2	27,4	28,6	27,5	27,3	27,4
10:30	29,2	29,5	29,8	29,8	29,1	29,5
11:00	30,4	30,1	30,6	31,5	30,6	30,7
11:30	30,7	30,8	31,2	31,3	31,1	31,0
12:00	31,4	31,3	31,8	31,7	31,7	31,6
12:30	31,9	31,9	32,1	32,7	32,2	32,1
13:00	32,7	31,8	34,1	31,8	32,6	32,6
13:30	32,4	32,0	34,8	32,1	32,2	32,7
14:00	32,8	32,8	34,1	32,6	32,4	32,9
14:30	32,4	32,6	33,8	32,9	32,8	32,9
15:00	32,6	32,9	33,6	33,6	32,6	33,1
15:30	31,7	32,1	36,0	32,7	32,0	32,9
16:00	31,3	31,7	34,7	31,4	31,7	32,2

En la tabla 7 se pueden observar el comportamiento del recinto para el día crítico el cual es el 6 de febrero, como se dijo anteriormente los datos se tomaron con un intervalo de 30 minutos, durante las horas en las que el recinto recibía la mayor cantidad de luz solar, es decir, desde las 8:00 hasta las 16:00 horas.

Se observa una alta temperatura en la termocupla presente cerca al techo (3), ya que esta es una superficie la cual estará todo el tiempo expuesta a la luz solar de forma directa, en cambio la termocupla presente en la pared lateral derecha (1) presenta unas temperaturas un poco más bajas ya que durante el tiempo de estudio

esta superficie no recibía luz solar directamente, al igual que la termocupla (4) al estar ubicada en la parte inferior de la casa también obtuvo temperatura bajas respecto a las que están en posiciones más elevadas.

## 4.2 MODELOS TEÓRICOS

Con la finalidad de obtener resultados verídicos por parte del simulador EnergyPlus, se plantean la utilización y modificación de un código en Matlab para la estimación del comportamiento térmico de un recinto, este se ha desarrollado mediante trabajos de grado<sup>32</sup> anteriores en la Escuela de ingeniería mecánica de la UIS. De la misma manera se plantea la utilización del método CLTD para una estimación aproximada de la carga térmica del recinto basado en la norma ASHRAE.

**4.2.1 Código Matlab.** Con el fin de comparar los resultados, experimentales con los teóricos, se adapta, modifica y mejora un programa en Matlab que pueda calcular el comportamiento de la temperatura interna del recinto de análisis de manera transitoria, suponiendo la temperatura externa de cada superficie del recinto, e ingresando todas las características físicas y térmicas. Para que pueda a partir de intervalos de información meteorológica mostrar el comportamiento térmico del recinto en análisis.

Para tener un conocimiento inicial del comportamiento del recinto, se hace un análisis instantáneo en cada una de las paredes del recinto y el techo, este análisis

---

<sup>32</sup> ARCHILA, David Alejandro y VEGA, Julián Fernando. Estudio de ahorro energético obtenido de la implementación de una huerta doméstica adaptada como una pared verde dentro de una construcción bioclimática en zonas sin acceso a agua de riego y no interconectada. Trabajo de grado para optar como ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico mecánicas. Departamento de ingeniería mecánica, 2017.137p

permitirá tener una estimación de la temperatura tanto de la parte externa como de la interna en la pared en el inicio del día (8 a.m.), esto con el fin de ingresar un punto de partida al programa en Matlab.

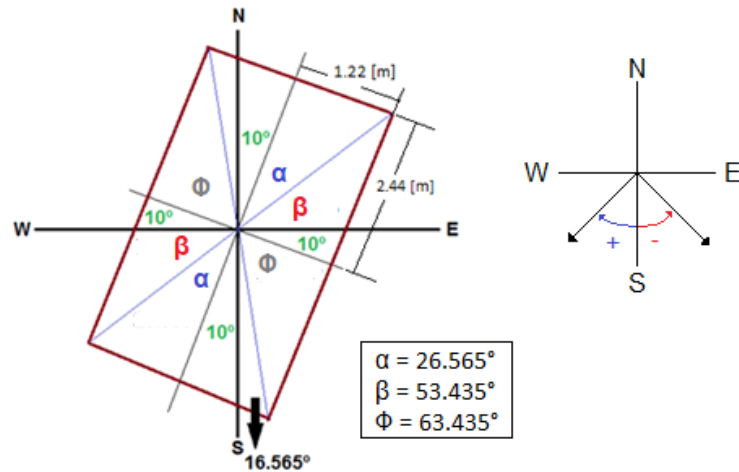
Para esto se requieren las características meteorológicas en ese instante del día, las cuales se obtienen gracias a la estación meteorológica que se observan en la tabla 8.

**Tabla 8. Datos meteorológicos del recinto a las 8 a.m.**

Hora	H total [W/m <sup>2</sup> ]	Dirección del viento (ángulo respecto al Norte)	Velocidad [m/s]	Temp. externa [°C]	Temp. interna [°C]
8 am	423,65	0°	0	19,16	19,545

Para identificar donde incide la radiación solar, se debe analizar el ángulo de azimut solar en donde se tienen en cuenta los límites donde incidirá la radiación solar para cada una de las paredes. Para el recinto se analizó el ángulo de azimut de cada pared para dar límites, dicho análisis se muestra en la figura 32 (explicación Anexo A).

**Figura 32. Ángulos límites para cada una de las paredes de la casa.**



Para entenderlo de una manera más práctica se presenta la tabla 9 con los condicionales que debe tener el azimut solar, para saber si sobre dicha pared cae el sol directamente.

**Tabla 9. Condiciones para la radiación directa en paredes.**

Pared	Condición a cumplir por el Azimut solar ( $\delta_s$ )
Frontal	$-170^\circ < \delta_s < 10^\circ$
Lateral Izquierda	$-80^\circ < \delta_s < 100^\circ$
Posterior	$10^\circ < \delta_s < 180^\circ$ O $-180^\circ < \delta_s < -170^\circ$
Lateral Derecha	$100^\circ < \delta_s < 180^\circ$ O $-180 < \delta_s < -80^\circ$

Se realiza a continuación el cálculo de la transferencia de calor en la pared lateral izquierda, instantáneo para las 8 a.m., para iniciar el cálculo de la cantidad de calor que llega a la pared por radiación solar, se analiza la geometría solar (anexo A), para esto se conocen tanto el día como la hora, el ángulo de la pared y la latitud del recinto de estudio.

$$\omega_{reloj} = 15 * -4$$

$$\beta = 90$$

$$\rho_{piso} = 0.26$$

$$n = 37$$

$$\Phi = 6.9985$$

$$\Phi_{ref} = 4.61$$

$$I_{sc} = 1358$$

Donde:

- $n$  hace referencia al día del año correspondiente al 6 de febrero.

- $\omega$  reloj hace referencia a la hora del día a las 8:00 a.m.

- $\beta$  es el ángulo de elevación de la pared, 90°.

- $\Phi$  es la latitud de Guatiguará.

- $\Phi_{ref}$  es la latitud de donde se tiene la hora exacta que es Bogotá.

- $I_{sc}$  es la constante Solar cuyo valor es 1358 W/m<sup>2</sup>.

- $\rho_{piso}$  es la reflectividad del piso, se toma el valor de 0.26 al ser prado verde lo que rodea la casa tomado de la Tabla E2.

**Tabla 10. Reflectancia de tipos de suelos.**

Foreground Surface	Reflectance
Water (large angle of incidences)	0.07
Coniferous forest (winter)	0.07
Bituminous and gravel roof	0.13
Dry bare ground	0.2
Weathered concrete	0.22
Green grass	0.26
Dry grassland	0.2 to 0.3
Desert sand	0.4
Light building surfaces	0.6
Snow-covered surfaces:	
Typical city centre	0.2
Typical urban site	0.4
Typical rural site	0.5
Isolated rural site	0.7

Source: Adapted from Thevenard and Haddad (2006).

Fuente: ASHRAE, Handbook Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, research, 2009: F14.

Climatic Design Information: Ground Reflectance of Foreground Surfaces, P11.

Hallando la geometría con la que incide el rayo (anexo A):

$$\alpha_s = 24.09^\circ$$

$$\delta = -16.11^\circ$$

$$\delta_s = -63.83^\circ$$

$$\omega = -62.39^\circ$$

$$\theta_z = 65.91^\circ$$

Donde.

$-\delta$  es la declinación solar.

$-\omega$  es el ángulo de la hora exacta.

$-\alpha_s$  es el ángulo de elevación del Sol.

$-\theta_z$  es el ángulo de cenit solar.

$-\delta_s$  es el ángulo de azimut solar.

Al tener el valor del azimut solar ( $-63,83^\circ$ ) se puede ver en la tabla 9 que al ser menor a  $100^\circ$  y mayor a  $-80^\circ$  caerá radiación solar directamente sobre la pared lateral izquierda y sobre la pared frontal.

Hallando intensidades:

$$I_o = 1395.119 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$H_o = 569.40 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Donde:

$-I_o$  es la intensidad de radiación de rayo extraterrestre  $[W/m^2]$

$-H_o$  es la intensidad de radiación de rayo Efectiva sobre una superficie horizontal extraterrestre  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

Calculando la cantidad de radiación incidente en la superficie:

$$K_t = 0.5788$$

$$H_d = 70.19 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$-K_t$  es el coeficiente de extinción. Con el cual se halla una razón de la radiación difusa con la radiación efectiva total.

$-H_d$  es la cantidad de radiación difusa solar, es decir la cantidad de radiación que llega a la pared no directamente.

Para finalmente hallar la cantidad de calor solar que llega a la pared lateral izquierda.

$$q_s = q_{s\text{directa}} + q_{s\text{indirecta}} + q_{s\text{reflejada}}$$

$$q_{s\text{directa}} = 393.2 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{s\text{indirecto}} = 35.09 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{s\text{reflejado}} = 55.07 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_s = 483.36 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Con esto se puede hallar la cantidad de calor total incidente sobre la superficie.

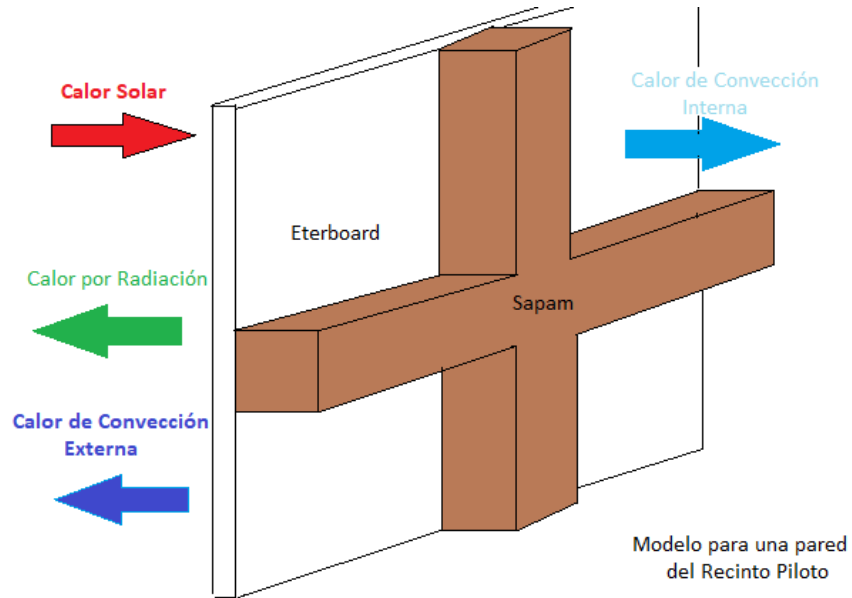
$$Q_{solar} = A * q_s$$

$$A = 5.764 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Q_{solar} = 2786.08 \text{ [W]}$$

Con esto se puede calcular la cantidad de calor presente en la pared, para esto se tiene la figura 33 la cual deja ver gráficamente la interacción de cada uno de los calores sobre la pared lateral izquierda.

Figura 33. Interacciones de los calores en la pared lateral izquierda.



Se tiene intercambio de calor por conducción.

$$Q_{cond} = \frac{T_{s_{ext}} - T_{s_{int}}}{R_{total}}$$

$$R = \frac{e}{K * Area}$$

Por tanto:

$$R_{total} = 0.00665 \left[ \frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

$$Q_{cond} = 359.4 [W]$$

Para el intercambio de calor por convección natural.

$$Q_{conv_{ext}} = h_{ext} * Area * (T_{s_{ext}} - T_{amb})$$

$$h_{ext} = 7.072 \left[ \frac{W}{(m^2 * ^{\circ}C)} \right]$$

$$Q_{conv_{ext}} = 498.3 [W]$$

El calor por radiación externo.

$$Q_{radiacion} = 381.8 [W]$$

$$\alpha * Q_{solar} = Q_{radiacion} + Q_{conv_{ext}} + Q_{cond}$$

$$\alpha = 0.445$$

Para finalmente saber que se tienen tanto temperatura externa e interna, de las cuales partirá la programación en MATLAB tanto para la parte de la superficie externa como para cualquier superficie del recinto.

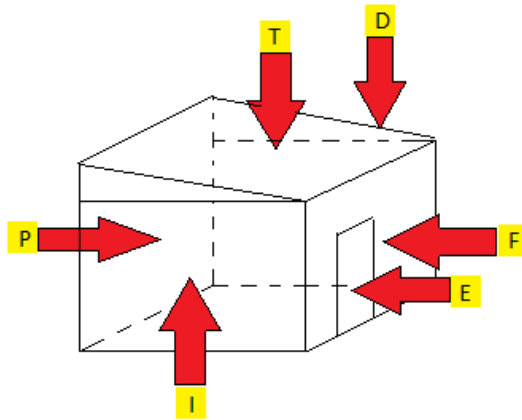
**Tabla 11. Temperaturas iniciales del simulador de MATLAB a las 8 a.m. en superficies externa e interna.**

Superficie	Temp Externa de pared	Temp Interna de pared
Frontal	21.9	21.9
Lateral izquierda	21.42	21.9
Posterior	22	21.9
Lateral derecha	21.18	21.9
Techo	21.12	21.9
Puerta	22.7	21.9

La tabla 11 muestra las temperaturas externas e internas que permiten al programa que inicie el proceso iterativo desde las 8 a.m. para cada superficie existente en el recinto y termina a las 4 p.m.

Para el modelamiento completo de forma transitoria se toman diversos volúmenes de control, principalmente como el análisis se quiere realizar en el interior del recinto, el volumen de aire presente en este va a ser el volumen de control más importante, en la figura 34 podemos observar los calores que ingresan a dicho volumen de control aumentando su temperatura en intervalos de tiempo dados.

**Figura 34. Energías que interactúan con el volumen de aire en el recinto.**



$$Q_{frontal} + Q_{lat\ der} + Q_{lat\ izq} + Q_{posterior} + Q_{puerta} + Q_{techo}$$

$$= \rho_{aire\ in} * V * C_{p\ aire\ int} * \left( \frac{dT_{aire}}{dt} \right)$$

Para entender la figura 34 se tiene la tabla 12, donde se explica cada notación tomada en la figura.

**Tabla 12. Notación usada para los calores del recinto.**

Calor ingresado por:	Notación
Techo	T
Lateral derecha	D
Lateral izquierda	I
Frontal	F
Entrada	E
Posterior	P

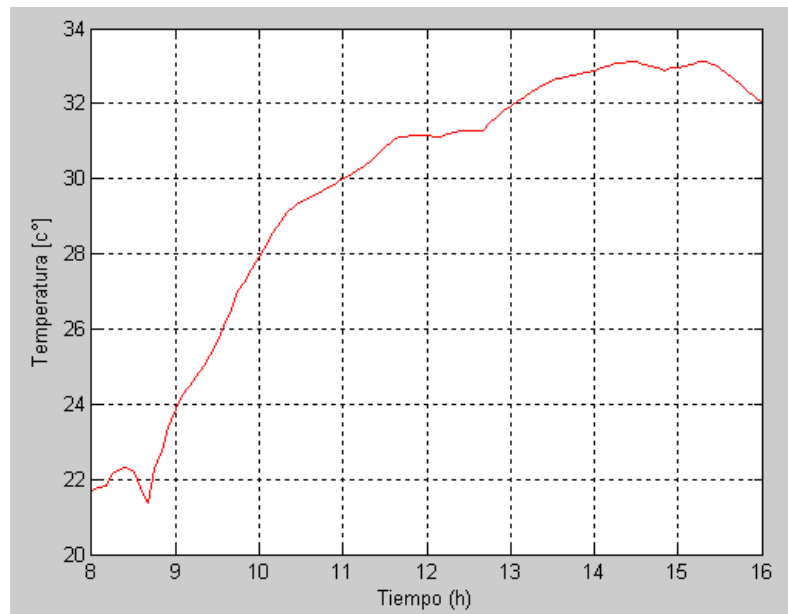
El intervalo de tiempo para las iteraciones del programa de Matlab en el recinto sin modificaciones es de 5 minutos. Cada calor que entra al aire interno por cada superficie pasa también por análisis transitorios en cada una de las superficies:

$$Q_{entra_{superficie}} - Q_{sale_{superficie}} = m_{superficie} * Cp_{superficie} * \left( \frac{dT_{superficie}}{dt} \right)$$

Por lo tanto se puede decir que cada calor que entra al aire interior es la suma algebraica de cada calor que sale de cada superficie.

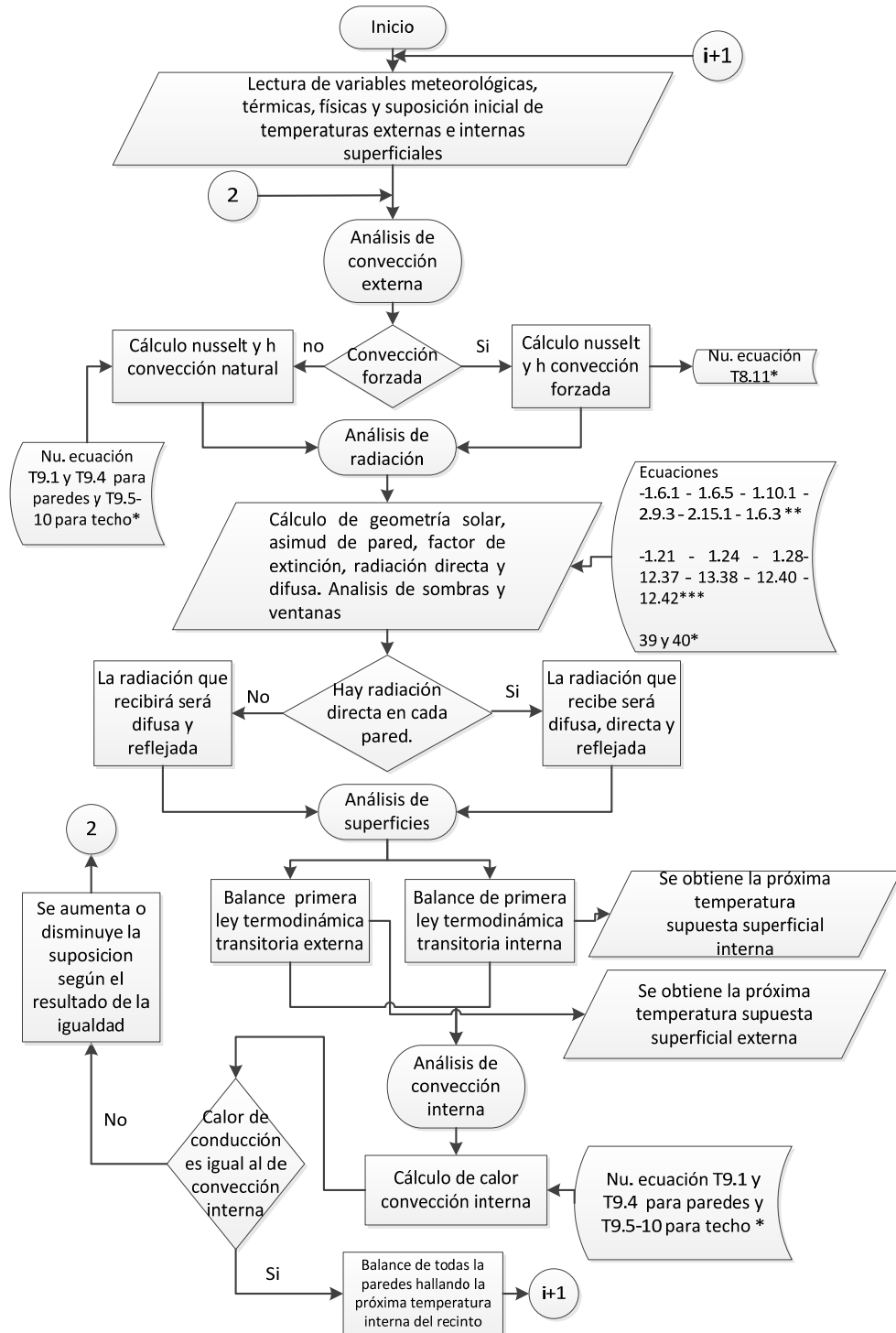
En la figura 35 se muestra el resultado del modelo realizado en Matlab que es el comportamiento de la temperatura interna para el día 6 de febrero en una gráfica temperatura interna contra hora del día, se puede observar que el máximo llega a ser entre 32°C y 34°C entre las 14 y 16 horas.

**Figura 35. Comportamiento del recinto para el día crítico del modelo matemático.**



En la figura 36 se muestra un diagrama de flujo del proceso que lleva a cabo el programa. Teniendo presente el día crítico (6 de febrero) de los tres meses de estudio.

**Figura 36. Diagrama de flujo del programa Matlab.**



\*ASHRAE, Handbook Fundamentals, Atlanta: ASHRAE research, 2009.

\*\*DUFFIE, John & BECKMAN, William. Solar Engineering of Thermal Processes: Direction of Beam Radiation. 4ta Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, inc. 2013.

\*\*\* CENGEL, Yunes. Termodinámica y transferencia de calor en: Transferencia de Calor y masa. Cuarta Edición. Mc Graw Hill 2011.

**4.2.2 Método CLTD.** De la misma manera se implementa el método de la CLTD<sup>33</sup> recomendado por la ASHRAE<sup>34</sup> para el cálculo de cargas térmicas de forma manual y calcular un valor estimado de la carga térmica del recinto sin modificaciones a partir del manual de cálculos de cargas de refrigeración, con el fin de poder tener un punto teórico de comparación con los resultados que se obtengan del simulador para la carga de refrigeración inicial.

El método se basa en la siguiente ecuación:

$$Q=U*A*CLTD'$$

Donde

Q= Carga térmica [BTU/h]

A= Área de la superficie analizada [ft<sup>2</sup>]

U= Coeficiente global para la transferencia de calor de la superficie. [BTU/ ft<sup>2</sup>\*F\*h]

CLTD'= Diferencia de temperatura de carga de enfriamiento corregida. [F]

En donde el CLTD' puede ser corregido para la latitud y en el mes que se desee realizando el cálculo de la siguiente manera:

$$CLTD' = (CLTD+LM)*K + (78-Tr) + (To-85)$$

Donde:

---

<sup>33</sup> AHSRAE, Handbook Coolind and Heating Load Calculation Manual, Atlanta: ASHRAE research, First edition, 1980. 223 p.

<sup>34</sup> AHSRAE, Handbook Coolind and Heating Load Calculation Manual, Atlanta: ASHRAE research, Second edition, 1992. 209 p.

CLTD es Diferencia de temperatura para latitudes americanas.

LM es el Factor de posición geográfica.

K es un factor en función del color de superficie de análisis.

Tr=Temperatura de diseño interna del recinto.

To=Temperatura externa.

Donde la temperatura externa se define como:

$$T_o = T_{amb} - \frac{\text{Rango diario}}{2}$$

Donde

Tamb= Temperatura máxima ambiental

Rango diario= cambio de temperatura externa que ocurra durante el día o mes.

Dentro del cálculo se debe tener en cuenta el tipo de material del que está construido el recinto, en nuestro caso las paredes y techo, y poder relacionarlo al material más aproximado posible que presenta la norma en cuanto a su conductividad, su calor específico, su densidad y su masa.

**4.2.2.1 Aplicación del método CLTD en paredes y techo.** Se realizará el cálculo tipo para la pared posterior basada en la norma ASHRAE con las dos ediciones del manual de cálculo de cargas térmicas, dado que la primera edición contiene los factores de corrección para latitudes diferentes, y la segunda edición contiene un método de selección de tipos de pared y techos mucho más variado. Para la cual se debe realizar los siguientes pasos:

- **Paso 1.** Se debe conocer la ubicación del recinto y la orientación de sus paredes por lo que tenemos:

- Ubicación del recinto: Piedecuesta-Santander.

- Latitud: 6,9° de latitud norte.

- Orientación: ver figura 25.

- Área de pared: 130,41 ft<sup>2</sup>

- **Paso 2.** Se deben conocer los materiales de construcción que poseen las paredes del recinto.

-Etherboard (fibrocemento)

-Madera Sapam

Determinamos como material principal al Etherboard por tener más espesor, cantidad y propiedades térmicas superiores al Sapam.

- **Paso 3.** Cálculo de coeficiente global de transferencia de calor, se debe tener presente todas las resistencias térmicas que se dan en la transferencia de calor en una pared, es decir las resistencias convectivas internas y externas, y las resistencias por material.

**Tabla 13. Propiedades térmicas para casos generales.**

**Table 8.5 Thermal Properties and Code Numbers of Layers for Walls and Roofs**

Code Number	Description	L	k	Thickness and Thermal Properties		R	Mass
				$\rho$	$c_p$		
A0	Outside surface resistance	0.0	0.0	0.0	0.0	0.33	0.0
A1	1 in. Stucco	0.0833	0.4	116.0	0.20	0.21	9.7
A2	4 in. Face brick	0.333	0.77	125.0	0.22	0.43	41.7
A3	Steel siding	0.005	26.0	480.0	0.10	0.00	2.4
A4	1/2 in. Slag	0.0417	0.11	70.0	0.40	0.38	2.2
A5	Outside surface resistance	0.0	0.0	0.0	0.0	0.33	0.0
A6	Finish	0.0417	0.24	78.0	0.26	0.17	3.2
A7	4 in. Face brick	0.333	0.77	125.0	0.22	0.43	41.7
E0	Inside surface resistance	0.0	0.0	0.0	0.0	0.69	0.0
E1	3/4 in. Plaster or gypsum	0.0625	0.42	100.0	0.2	0.15	6.3
E2	1/2 in. Slag or stone	0.0417	0.83	55.0	0.40	0.05	2.3
E3	3/8 in. Felt and membrane	0.0313	0.11	70.0	0.40	0.29	2.2
E4	Ceiling air space	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0
E5	Acoustic tile	0.0625	0.035	30.0	0.2	1.79	1.9

*L* = thickness, ft; *k* = thermal conductivity, Btu/h · ft<sup>2</sup> · °F;  $\rho$  = density, lb/ft<sup>3</sup>;  $c_p$  = specific heat, Btu/lb · °F; *R* = thermal resistance, °F · ft<sup>2</sup> · h/Btu; Mass = unit mass, lb/ft<sup>2</sup>

$$U=1/Rt$$

$$R_T=R_{ext} + R_E + R_S+R_{int}$$

Donde el subíndice E y S, significan Etherboard y Sapam respectivamente,

$$Le=0,006 \text{ m} =0,2362 \text{ [in]}$$

$$Ke=0,263 \text{ [W/m}\cdot\text{k]} =1,824 \text{ [Btu}\cdot\text{in/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F]}$$

$$C=Ke/Le=1,824 \text{ [Btu}\cdot\text{in/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}]/0,2362 \text{ [in]} = 7,722 \text{ [Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F]}$$

$$Re=1/c = 0,12944 \text{ [h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F/Btu]}$$

De la misma forma para Rs

$$Rs= 0,097901 \text{ [h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F/Btu]}$$

$$Rt= 0,33 + 0,097901+ 0,129444 + 0,69$$

$$Rt=1,25 \text{ [h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F/Btu]}$$

$$U=1/Rt$$

$$U=0.799 \text{ [Btu /h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F]}$$

**Paso 4.** Cálculo del CLTD. Se debe tener en cuenta que para el cálculo de CLTD corregido de la ecuación:

$$CLTD' = (CLTD + LM) * K + (78 - Tr) + (To - 85)$$

Esta ecuación se presenta en la primera edición para las cuales la CLTD fue parametrizada para una latitud de 40 ° latitud norte para el 21 julio, el inconveniente surge al no tener tablas de paredes y techos livianos y se debe buscar estas tablas en la segunda edición del mencionado manual, En donde al tener fibrocemento en las paredes el material más similar dentro de las tablas que suministra el manual se seleccionó a partir de su similitud con el calor específico, la densidad y la conductividad térmica, a continuación se muestra en la tabla 14 una comparación de materiales similares al Etherboard, tomados de la tabla 2.5 del manual en la segunda edición.

**Tabla 14. Propiedades de materiales para comparación.**

Material	K [Btu/h-ft-F]	Cp [Btu/lb-F]	P [lb/lb^3]	M [lb/ft^2]
Etherboard	0,152	0,2388	124	2,458
Madera (b7)	0,07	0,6	37	3,1
Ladrillo (A2)	0,77	0,22	120	41
Cemento pesado (C3)	0,47	10,2	61	20,3
Cemento ligero(C2)	0,217	0,2	38	12,7

Como se puede observar no hay un material que pueda tomar las propiedades cercanas de cada factor de análisis, por lo que también se deberá analizar respecto a la tabla 8.6b del manual (tabla 15) en la segunda edición cuál de estos cuatro materiales se encuentran dentro del rango de la resistencia total calculada en el paso tres.

**Tabla 15. Tipos de muros en función del factor R.**

Table 8.6B Wall Types, Mass Evenly Distributed, for Use with Table 8.3

Secondary Material	R-Factor, ft <sup>2</sup> · °F/Btu	Principle Wall Material**														
		A1	A2	B7	B10	B9	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C17	C18
	0.0 to 2.0	1	3	*	*	*	*	*	1	3	3	*	*	*	*	*
	2.0 to 2.5	1	3	1	*	*	2	*	2	4	4	*	*	5	*	*
	2.5 to 3.0	1	4	1	*	*	2	2	2	4	4	*	*	5	*	*
	3.0 to 3.5	1	*	1	*	*	2	2	*	*	*	10	4	5	*	4
	3.5 to 4.0	1	*	1	2	*	*	4	*	*	*	10	4	*	*	4
	4.0 to 4.75	1	*	1	2	*	*	*	*	*	10	4	*	*	*	4
	4.75 to 5.5	1	*	1	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Stucco and/or plaster	5.5 to 6.5	1	*	2	4	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	6.5 to 7.75	1	*	2	4	11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	7.75 to 9.0	1	*	2	4	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	9.0 to 10.75	1	*	2	4	16	*	*	*	*	*	*	*	*	4	*
	10.75 to 12.75	1	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	4	*
	12.75 to 15.0	2	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	15.0 to 17.5	2	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	17.5 to 20.0	2	*	2	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	20.0 to 23.0	2	*	4	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	23.0 to 27.0	*	*	*	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Se puede observar que para el material B7 y C2 no hay valores para el valor de R propio de la pared en análisis, por lo que se puede escoger un concreto pesado o ladrillo. En base en el análisis se seleccionará el material A2 teniendo un tipo de muro tipo 3, pero por sus características térmicas es de esperarse que la carga térmica tenga un valor más alto que el real, pues su conductividad térmica es más alta, lo cual permitirá la transferencia de calor en mayor magnitud.

La selección del tipo de pared tiene la finalidad de poder encontrar el valor CDTL, dicho valor esta parametrizado para latitudes de 28°, 36° y 48° norte para el 21 de julio en el manual de la segunda edición donde se tienen tablas para el material 3 seleccionado anteriormente. Por lo cual se realiza una interpolación entre el resultado de 36 ° y el 48 ° norte con la finalidad de tener un valor estimado en la latitud 40 ° norte para poder utilizar los factores de corrección que se implementan en el manual de primera edición que están diseñados para dicha latitud y fecha. En las tablas 16 y 17 se muestran los valores recordando que nuestra pared de análisis para el cálculo tipo tiene una orientación de diez grados hacia el este desde el norte. Por lo que interpola entre las orientaciones principales que nos proporciona las tablas.

**Tabla 16. Valor CLTD para 36° latitud norte.**

**Table 8.3B Cooling Load Temperature Differences for Calculating Cooling Load from Sunlit Walls—  
36° North Latitude, July**

Wall Facing	Wall No. 3												Solar Time, h											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	7	5	3	2	1	0	2	5	7	9	11	14	17	20	23	25	26	27	27	24	20	16	13	10
NE	7	5	3	2	0	0	6	17	26	32	34	33	31	30	30	30	29	28	25	22	18	15	12	9
E	7	5	4	2	1	0	7	20	32	42	47	47	44	40	37	35	33	31	28	24	20	16	13	10
SE	7	5	4	2	1	0	4	11	21	30	37	42	43	41	38	36	34	31	28	24	20	16	13	10
S	8	5	4	2	1	0	0	1	3	7	14	21	28	34	37	38	36	33	29	25	20	16	13	10
SW	11	8	6	4	2	1	0	1	3	6	9	13	19	28	38	47	53	55	52	43	34	27	20	15
W	14	10	7	4	2	1	1	2	4	6	9	13	17	24	34	45	56	63	62	53	42	32	24	18
NW	12	8	6	4	2	1	0	1	3	6	9	13	16	20	26	33	42	49	51	44	35	27	21	16

**Tabla 17. Valor CLTD para 48° latitud norte.**

**Table 8.3B Cooling Load Temperature Differences for Calculating Cooling Load from Sunlit Walls—  
48° North Latitude, July**

Wall Facing	Wall No. 3												Solar Time, h											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	8	6	4	2	1	1	3	5	7	8	11	14	17	20	22	24	25	25	26	25	21	17	14	10
NE	7	5	3	2	1	3	11	20	27	31	30	29	28	28	28	28	28	27	25	22	19	15	12	9
E	8	5	4	2	1	3	12	24	36	44	48	48	44	40	37	35	33	31	28	24	20	16	13	10
SE	8	6	4	2	1	1	6	15	25	35	43	49	51	49	45	41	37	34	30	26	21	17	14	11
S	9	6	4	3	1	0	0	2	5	12	20	29	38	45	49	50	47	42	36	30	24	19	15	12
SW	13	9	7	4	2	1	1	2	4	6	10	15	24	34	45	54	60	61	58	50	39	31	23	18
W	15	11	8	5	3	2	2	2	4	7	9	13	16	23	33	45	55	62	64	58	46	36	27	20
NW	12	9	6	4	2	1	1	2	4	6	9	13	16	19	23	29	37	44	49	46	38	29	22	17

Para evitar cálculo repetitivo se realizara la interpolación (tablas 18, 19 y 20) para la hora de más alta temperatura que se obtuvo en los datos medidos para la casa sin modificaciones, la cual fue las tres de la tarde del 6 de febrero. Interpolando:

**Tabla 18. Interpolación 36° latitud norte.**

Latitud	Valor
W=270°	34
Pared posterior= 280°	<b>32,22</b>
NW=315°	26

**Tabla 19. Interpolación 48° latitud norte.**

Latitud	Valor
W=270°	33
Pared posterior= 280°	<b>30,77</b>
NW=315°	23

**Tabla 20. Interpolación para 40°.**

Latitud	Valor
36°	32,22
40°	<b>31,74</b>
48°	30,77

Tendremos un  $cltd=31,74$  para un estimado en 40° de latitud norte para el 21 de julio, este valor ya puede ser trabajado para utilizarlo en la ecuación de CDTL de la primera edición.

- **Paso 5.** Cálculo de factor LM. Este factor dependerá de la latitud, orientación y mes al cual se desea realizar el cálculo. En la gráfica 3.12 (tabla 21) de la primera edición del manual se tiene la tabla para la selección del factor de corrección, en donde se observa que se debe de nuevo realizar 3 interpolaciones (tablas 22 y 23) para poder obtener el factor.

**Tabla 21. Corrección de latitud para factor LM.**

**Table 3.12 CLTD Correction For Latitude and Month Applied to Walls and Roofs, North Latitudes**

Lat.	Month	N	NNE NNW	NE NW	ENE WNW	E W	ESE WSW	SE SW	SSE SSW	S	HOR
0	Dec	-3	-5	-5	-5	-2	0	3	6	9	-1
	Jan/Nov	-3	-5	-4	-4	-1	0	2	4	7	-1
	Feb/Oct	-3	-2	-2	-2	-1	-1	0	-1	0	0
	Mar/Sept	-3	0	1	-1	-1	-3	-3	-5	-8	0
	Apr/Aug	5	4	3	0	-2	-5	-6	-8	-8	-2
	May/Jul	10	7	5	0	-3	-7	-8	-9	-8	-4
	Jun	12	9	5	0	-3	-7	-9	-10	-8	-5
8	Dec	-4	-6	-6	-6	-3	0	4	8	12	-5
	Jan/Nov	-3	-5	-6	-5	-2	0	3	6	10	-4
	Feb/Oct	-3	-4	-3	-3	-1	-1	1	2	4	-1
	Mar/Sept	-3	-2	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-4	0
	Apr/Aug	2	2	2	0	-1	-4	-5	-7	-7	-1
	May/Jul	7	5	4	0	-2	-5	-7	-9	-7	-2
	Jun	9	6	4	0	-2	-6	-8	-9	-7	-2
16	Dec	-4	-6	-8	-8	-4	-1	4	9	13	-9
	Jan/Nov	-4	-6	-7	-7	-4	-1	4	8	12	-7
	Feb/Oct	-3	-5	-5	-4	-2	0	2	5	7	-4
	Mar/Sept	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0	0	-1
	Apr/Aug	-1	0	-1	-1	-1	-3	-3	-5	-6	0
	May/Jul	4	3	3	0	-1	-4	-5	-7	-7	0
	Jun	6	4	4	1	-1	-4	-6	-8	-7	0
24	Dec	-5	-7	-9	-10	-7	-3	3	9	13	-13
	Jan/Nov	-4	-6	-8	-9	-6	-3	3	9	13	-11
	Feb/Oct	-4	-5	-6	-6	-3	-1	3	7	10	-7
	Mar/Sept	-3	-4	-3	-3	-1	-1	1	2	4	-3
	Apr/Aug	-2	-1	0	-1	-1	-2	-1	-2	-3	0
	May/Jul	1	2	2	0	0	-3	-3	-5	-6	1
	Jun	3	3	3	1	0	-3	-4	-6	-6	1

**Tabla 22. Interpolación de la orientación de la pared.**

Dirección	Para 0° norte	Para 8° norte
W=270	-1	-1
Pared=280	-1,44	-1,88
WNW=292.5	-2	-3

**Tabla 23. Interpolación latitud 6,9°.**

latitud	valor
0°	-1,44
6,9°	<b>-1,82</b>
8°	-1,88

LM=-1,82

- **Paso 6. Cálculo de factor K.** Para el factor K dependerá del color de la superficie las cuales están determinadas en la tabla 3.10 (figura 37) para paredes y 3.8 para techos, en donde tienen la siguiente recomendación para paredes.

**Figura 37. Recomendación de manual para el factor K.**

(1) *Direct Application of the Table Without Adjustments:*

Values in the table were calculated using the same conditions for walls as outlined for the roof CLTD table, Table 3.8. These values may be used for all normal air conditioning estimates usually without correction (except as noted below) when the load is calculated for the hottest weather.

For totally shaded walls use the North orientation values.

(2) *Adjustments to Table Values:*

The following equation makes adjustment for conditions other than those listed in Note (1).

$$CLTD_{corr} = (CLTD + LM) \times K + (78 - T_R) + (T_o - 85)$$

where CLTD is from Table 3.10 at the wall orientation.

(a) LM is the latitude-month correction from Table 3.12

(b) K is a color adjustment factor and is applied after first making latitude-month adjustment

K = 1.0 is dark colored or light in an industrial area

K = 0.83 if permanently medium colored (rural area)

K = 0.65 if permanently light colored (rural area)

K=0,65 para la pared de Etherboard (color hueso y zona rural)

- **Paso 7.** Cálculo de Tr y To. Para la temperatura interna de diseño se tomara 25°C equivalente a 77 F y para la temperatura ambiente se analiza la mayor obtenida en el mes de febrero y el rango de temperatura del día 6 de febrero a las 3 de la tarde, la cual fue 31,3°C y un rango de 11,2°C. Para lo que tendremos.

Tr=77 F

$$T_o = [(31,3 * \frac{9}{5}) + 32] - \frac{11,2}{2} = 82,74$$

- **Paso 8.** Cálculo de CDTL´

$$CDTL' = (31,74 + (-1,82)) * 0,65 + (78 - 77) + (82,74 - 85)$$

$$CDTL' = 18,19 \text{ F}$$

- **Paso 9.** Cálculo de calor necesario a retirar por pared posterior.

$$Q=U*A*CDTL'$$

$$Q=0,7997[\text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}] *130,41 \text{ ft}^2*18,19 \text{ F}= 1932,28 \text{ Btu/h}$$

Aplicando esta metodología se realizan los cálculos para las paredes restantes y el techo. Se debe recordar que el método y la cantidad de interpolaciones realizadas hacen que el porcentaje de error pueda ser más grande de lo esperado, así como también la suposición de un muro de propiedades cercanas más no exacto utilizado en el método.

Para el techo como un caso especial se entregan los factores y tipo de techo utilizado para su cálculo (tabla 24), se tuvo en cuenta un espacio de aire, el cual existe entre las tejas y la capa concreto.

**Tabla 24. Factores calculados para el techo.**

Factor	Valor	Referencia
R	3,734	
U	0,2677	
LM	Tabla dependiendo del mes	Tabla 3.12 edición 1
K	0,5	Tabla 3.8 recomendación 2 edición 1
CLTD	Techo tipo 3	Tablas 8,2b y 8,2c 2 edición

**Tabla 25. Resultados de carga de refrigeración en paredes y techo con método CLTD para el mes de Febrero.**

Superficie	Hora de análisis									
	8 a.m.	9 a.m.	10 a.m.	11 a.m.	12 m.	13 p.m.	14 p.m.	15 p.m.	16 p.m.	17 p.m.
P. Frontal	-101	554	1273	1531	1922	1931	1791	1622	1289	1029
P. Izquierda	-401	-292	-50	224	426	655	828	927	876	786
P. Tracera	-1387	-1087	290	55	458	865	1327	1897	2257	2727
P. Derecha	-357	-222	-26	328	240	342	404	439	361	296
Techo	-372	-186	104	388	604	820	967	1044	979	894
Carga [btu/h]	-2617	-1233	1590	2525	3649	4613	5317	<b>5929</b>	5763	5732

Los cálculos realizados para la obtención de la carga interna dentro de los recintos se presentan en la tabla 25 en donde se observa el cálculo de carga térmica para paredes y techo del mes de febrero para el día crítico (6 de febrero), teniendo en cuenta los datos meteorológicos, y los materiales del recinto sin ninguna modificación. Los resultados obtenidos con el método CDTL de todos los meses se puede observar en el Anexo A.

Como se puede observar, los resultados del método concuerdan al analizar las cargas por superficie, se puede analizar que la pared derecha del recinto es la que menor aporta calor dado la ubicación, la fecha y el mes, por lo que el sol está posicionado u orientado en esta época hacia el sur y por lo tanto esta pared no recibe radiación solar directa en ningún momento del día. De la misma manera se puede analizar que a las 3 p.m. alcanza su carga máxima dado que la superficie frontal obtuvo carga durante toda la mañana y aun a ésta hora mantiene una carga considerable y la pared trasera posee una carga alta al ser la superficie más grande y estar recibiendo radiación directa a esta hora. Los resultados de los meses de Enero, Marzo y Abril se encuentran en el anexo B, donde se puede observar que la carga máxima estará para el mes de Febrero con un valor de 5929 [Btu/h] equivalentes a 1748 [W], aun faltando realizar la carga por infiltración.

**4.2.3 Infiltraciones.** Las infiltraciones son los caudales de aire que entran al local por medio de grietas en los materiales y/o marcos presentes en ventanas y puertas que dan al exterior. En EnergyPlus se calculan las infiltraciones mediante la siguiente ecuación.

$$V = A_{leak} * \sqrt{(a_s * \Delta T + a_w * v^2)}$$

Donde,  $V$  es el caudal de aire que entra en L/s.

$a_s$  es el coeficiente de stack en  $\frac{(\frac{L}{s})^2}{cm^4 * K}$ .

$\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura interna y la externa en K.

$A_{leak}$  es el área efectiva de la infiltración en  $cm^2$

$a_w$  es el coeficiente de viento en  $\frac{(\frac{L}{s})^2}{cm^4 * (\frac{m}{s})^2}$

$v$  es la velocidad del viento en m/s.

El Software (OpenStudio) tiene un fichero climático que ya tiene la temperatura ambiente y la velocidad del aire, así que los únicos datos que este requiere son los coeficientes antes mencionados y el área de las fugas. En la figura 38 se muestra la selección del coeficiente de Stack para el recinto.

**Figura 38. Coeficiente de Stack para el recinto.**

	Number of Stories		
	One	Two	Three
Stack coefficient $a_s$ , (ft <sup>3</sup> /min) <sup>2</sup> /(in <sup>4</sup> · °F)	0.0156	0.0313	0.0471
Stack coefficient $a_s$ , (L/s) <sup>2</sup> /(cm <sup>4</sup> · K)	0.000145	0.000290	0.000435

Fuente: KREIDER, Jan. Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning. New York: CRC Press p410.

La siguiente selección es el coeficiente de viento para el recinto, el cual se muestra en la figura 39. Se selecciona para un recinto sin ninguna clase de protección ya que alrededor de este no hay árboles ni edificios.

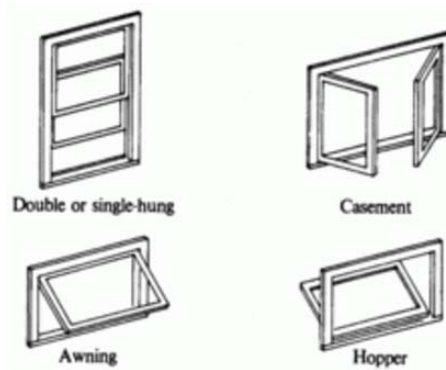
**Figura 39. Coeficiente de viento.**

Shielding class	Description	Wind Coefficient $a_w$ , (L/s) <sup>2</sup> /[cm <sup>4</sup> · (m/s) <sup>2</sup> ]			Wind Coefficient $a_w$ , (ft <sup>3</sup> /min) <sup>2</sup> /[in <sup>4</sup> · (mi/h) <sup>2</sup> ]		
		Number of Stories			Number of Stories		
		One	Two	Three	One	Two	Three
1	No obstructions or local shielding	0.000319	0.000420	0.000494	0.0119	0.0157	0.0184
2	Light local shielding; few obstructions, a few trees or small shed	0.000246	0.000325	0.000382	0.0092	0.0121	0.0143
3	Moderate local shielding; some obstructions within two house heights, thick hedge, solid fence, or one neighboring house	0.000174	0.000231	0.000271	0.0065	0.0086	0.0101
4	Heavy shielding; obstructions around most of perimeter, buildings or trees within 10 m in most directions; typical suburban shielding	0.000104	0.000137	0.000161	0.0039	0.0051	0.0060
5	Very heavy shielding; large obstructions; typical downtown shielding	0.000032	0.000042	0.000049	0.0012	0.0016	0.0018

Fuente: KREIDER, Jan. Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning. New York: CRC Press p411.

Para las áreas efectivas se escogieron ventanas tipo Double Hung las cuales se pueden ver en la figura 40, y posteriormente se seleccionan como se puede observar en la figura 41 con sellos en las juntas para cada ventana, puerta y marco con una diferencia de presiones de 4 [Pa] entre el interior y el exterior.

Figura 40. Tipos de ventanas.



Fuente: ACEVEDO. Types. Disponible vía web en: <http://www.acevedo.com/types/> consultado [14/06/2017]

Figura 41. Factor de área estimada para Ventanas y Puertas.

Component	Best Estimate	Maximum	Minimum
Sill foundation-Wall			
Caulked, in <sup>2</sup> /ft of perimeter	0.04	0.06	0.02
Not caulked, in <sup>2</sup> /ft of perimeter	0.19	0.19	0.05
Joints between ceiling and walls			
Joints, in <sup>2</sup> /ft of wall (only if not taped or plastered and no vapor barrier)	0.07	0.12	0.02
Windows			
Casement			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.011	0.017	0.006
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.023	0.034	0.011
Awning			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.011	0.017	0.006
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.023	0.034	0.011
Single-hung			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.032	0.042	0.026
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.063	0.083	0.052
Double-hung			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.043	0.063	0.023
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.086	0.126	0.046
Single-slider			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.026	0.039	0.013
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.052	0.077	0.026
Double-slider			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.037	0.054	0.02
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.074	0.110	0.04
Doors			
Single door			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of door	0.114	0.215	0.043
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of door	0.157	0.243	0.086
Double door			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of door	0.114	0.215	0.043
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of door	0.16	0.32	0.1
Access to attic or crawl space			
Weather-stripped, in <sup>2</sup> per access	2.8	2.8	1.2
Not weather-stripped, in <sup>2</sup> per access	4.6	4.6	1.6

Fuente: KREIDER, Jan. Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning. New York: CRC Press p404.

En la figura 42 se observa la selección de factores de área para marcos de ventana con sellos y marcos de puertas sin sellos.

**Figura 42. Factores de área estimadas para marcos de ventanas y puertas.**

Component	Best Estimate	Maximum	Minimum
<u>Wall-Window frame</u>			
Wood frame wall			
Caulked, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.004	0.007	0.004
No caulking, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.024	0.038	0.022
Masonry wall			
Caulked, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.019	0.03	0.016
No caulking, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of window	0.093	0.15	0.082
<u>Wall-Door frame</u>			
Wood wall			
Caulked, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of door	0.004	0.004	0.001
No caulking, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of door	0.024	0.024	0.009
Masonry wall			
Caulked, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of door	0.0143	0.0143	0.004
No caulking, in <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup> of door	0.072	0.072	0.024

Fuente: KREIDER, Jan. Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning. New York: CRC Press p404.

Para el cálculo de los calores generados por infiltraciones se usa la siguiente fórmula utilizada en el manual de refrigeración de la primera edición en la página 5.1

$$q_s = 1.10 * \Delta T * Q_{infiltraciones}$$

Donde

$q_s$  Es el calor en Btu/h

$\Delta T$  Es la diferencia entre la temperatura interna y externa en Fahrenheit.

$Q_{infiltraciones}$  Es el caudal de infiltraciones en in<sup>3</sup>/min

Ahora se pasara a hacer el cálculo tipo como se explicó anteriormente se selecciona un coeficiente de Stack Sacado de la figura 38.

$$a_s = 0.000145 \left[ \frac{\left(\frac{L}{S}\right)^2}{\text{cm}^4 * K} \right]$$

Además de un coeficiente de viento. Sacado de la figura 39.

$$a_w = 0.000319 \left[ \frac{\left(\frac{L}{S}\right)^2}{\text{cm}^4 * \left(\frac{m}{S}\right)^2} \right]$$

Para los factores de área se tiene uno por cada uno de los elementos de análisis obtenidos de las figuras 41 y 42.

Para ventana.

$$F_{ventana} = 0.086 \left[ \frac{in^2}{ft^2} \right]$$

Para la puerta

$$F_{puerta} = 0.157 \left[ \frac{in^2}{ft^2} \right]$$

Para el marco de la ventana

$$F_{marcoventana} = 0.019 \left[ \frac{in^2}{ft^2} \right]$$

Para el marco de la puerta

$$F_{marcopuerta} = 0.072 \left[ \frac{in^2}{ft^2} \right]$$

Dichos factores se multiplican por cada una de las áreas en  $ft^2$  para hallar el área de infiltraciones en  $in^2$

Se tienen las áreas de cada uno de los elementos de análisis en  $ft^2$

$$A_{ventana} = 1.1024[ft^2]$$

$$A_{puerta} = 18.1823799[ft^2]$$

$$A_{marcoventana} = 0.62[ft^2]$$

$$A_{marcopuerta} = 2.16139112[ft^2]$$

Se calculan las áreas de infiltraciones en  $in^2$

$$A_{infiltracionesventana} = F_{ventana} * A_{ventana}$$

$$A_{infiltraciones_{puerta}} = F_{puerta} * A_{puerta}$$

$$A_{infiltraciones_{marcoventana}} = F_{marcoventana} * A_{marcoventana}$$

$$A_{infiltraciones_{marcopuerta}} = F_{marcopuerta} * A_{marcopuerta}$$

Para finalmente obtener

$$A_{infiltraciones_{ventana}} = 0.094791209[in^2] = 0.61155496[cm^2]$$

$$A_{infiltraciones_{puerta}} = 2.85463364[in^2] = 18.4169544[cm^2]$$

$$A_{infiltraciones_{marcoventana}} = 0.01178001[in^2] = 0.07599993[cm^2]$$

$$A_{infiltraciones_{marcopuerta}} = 0.15562016[in^2] = 1.00399903[cm^2]$$

La tabla C1 del anexo C muestra las áreas de fugas efectivas en  $[cm^2]$ , se debe tener en cuenta que se deben manejar estas unidades ya que son las unidades que manejan las constantes de Stack y de viento.

Para un ejemplo se tiene la velocidad del viento a las 3 p.m. y las temperaturas externa e internas.

$$v = 8.944 \left[ \frac{m}{s} \right] = 6.26570537 \left[ \frac{ft^3}{min} \right]$$

$$T_{in} = 306.104[K] = 65.104 [^{\circ}F]$$

$$T_{out} = 304.3[K] = 63.3[^{\circ}F]$$

$$\Delta T = 1.804 [K] = 0.884[^{\circ}F]$$

Con todos los datos ya se puede calcular el caudal de infiltración.

$$V_{puerta} = A_{infiltraciones_{puerta}} * \sqrt{(a_s * \Delta T + a_w * v^2)}$$

$$V_{puerta} = 18.4169544[cm^2] * \sqrt{(0.000145 * 1.804 + 0.000319 * 8.944^2)}$$

$$V_{puerta} = 2.95705572 \left[ \frac{L}{s} \right] = 6.265705 \left[ \frac{ft^3}{min} \right]$$

Para finalmente hallar las infiltraciones la cual varía por horas como se muestra en la tabla C2 del Anexo C. Se toma infiltraciones para una puerta y un marco de puerta en la casa sin modificaciones y dos ventanas, una puerta, un par de marcos de ventanas y un marco de puerta para la casa con modificaciones.

Ahora con dicho caudal se calcula el calor sensible por infiltraciones. Manual de refrigeración ASHRAE capítulo cinco.

$$q_s = 1.10 * \Delta t * scfm$$

Donde  $q_s$  es en  $Btu/h$

$\Delta t$  es en  $^{\circ}F$

$scfm$  es el caudal en  $ft^3/min$

Por lo tanto para la puerta a las 3pm.

$$q_s = 1.10 * 0.884 * 6.265705$$

$$q_s = 6.087224 \left[ \frac{Btu}{h} \right]$$

Para cada uno de los elementos presentes en el recinto con modificaciones se halla el calor por infiltraciones los cuales están presentes desde la tabla C3 hasta la tabla C6 del Anexo C.

La tabla C7 del anexo C muestra el calor total por infiltraciones en las horas más significativas del 6 de febrero.

El calor por infiltraciones es muy pequeño comparado al calculado por superficies, así que se puede definir a partir del método de la ASHRAE que la carga térmica será en Febrero entre los tres meses analizados con una carga de refrigeración para mantener el recinto a  $25^{\circ}C$  para las quince horas, será:

$$Q = Q_{superficies} + Q_{infiltraciones} \text{ (puerta y marco de la puerta 3 p.m.)}$$

$$Q = 5929+6,422$$

$$Q = 5935,422 \text{ [Btu/h]}$$

$$Q = 1700 \text{ [W]}$$

### 4.3 MODELAMIENTO EN EL SIMULADOR

Dentro del modelamiento y simulación del recinto se tienen dos procesos principales, inicialmente todo lo relacionado al desarrollo por software del recinto sin ninguna modificación junto con una validación del modelo con el comportamiento real y el modelo matemático desarrollado en Matlab, con el propósito de tener confiabilidad en el modelamiento realizado y posteriormente la simulación de los métodos de refrigeración pasiva analizados individualmente, para conocer sus capacidades de refrigeración.

**4.3.1 Fichero climático.** Para el inicio del desarrollo del modelamiento y simulación de cualquier edificación, es necesario crear un fichero climático, en el cual estarán plasmadas todas las características del medio que rodea el recinto en análisis. El fichero debe tener un formato EPW para su utilización. Para la creación de este fichero se utiliza el programa *Elements* (figura 43), el cual permite crear un fichero climático suministrándole la información meteorológica necesaria y solicitada.

**Figura 43. Programa Elements para creación de fichero climático.**

archivo en element para modificar cuando tengamos mas dias.elements - Elements

File Edit Tools View Window Help

Site Name: Piedecuesta  
 Latitude [degrees]: 6.98 Longitude [degrees]: -73.06  
 Time Zone: -5 Elevation [m]: 1005

Tools: Offset Scale Normalize Normalize By Month

Variables to Hold Constant:

Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]	Wet Bulb Temperature [C]	Atmospheric Pressure [kPa]	Relative Humidity %	Dew Point Temperature [C]	Global Solar [Wh/m2]	Normal Solar [Wh/m2]	Diffuse Solar [Wh/m2]	Wind Speed [m/s]
2017/01/18 @ 00:00:00	20.9	18.69	90.64	82	17.73	0	0	0	0.89
2017/01/18 @ 01:00:00	21.1	19.39	90.63	86	18.69	0	0	0	0.89
2017/01/18 @ 02:00:00	20.9	18.95	90.57	84	18.12	0	0	0	0.44
2017/01/18 @ 03:00:00	20.5	18.69	90.54	85	17.91	0	0	0	0.44
2017/01/18 @ 04:00:00	19.9	18.24	90.57	86	17.51	0	0	0	1.78
2017/01/18 @ 05:00:00	19.4	17.98	90.59	87	17.2	0	0	0	0.44
2017/01/18 @ 06:00:00	19.3	17.91	90.63	88	17.29	0	0	0	1.33
2017/01/18 @ 07:00:00	19.1	17.71	90.7	88	17.09	81.58	34.33	71.21	1.33
2017/01/18 @ 08:00:00	20.5	18.57	90.78	84	17.73	213.15	76.59	173.84	1.33
2017/01/18 @ 09:00:00	22.5	18.14	90.77	67	16.1	357.2	145.31	257.45	1.33
2017/01/18 @ 10:00:00	24.9	19.19	90.68	60	16.63	630.31	571.3	167.46	1.33
2017/01/18 @ 11:00:00	26.7	20.07	90.59	56	17.22	731.97	573.86	229.4	2.69
2017/01/18 @ 12:00:00	28.7	20.86	90.48	51	17.59	750.86	553.44	264.48	3.58
2017/01/18 @ 13:00:00	28.2	21.17	90.38	55	18.33	748.57	723.81	155.67	8.5
2017/01/18 @ 14:00:00	27.9	20.73	90.32	54	17.76	665.09	726.22	156.19	6.25

Columns: Add Remove Move Left Move Right

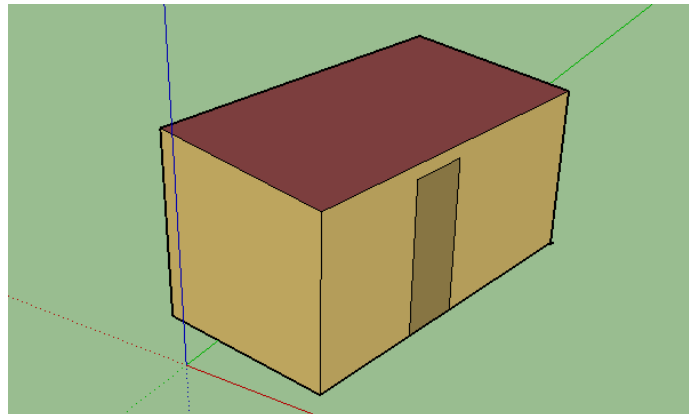
Units:  SI  IP

En la figura 43, se observa donde se debe ingresar la información de temperatura de bulbo seco [°C], la presión atmosférica [Kpa], Humedad relativa [%], la radiación global [W/m<sup>2</sup>], la radiación directa [W/m<sup>2</sup>], la radiación difusa [W/m<sup>2</sup>], la velocidad del viento [m/s] y la dirección del viento (esta debe agregarse en grados). Además de esto se debe suministrar al programa la latitud y longitud del lugar, la elevación y su zona horaria. Realizado este proceso el programa genera un fichero climático de un año. Para el desarrollo del fichero climático se contaba con información climatológica desde el 18 de enero hasta el 18 de abril, por lo que los demás meses tuvieron que ser supuestos de manera libre, dado que el programa debe tener la información del año completo para generar el fichero climático.

**4.3.2 Modelamiento y simulación del Recinto Original.** Se da inicio al proceso de utilización de los programas SketchUp, OpenStudio y EnergyPlus, tomando las características geométricas, físicas, térmicas, y climáticas que se tiene del recinto.

**4.3.2.1 Diseño geométrico.** SketchUp es un entorno gráfico muy útil a la hora de poder darle las características geométricas deseadas a determinado recinto. Para el recinto de análisis basta crear sus dimensiones de planta y volverla en espacio con la opción “*create space for diagram*”, para darle la altura y número de pisos que se desee, esta opción le da la característica de espacio térmico, el cual reconocerá posteriormente el OpenStudio, y permitirá darle las características propias que se desee, también se ubica geométricamente la puerta con el que cuenta originalmente el recinto y se le agrega de igual manera los diez grados que tiene desplazado hacia el Este respecto al Norte. Se notará que el programa ha creado una zona térmica cuando se obtienen color marrón en el techo y un amarillo opaco en sus paredes como se muestra en la figura 44. Un paso importante dentro del diseño geométrico es asignar nombres a cada superficie creada, con el fin de ubicar fácilmente en la importación del archivo al OpenStudio y trabajar de manera más ordenada y precisa en este programa el cual no posee un entorno visual.

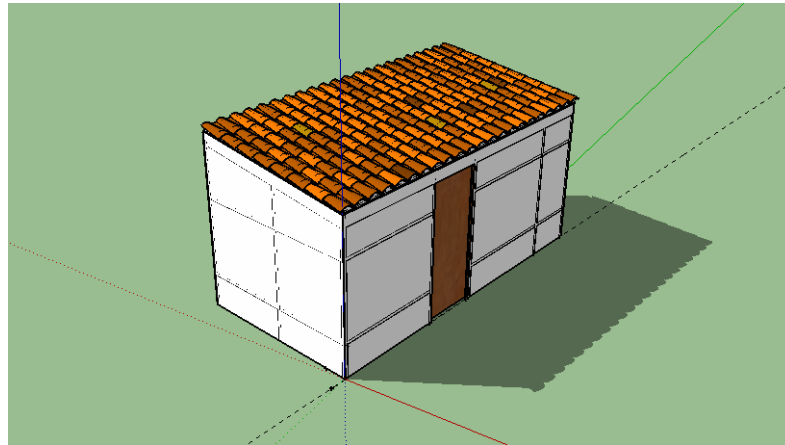
**Figura 44. Diseño geométrico del recinto sin ninguna modificación.**



De la misma manera se realiza un diseño esquemático, que también permite desarrollar este programa, con el fin de darle más realidad visual. Como se muestra en la figura 45. Este modelo esquemático permite la simulación de sombras con la

posición gráfica determinada con lo que se puede verificar los cálculos posteriores de sombras.

**Figura 45. Modelo visual del recinto.**



**4.3.2.2 Caracterización física y térmica:** Con el objetivo de darle las propiedades físicas al modelo geométrico realizado en SketchUp, este archivo se importa al programa OpenStudio en donde se ingresa toda la información meteorológica, física y térmica de los materiales, el perfil de la zona térmica y la asignación de todas las características creadas al recinto geométrico. Realizados estos pasos, se dispondrá a simular el recinto, en donde automáticamente OpenStudio activa el motor de cálculo del programa EnergyPlus y se analizarán los resultados.

- **Montaje del fichero climático.** El fichero climático se debe agregar en la primera pestaña “site” del OpenStudio una vez importado el archivo de SketchUp, y se debe verificar que los datos de longitud, latitud, elevación y zona horaria sean las correctas.

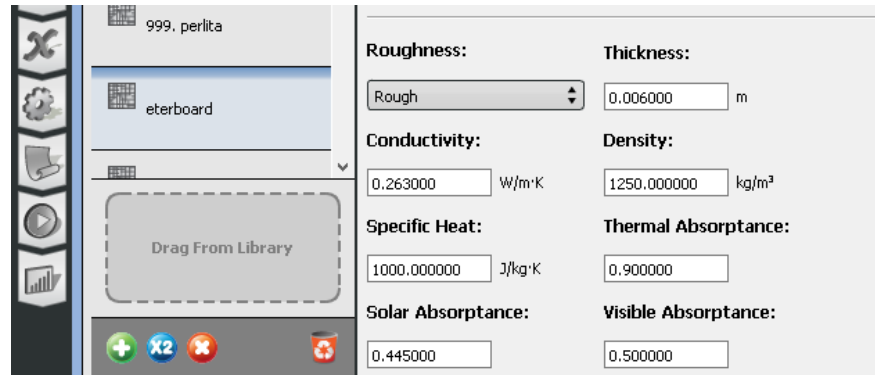
- **Materiales y capa por superficie.** En la tercera pestaña “constructions” e ingresando a la opción “materials”, se crean los materiales que constituyen la casa, en donde se debe tener precaución para los materiales que hacen parte exterior del recinto como las tejas, el Etherboard y la puerta de madera, pues estas estarán sometidas a la radiación en la simulación. En la tabla 26 se presentan los materiales y sus propiedades, la cual ya se había utilizado en el cálculo de carga térmica.

**Tabla 26. Materiales presentes en la casa sin modificaciones.**

Material	K [w/mk]	Esp. [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Cp[J/KgK]	$\epsilon$	$\alpha_s$
Etherboard	0,263	0,006	2000	1000	0,9	0,5
Sapam	0,29	varía	950	1600	0,72	0,5
Madera frodosa	0,21	0,008	800	1255	0,9	0,65
Hormigón de arena	0,6	0,02	1500	837	0,9	0,65
Tejas	1	0,015	2000	800	0,9	0,36
piso	2	0,02	1450	1050	0,9	0,65
Puerta madera	0,29	0,035	900	1600	0,9	0,7

Para la creación de un material basta con seleccionar la opción “add new object”, y a continuación darle un nombre al material que desee crear y suministrar las propiedades térmicas como se muestra en la figura 46 en donde se crea el Etherboard.

**Figura 46. Creación de un nuevo material.**

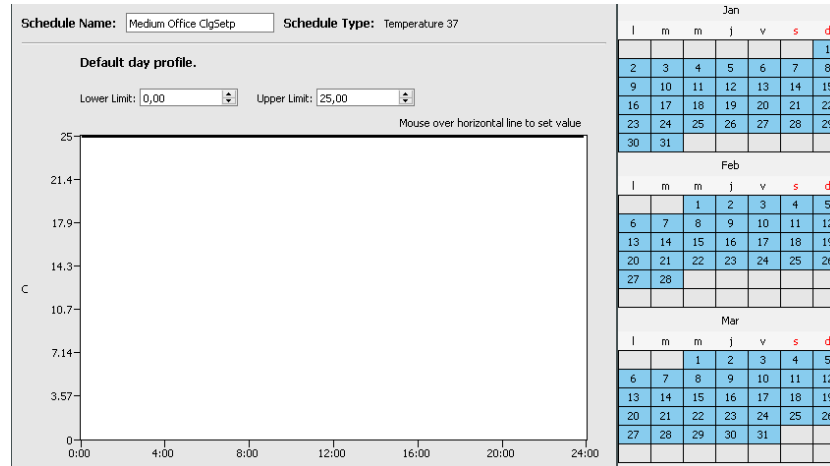


Creando los demás materiales de la misma manera, se procede al siguiente paso de crear las capas de materiales que componen cada superficie del recinto. Tomando como ejemplo la creación de la capa del techo, dentro de la misma pestaña “contruccions” se crea una nueva capa a la cual se le incorpora un nombre y posteriormente se agrega la cantidad de materiales que se desean, recordando que el primer material será el que estará en el exterior de la capa, es decir, expuesto al medio ambiente.

- **Simulador de carga térmica.** Para el cálculo de carga térmica en el software, es necesario la implementación de un termostato programado, cuya finalidad es que funcione como set point de la temperatura máxima que se quiera manejar en el recinto, y de esta manera el simulador pueda calcular la carga térmica que debe retirar del recinto para no dejar aumentar la temperatura interna por encima del set point, es decir aparentar la existencia de un equipo de refrigeración que extraiga el calor necesario para mantener la temperatura que se desee. Para el caso de estudio conocemos que para el 6 de febrero tendremos una temperatura máxima de 33,104°C y la recomendación para una temperatura de confort adecuada puede variar entre 22°C y 25,4°C, por lo que se tomó para el análisis de carga térmica un set point de 25°C como se observa en la figura 47, en donde la línea negra se encuentra la temperatura máxima a la que estará el recinto si

se activa en la simulación, la cual se realiza en otra de las pestañas del software.

**Figura 47. Termostato para el cálculo de carga térmica.**



- Características internas.** Como ya se ha mencionado el análisis del recinto se realizó sin ninguna carga interna, es decir, el interior del recinto no tiene ni equipos ni personas que puedan llegar a interactuar térmicamente con él, pero de igual manera es necesario crear estas características para la zona térmica en el simulador, por lo que se debe crear un tipo de espacio en donde sus características sean cero. Dentro de estas características es necesario suministrar al tipo de espacio, la información del número de personas, la actividad térmica de la persona, el gasto energético de iluminación, de electricidad, de gas, de agua caliente y de equipos especiales, finalmente ingresar la información de las infiltraciones, esta última es la única que se tiene encuentra dentro de la simulación, pues se debe asumir la infiltración de aire por la puerta y el marco de la puerta (Resultados en tablas de anexo C).

El único factor que se modifica dentro de las cargas es el valor respectivo a las infiltraciones de aire, las cuales el simulador solo permite colocar un valor por lo

que se promedia los valores calculados de los flujos de aire que entran por el marco de la puerta y la puerta tabla C3 y C4 del anexo C respectivamente.

$$\text{Caudal promedio de infiltraciones} = 3,2 \left[ \frac{ft^3}{min} \right] = 0,00151 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

- Asignación de propiedades por superficie.** Como último paso de la simulación es necesario agregar todas las características creadas a la zona térmica del recinto, además darle las propiedades a cada superficie que se tiene del recinto. Para la realización de estos últimos pasos, OpenStudio cuenta con la pestaña “spaces”, en el cual se podrán caracterizar de manera global todas las características que pueda tener el recinto de análisis. En este caso se ingresó el tipo de espacio diseñado anteriormente y a cada superficie se le incorporó su determinada capa de materiales como se puede observar en la figura 48, en donde están caracterizadas las superficies principales, es decir muros, techo y suelo.

**Figura 48. Asignación de propiedades a las capas del recinto.**

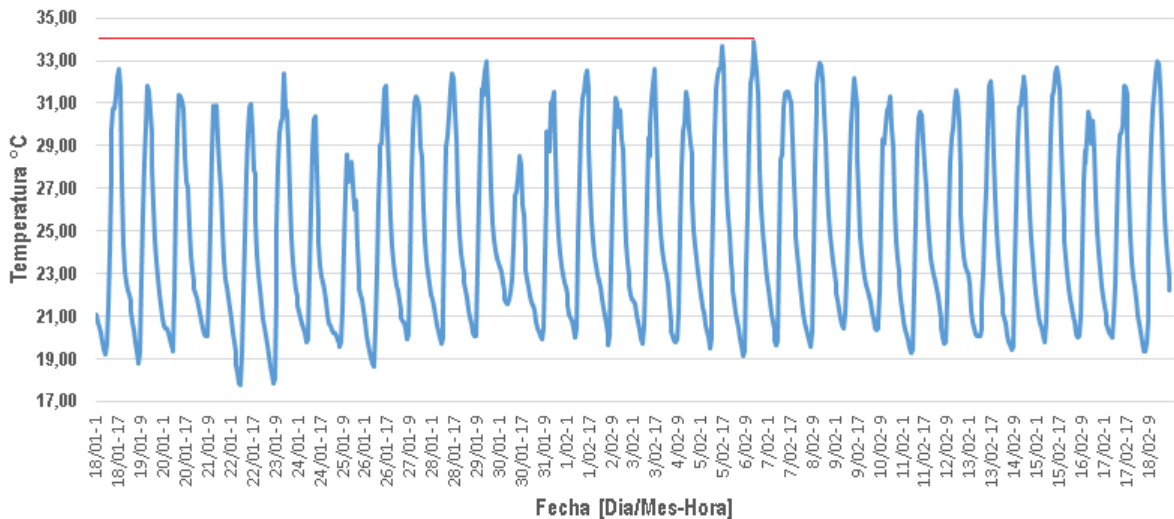
Space Name	All	Surface Name	Surface Type	Construction	Outside Boundary Condition	Outside Boundary Condition Object	Sun Exposure
	<input type="checkbox"/>		Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected		Apply to Selected
casa	<input type="checkbox"/>	pared lat izq	Wall	pared lateral izquierda	Outdoors		SunExposed
	<input type="checkbox"/>	techo	RoofCeiling	Techo	Outdoors		SunExposed
	<input type="checkbox"/>	Piso	Floor	Piso	Ground		NoSun
	<input type="checkbox"/>	pared trasera	Wall	pared trasera	Outdoors		SunExposed
	<input type="checkbox"/>	pared frontal	Wall	pared frontal	Outdoors		SunExposed
	<input type="checkbox"/>	pared lat derecha	Wall	pared lareral derecha	Outdoors		SunExposed
	<input type="checkbox"/>						

**4.3.2.3 Resultados de simulación del recinto original:** Una vez terminada toda la caracterización geométrica, física y conceptual del recinto, se escoge el tipo de variables que se desea como resultado durante la simulación, además el día o los

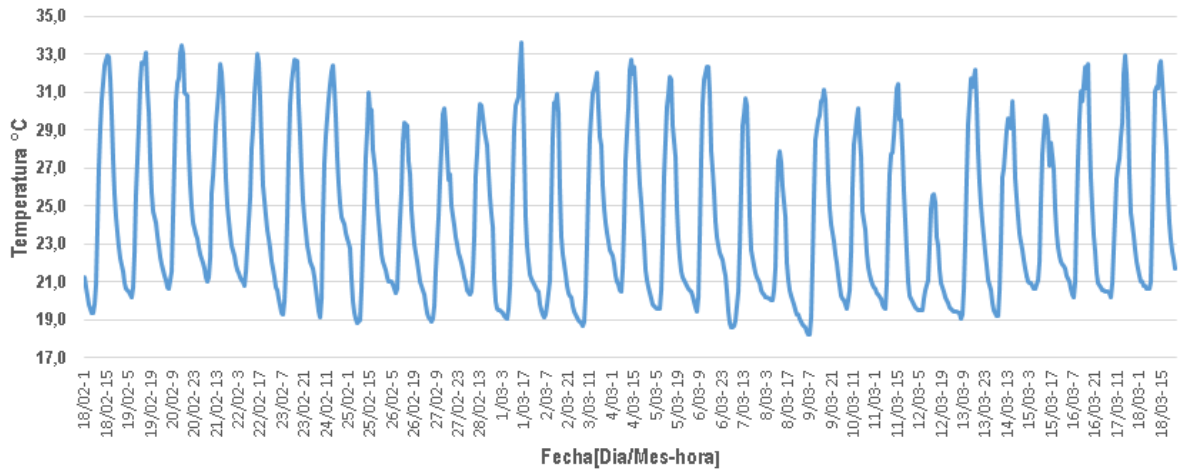
días que se desea simular. Establecidos estos detalles, el software genera una pestaña anexa con los resultados obtenidos.

Recordando que el día crítico según los cálculos teóricos fue para el 6 de febrero, se muestra en las figuras 49, 50 y 51 la simulación de las temperaturas internas entre 18 de Enero al 18 de Abril, se puede apreciar la temperatura más alta alcanzada en el interior del recinto ( $34,2^{\circ}\text{C}$ ) y por lo tanto la carga térmica máxima se alcanzara el 6 de febrero dentro de los resultados del simulador. El software calcula la temperatura interna del recinto del mencionado día y en una simulación aparte calcula la carga térmica necesaria para mantener el recinto a la temperatura del set-point establecido ( $25^{\circ}\text{C}$ ). En la figura 52 se puede observar el resultado obtenido, comparada con la temperatura ambiente, donde la línea azul es la temperatura ambiente y la naranja la temperatura interna del recinto.

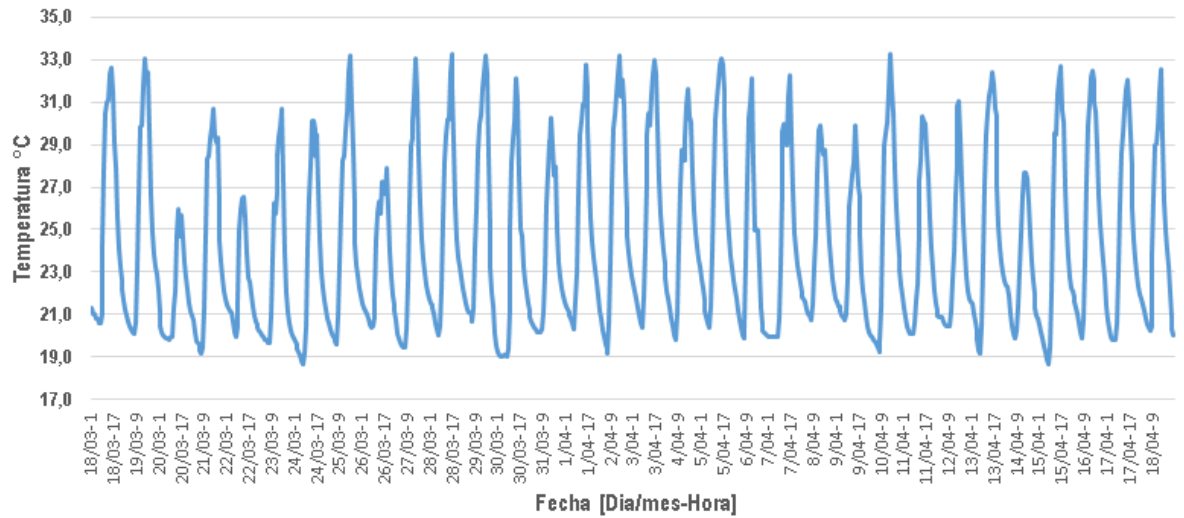
**Figura 49. Comportamiento de la temperatura interna del 18 Enero al 18 de Febrero.**



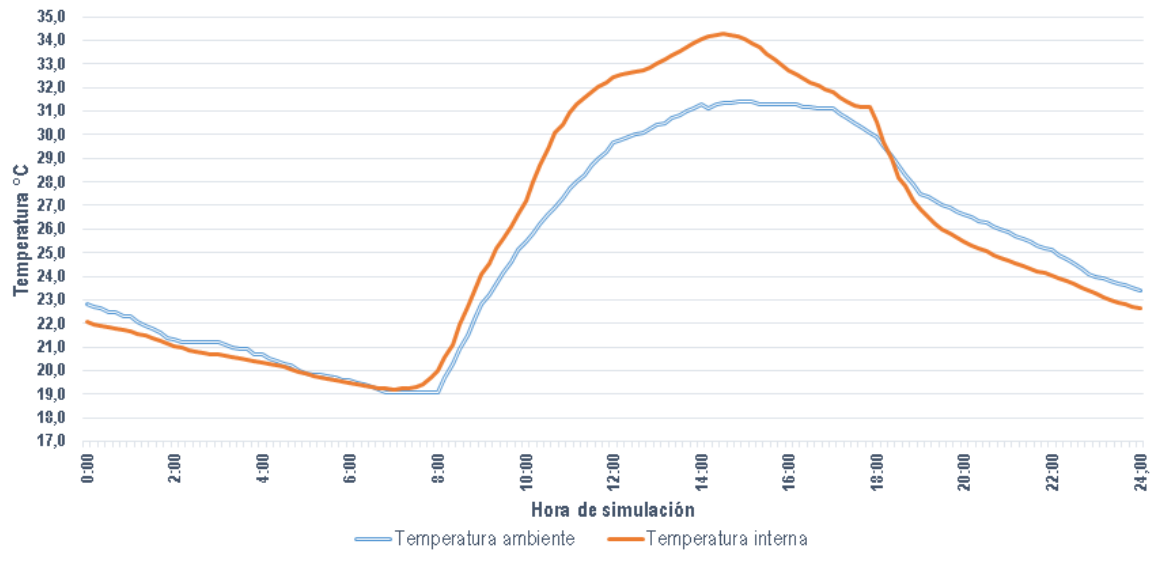
**Figura 50. Comportamiento de la temperatura interna del 18 febrero al 18 de marzo.**



**Figura 51. Comportamiento de la temperatura interna del 18 marzo al 18 de abril.**

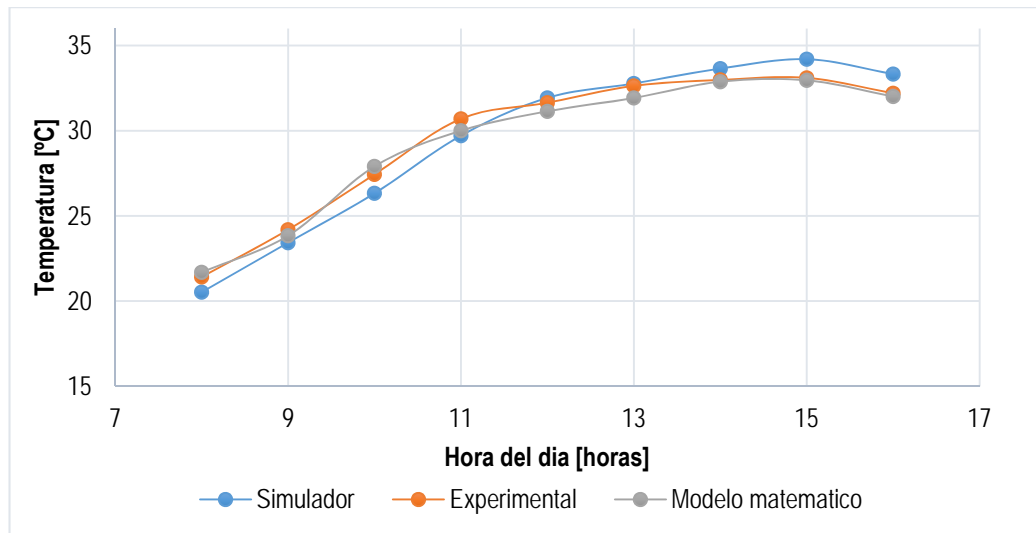


**Figura 52. Resultado de temperatura interna en simulación para todo el día crítico.**



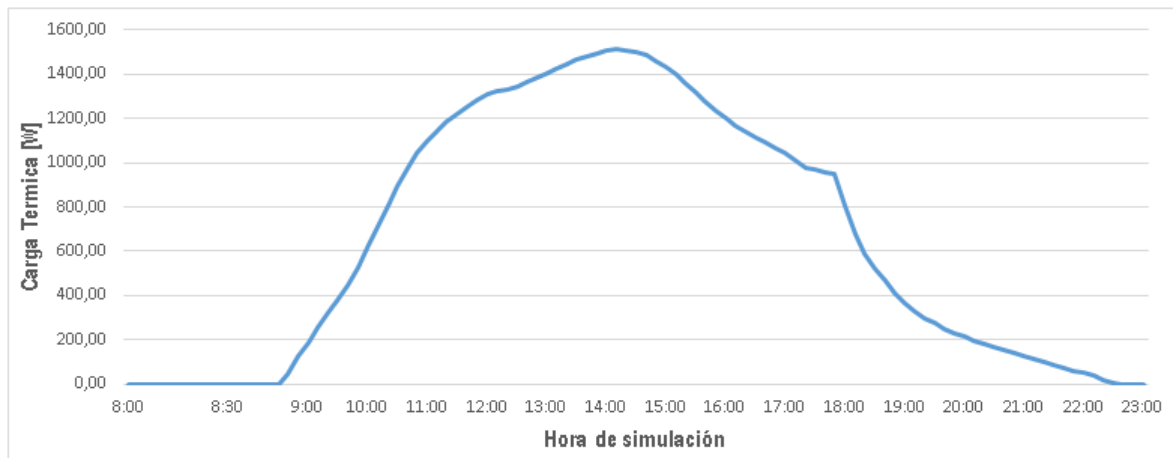
De la misma manera se presenta en la figura 53 la comparación de la temperatura promedio interna obtenida experimentalmente por las termocuplas, las obtenidas por la simulación para el día crítico 6 de febrero en los periodos con los que se cuenta información de las termocuplas y el resultado de la simulación del modelo matemático desarrollado en Matlab.

**Figura 53. Temperatura interna del recinto del simulador, modelo matemático y experimental.**



Con los resultados obtenidos en las figuras, se calcula un porcentaje de error mediante el cálculo de error relativo. En las diferentes horas, en donde se concluye que el máximo porcentaje de error es del 4% respecto al simulador y se da en la primera hora de simulación (8 a.m.), un error admisible en este tipo de manejo de simulaciones y para el modelo matemático de un error del 2,26% a las 11a.m, la tabla de errores se puede visualizar en el anexo D y la ecuación utilizada.

**Figura 54. Carga térmica para el día crítico 6 de febrero del recinto sin ninguna modificación.**



En la figura 54 se muestra el cálculo de carga térmica para el día crítico por medio del software Openstudio, se observa que la carga máxima está en el valor de 1508 [W], cercano a las tres de la tarde. Anteriormente, en el cálculo de la carga térmica con el método CDTL a las 3 de la tarde se obtuvo un valor de 1740 [W].

Realizando una comparación con el resultado obtenido por el método CDTL se observa un error del 13,3% (tabla 27), esto se presenta como resultado del número de interpolaciones en tablas y la sencillez de su implementación, además que los materiales escogidos para las paredes no son exactamente iguales en su comportamiento térmico a los reales, pero se obtiene una estimación que está dentro de un rango admisible del simulador para el cálculo de carga térmica, de igual manera el recinto cuenta con infiltraciones, ya que hay ranuras entre el suelo y cada una de las paredes, las cuales son difíciles de calcular y de mantener selladas totalmente, dado que no se cuenta con un suelo totalmente plano. Los resultados del simulador lograron corroborar el comportamiento de las temperaturas internas obtenidas experimental y teóricamente en el modelo de matlab.

**Tabla 27. Comparación de los valores de la carga térmica.**

Carga método CDTL [W]	Carga simulador [W]	Porcentaje de error [%]
1740	1508	13,3

**4.3.3 Modelamiento de métodos pasivos.** A partir de los resultados obtenidos en la simulación normal y con un pequeño margen de error en el funcionamiento del simulador en el recinto sin ninguna modificación, el siguiente paso será realizar la implementación en el software de sistemas pasivos de climatización al recinto (Anexo G), con la finalidad de encontrar los mejores métodos que aporten una disminución de temperatura interna dentro del recinto, se trabajaron modificaciones en paredes (Tabla G1 y G2), techo (Tabla G3) implementación de ventanas abiertas (Figura G11,G12 y G13) y cerradas (Tabla G4, G5, G6, G7 y G8), instalación de sombras en ventanas (Figura G9 y G10) , muro tromble y fachadas ventiladas (Figura G14 y G15).

**4.3.4 Resultados de simulación de métodos pasivos.** Realizadas todas las simulaciones, analizando de manera separada cada método pasivo implementado, se presentan los mejores resultados obtenidos de cada grupo de análisis (techo, paredes, ventanas) numéricamente, comparando la temperatura interior del recinto que se obtuvo para el día crítico de diseño en el simulador, recordando que la temperatura fue de 34,2°C.

**4.3.4.1 Paredes.** Para las simulaciones en el techo se implementaron 21 materiales en donde se aislaron las 4 paredes sin ventanas. En la tabla 28 se muestra la temperatura máxima alcanzada para el 6 de febrero y el porcentaje de disminución de la temperatura con respecto a la casa sin ninguna modificación en sus paredes.

**Tabla 28. Resultados de simulación en paredes.**

Numero	Paredes	Espesor [cm]	Temperatura máxima [°C]	% mejora respecto al simulador
1	Afelpado	7,62	30,5	10,76
2	Afelpado	10,16	28,3	17,28
3	Arlita	5	30,1	11,87
4	Cañamo	4	29,0	15,17
5	Calulosa natural	4	29,2	14,65
<b>6</b>	<b>Fiberglass</b>	<b>6,35</b>	<b>29,2</b>	<b>14,56</b>
<b>7</b>	<b>Fiberglass</b>	<b>8,89</b>	<b>28,8</b>	<b>15,91</b>
8	Lana de oveja	5	29,6	13,54
9	Lana de oveja	10	28,8	15,85
10	Lana mineral	1,6	31,5	7,69
11	Lana mineral	2,4	30,4	11,11
12	Lino	4,5	30,2	11,64
13	Manta cerámica	2,54	30,4	11,14
14	Manta cerámica	10,16	28,0	18,04
15	Placa poliuretano	2,54	29,7	13,19
16	Placa poliuretano	10,16	27,7	18,95
17	Placa térmica	2,54	30,1	11,93
18	Placa térmica	10,16	28,1	17,75
19	Rolloflex	7,62	29,2	14,53
20	Rolloflex	10,16	28,4	17,05
21	Manta aislante	2,54	30,2	11,61

Como se puede observar la mayoría de los materiales tienen una disminución por encima del 10% de la temperatura para el 6 de febrero, por lo que la selección del aislante se deberá realizar basado en un análisis económico.

**4.3.4.2 Techos.** Dentro de las simulaciones realizadas para el techo, se implementaron cinco tipos de materiales para la disminución de la temperatura interna máxima para el día crítico. En la tabla 29 se puede observar los primeros

cinco materiales que se utilizaron y adicionalmente se mezcla la implementación de la pintura blanca por obtener el mejor resultado respecto a las tejas y la pintura metálica, mientras que las opciones cuatro y cinco son otros aislantes de fácil manejo en los techos.

**Tabla 29. Resultados de simulación en el techo.**

Numero	Techo	Temperatura máxima [°C]	% mejora respecto al simulador
1	Pintura blanca	33,2	2,982
2	Teja upvc	33,9	0,848
3	Pintura metálica	33,7	1,374
4	Fiberglass	33,4	2,398
5	Aislante especial para techo (Roof insolation)	33,4	2,427
<b>6</b>	<b>Pintura+ fiber</b>	<b>32,9</b>	<b>3,684</b>
7	Pintura+Roof insolation	31,9	6,725

Se observa que las mezclas con la pintura junto con los aislantes propuestos disminuyen en un mayor porcentaje la temperatura interna máxima para el día crítico, por lo que surge la posibilidad de implementar la pintura blanca alrededor de toda la casa, ya que éste es un método que se aplica en el exterior de las paredes, mientras que los métodos de aislamiento en paredes se implementan al interior de las mismas.

**4.3.4.3 Ventanas.** Para determinar las dimensiones y el posicionamiento de las ventanas se hacen diversas pruebas en el simulador, para el dimensionamiento se tienen dos opciones, ventanas de 40[cm] de ancho y 40[cm] alto o ventanas de 80[cm] de ancho y 80[cm] de alto, ya que las paredes no pueden soportar un peso

mayor que el de dichas ventanas; para el posicionamiento también se tienen 2 opciones, ventanas en las áreas laterales del recinto, es decir, una en el área lateral izquierda y otra en la lateral derecha o ventanas en las áreas frontal y posterior, también se analizaron diferentes tipos de vidrio para la ventana, tanto ventanas simples con 4 y 6 [mm] de espesor como ventanas a termopanel con coeficientes de transferencia de calor entre 1,9 y 3,7 [ $\frac{W}{m^2\text{°C}}$ ].

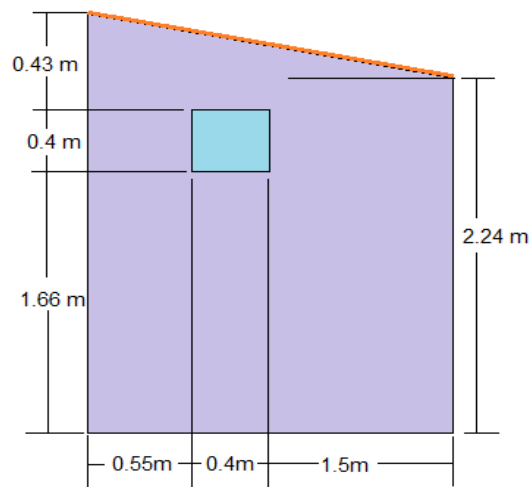
**Tabla 30. Temperatura máxima del recinto con diferentes configuraciones de ventanas.**

Tipo de Vidrio	Frontal y Posterior [40 x 40 cm]	Frontal y Posterior [80 x 80 cm]	Ventanas Laterales [40 x 40 cm]	Ventanas Laterales [80 x 80 cm]
4 mm	34,17	34,18	34,17	34,18
6 mm	34,17	34,18	34,17	34,19
U1,9	34,17	34,17	34,15	34,17
U2,1	34,17	34,18	34,17	34,19
U2,3	34,18	34,19	34,17	34,20
U2,5	34,18	34,20	34,17	34,21
U2,9	34,18	34,22	34,18	34,23
U3,3	34,19	34,23	34,18	34,24
U3,7	34,19	34,25	34,19	34,25

La tabla 30 muestra la temperatura máxima del recinto con las diversas ventanas instaladas, el resultado se busca en el día crítico, el cual es el 6 de febrero donde la temperatura máxima interna de la casa sin modificaciones es de 34,2°C sin ninguna clase de ventana, se pueden ver que la temperatura mínima en el recinto se obtiene con ventanas U1,9 a termopanel (34.15°C), la menor temperatura con ventanas simples se obtiene con vidrios de 4[mm] en caras laterales de 40[cm] de alto por 40[cm] de ancho.

Se debe tener en cuenta que las ventanas simples se simulan con marcos de aluminio y las ventanas a termo panel se simulan con marcos de madera, los materiales anteriormente nombrados para los marcos junto con el PVC, son comúnmente usados en la fabricación de ventanas.

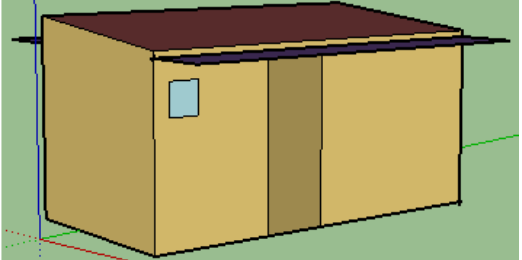
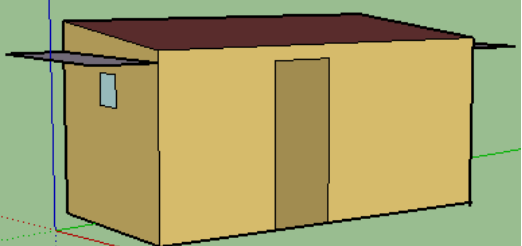
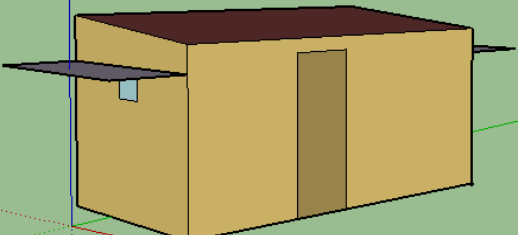
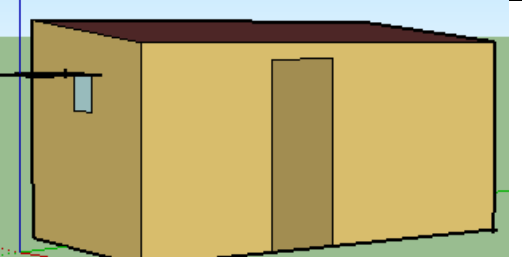
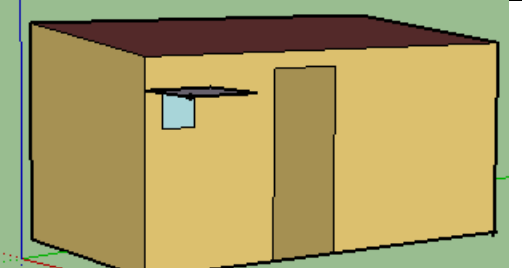
**Figura 55. Posicionamiento geométrico de la ventana en la pared lateral izquierda del recinto.**

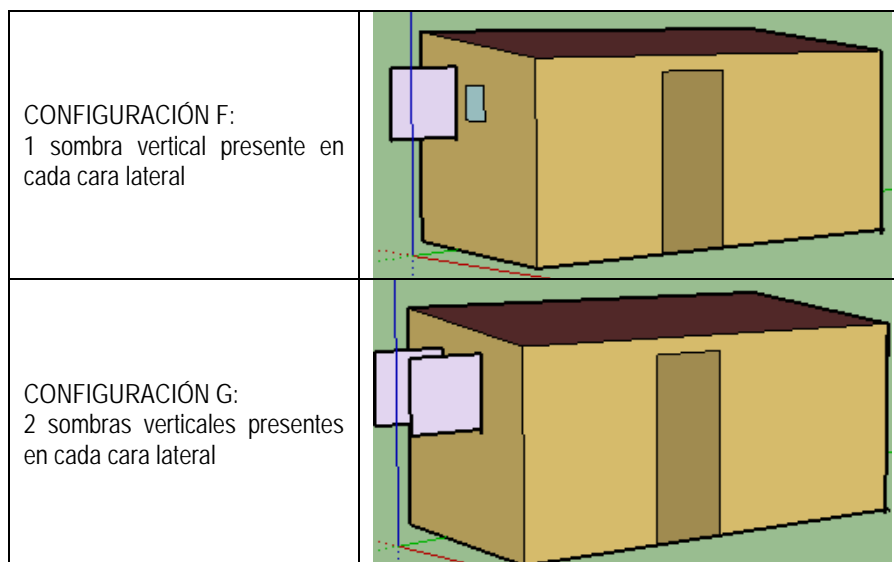


Como se obtienen los mejores resultados en ventanas laterales, se muestra en la figura 55 el posicionamiento geométrico de estas, dicho posicionamiento es influenciado por la colocación interna de los soportes del recinto, ya que por el centro del área lateral en la parte interna pasa un soporte en vertical y otro en horizontal. .

**4.3.4.4 Ventana con aleros.** Para el dimensionamiento de las sombras se usaron diferentes tipos de configuraciones como se muestran en la tabla 31, estas son implementadas a ventanas simples de 40 [cm] de alto por 40 [cm] de ancho.

**Tabla 31. Diferentes tipos de configuraciones para sombras y ventanas en el recinto sin modificaciones.**

Configuración	Imagen del posicionamiento de las sombras
<p>CONFIGURACIÓN A: Sombras largas en caras Posterior y frontal ubicadas a 20[cm] de la ventana</p>	
<p>CONFIGURACIÓN B: Sombras largas en caras laterales a 20[cm] de la ventana</p>	
<p>CONFIGURACIÓN C: Sombras largas en caras laterales pegadas a las ventanas</p>	
<p>CONFIGURACIÓN D: Sombras cortas en caras laterales pegadas a las ventanas</p>	
<p>CONFIGURACIÓN E: Sombras cortas en caras frontal y posterior pegadas a las ventanas</p>	



**Tabla 32. Resultados de las simulaciones de sombras horizontales y verticales en ventanas.**

CONFIGURACIÓN A			
Detalles	T. Interna Max [°C]	Energía Max que entra por ventanas[J]	Energía que no entra [J]
Sin sombra	34,17	231306	0
Sombras de 50 [cm]	33,56	169826	-151480
Sombras de 80 [cm]	33,27	144261	-177045
Sombras de 100 [cm]	33,10	127792	-193514
Sombras de 120 [cm]	32,98	127243	-194063
Sombras de 150 [cm]	32,88	124367	-196939
CONFIGURACIÓN B			
Sin sombra	34,17	239488	0
Sombras de 50 [cm]	33,87	110218	-129270
Sombras de 80 [cm]	33,73	108780	-130708
Sombras de 100 [cm]	33,64	108202	-131286
Sombras de 120 [cm]	33,57	107497	-131991
Sombras de 150 [cm]	33,56	106485	-133003
CONFIGURACIÓN C			
Sin sombra	34,17	239488	0
Sombras de 50 [cm]	33,87	102194	-137294
Sombras de 80 [cm]	33,73	99281,2	-140206,8
Sombras de 100 [cm]	33,64	98281,2	-141206,8
Sombras de 120 [cm]	33,59	97370,2	-142117,8
Sombras de 150 [cm]	33,57	96266,4	-143221,6

CONFIGURACIÓN D			
Sin sombra	34,17	239488	0
Sombras de 50 [cm]	34,10	120192	-119296
<b>Sombras de 80 [cm]</b>	<b>34,00</b>	<b>101206</b>	<b>-110206</b>
Sombras de 100 [cm]	33,91	99565,3	-139922,7
Sombras de 120 [cm]	33,84	99357,5	-140130,5
Sombras de 150 [cm]	33,76	96757,8	-142730,2
CONFIGURACIÓN E			
Sin sombra	34,17	231306	0
S de 50 [cm]	34,12	116682,6	-114623,4
Sombras de 80 [cm]	34,09	104111	-127195
Sombras de 100 [cm]	34,05	94912,1	-136393,9
Sombras de 120 [cm]	34,04	91528,5	-139777,5
Sombras de 150 [cm]	34,03	86221,3	-145084,7
CONFIGURACIÓN F			
Sin sombra	34,17	239488	0
1 sombra de 80 x 80 [cm]	34,10	233244	-6244
1 sombra de 100 x 100 [cm]	33,90	232513	-6975
CONFIGURACIÓN G			
Sin sombra	34,17	239488	0
2 sombras de 80 x 80 [cm]	33,96	229982	-9506
2 sombras de 100 x 100 [cm]	33,88	228674	-10814

Para el análisis de los resultados de la tabla 32, se tiene en cuenta tanto el ahorro máximo de energía con respecto a un modelo sin las sombras y la menor área de sombra ya que el costo de implementación es otro factor importante, para la escogencia de este, se logra entrever que áreas mayores a una sombra de 100 x 100 [cm] no representan un ahorro de energía mayor, además de no bajar la temperatura del recinto, por esto se usan en las tablas dos dígitos significativos.

Se puede también observar en la misma tabla que las sombras verticales aunque bajan significativamente la temperatura del recinto requieren mucha área, por lo tanto no es viable su implementación.

Las ventanas a las cuales se le implementaron sombras son a las conformadas por vidrios de 4mm de espesor y marco de aluminio, esto porque son los que se encuentran normalmente en la industria, y son de fácil fabricación.

**4.3.4.6 Ventanas abiertas.** La tabla 33 muestra la configuración de dos áreas abiertas, una de ellas con un área abierta en las superficies frontal y posterior y la segunda configuración es con ventanas abiertas en las áreas laterales, se debe tener en cuenta que se puede abrir solo un área de 32[cm] de alto por 32[cm] de ancho (espesores de marco 4 cm), recordamos que estamos trabajando ventanas de 40[cm] por 40[cm].

**Tabla 33. Temperaturas máximas internas para diferentes configuraciones.**

Configuración	Máxima temperatura interna
Sin ninguna clase de modificación.	34,2°C
Con Ventanas Abiertas ubicadas en las Áreas Frontal y Posterior.	34,1°C
Con Ventanas Abiertas ubicadas en las Áreas Laterales.	34,1°C

Lo cual demuestra que la mejor configuración es mantener el recinto cerrado al exterior, pues las áreas abiertas permiten la estabilización del aire interno con el externo, y lo que se busca es que la temperatura interna sea menor en una cantidad considerable a la temperatura externa.

**4.3.4.7 Fachadas ventiladas.** Dentro de las simulaciones realizadas se modelaron fachadas ventiladas para cada pared y posteriormente se realizaron dos simulaciones con fachadas ventiladas en toda la casa con la diferencia de un aumento del porcentaje de abertura de la entrada el aire de un 5% al 10%.

**Tabla 34. Resultado de simulación de fachadas ventiladas.**

Numero	Fachada ventilada	Temperatura máxima [°C]	% mejora respecto al modelo original en el simulador
1	pared izquierda	33,7	1,44
2	pared derecha	34,1	0,26
3	posterior	33,1	3,01
4	frontal	34,0	0,46
5	4 paredes 5% apertura	32,0	6,34
6	4 paredes 10% apertura	31,8	6,9

En la tabla 34 se pueden observar los resultados de la temperatura interna máxima para el 6 de febrero, en donde se puede identificar que la temperatura disminuye muy poco comparado a los métodos anteriores y considerando su mayor dificultad para su implementación, esto posiblemente por las bajas velocidades y pocas corrientes de aire que hay en este sector.

Para la pared posterior es aquella con mejores condiciones para la disminución de la temperatura interna, esto considerando que las direcciones de las corrientes del viento que se obtuvieron son mayormente en direcciones oeste y noroeste.

**4.3.4.8 Muro trombe.** En las simulaciones realizadas para muros trombe, de la misma manera que en las fachadas ventiladas se hicieron por separado pared por pared, con distancias entre el muro trombe y la pared propia del recinto de 15 y 30 [cm], tomando vidrios de 4 [mm] de espesor. Los resultados mostrados en la tabla 30 muestran disminuciones muy pequeñas, para la pared izquierda cuenta con el mejor resultado dentro de las simulaciones, debido a que esta presenta para el 6 de febrero radiación solar directa para casi la mayoría del tiempo

**Tabla 35. Resultados de ventilación de muro trombe.**

Número	Muro trombe	Temperatura máxima [°C]	% mejora respecto al modelo original en el simulador
1	Pared izquierda	32,84	3,97
2	Pared derecha	34,25	-0,14
3	Posterior	34,06	0,40
4	Frontal	34,20	0,00
5	Paredes laterales	34,68	-1,40

**4.3.5 Análisis de resultados de simulación de métodos pasivos.** Dentro de todos los métodos implementados se observa que los métodos enfocados a la ventilación no producen efectos positivos a la temperatura interna del recinto, dados casos muy específicos como el muro trombe en la pared izquierda y la fachada ventilada en la pared trasera, sin embargo estos resultados se deben entender como efectos propios del día crítico 6 de febrero y de las características de las corrientes de vientos que posee la zona de estudio.

Por otro lado, la mayoría de aislantes térmicos y la pintura blanca tienen buenos resultados de desempeño, permitiendo pensar en que las ventanas podrían dar la posibilidad de realizar una ventilación propia de la necesidad del ocupante.

**4.3.6 Análisis económico de implementación.** Una vez teniendo claro los diferentes comportamientos de los métodos implementados se analizan los costos de implementación de todos los métodos pasivos con el fin de encontrar y seleccionar las mejores opciones dentro de su comportamiento y su precio. Las cotizaciones y precios se pueden observar dentro del anexo D, en los cuales se puede observar todos los materiales, y métodos pasivos que se implementaron en la fase de simulación.

Recordando las opciones con un buen comportamiento térmico en paredes como lo es la placa de poliuretano, manta cerámica y placa cerámica tienen costos demasiado elevados para implementar en el recinto, como también se puede analizar que la implementación de aislantes naturales tiene un costo alto comparándolo con sus resultados térmicos muy similares para aislantes sintéticos de costos mucho menores (ver tabla 36). Dentro de los aislantes para paredes y techo, con precios bajos y buenos comportamientos térmicos se tienen el afelpado, el rolloflex, lana de oveja y la fibra de vidrio, dentro de los cuales el mejor precio en el mercado es la fibra de vidrio de 8,89 [cm] de espesor y tiene un comportamiento promedio entre los cuatro aislantes anteriormente nombrado con un 15,91% de disminución de temperatura respecto al modelo original en el simulador.

**Tabla 36. Costos y porcentajes de mejora para aislantes preseleccionados.**

N°	Aislante	Espesor [cm]	Precio [cop]	% de mejora respecto al modelo original en el simulador
1	Placa de poliuretano	2,54	1'728288	13,19
2	Placa de poliuretano	10,16	2'274972	18,95
3	Manta cerámica	2,54	1'855042	11,14
4	Manta cerámica	10,16	2'795305	18,04
5	Celulosa natural	4	895679	14,65
6	Cáñamo	4	892500	15,17
7	Lino	4,5	1'111800	11,64
8	Lana de oveja	5	356000	13,54
9	arrita	5	2'210000	11,87
10	Fiberglass	6,35	256000	14,56
<b>11</b>	<b>Fiberglass</b>	<b>8,89</b>	<b>368800</b>	<b>15,91</b>
12	Rolloflex	7,62	424373	14,56
13	Rolloflex	10,16	558831	17,05

Dentro de los resultados aplicados en el techo se observa un buen comportamiento por parte de la pintura térmica, con la posibilidad de agregarla en toda la superficie externa de la casa, y agregando además aislante internamente.

Para los métodos de ventilación como fachadas ventiladas y muro trombe su desempeño fue bastante bajo, esto debido a las bajas corrientes y velocidades del viento que se dan en la zona, por lo que su aplicación no es viable dado sus altos costos de implementación y su dependencia a la velocidad del viento. Para la ventanas se puede observar que con la utilización de aleros se puede evitar el ingreso de la radiación directa y permite aumentar las infiltraciones de aire, la iluminación, con una ganancia de temperatura muy bajas, como también permite la apertura de las mismas en caso de tener corrientes de aires altas, lo cual llevara a la temperatura del sistema a balancearse con la temperatura exterior. Dentro de los resultados de vidrios se puede observar que la implementación de ventanas en el sentido norte-sur, reciben menos cantidad de energía, en donde la configuración D un buen resultado utilizando ventanas de 4 [mm] de espesor, en la tabla 37 se muestran los precios para algunos disponibilidades para sombras y precios de ventanas simuladas.

**Tabla 37. Costos de implementación de sombras y ventanas.**

SOMBRAS		
Producto	Especificaciones	Precio [Cop]
<b>Toldo</b>	<b>Toldo de 80 x 80 [cm]</b>	<b>\$20220</b>
Toldo	Toldo de 1x1,5m	\$1200000
Toldo	Santorini 45° 80x80cm	\$1800000

Toldo	DTT (2x1,5m)		\$2600000
VENTANA			
Producto	Cantidad	Especificaciones	Precio [Cop]
Ventana	2	Marco Aluminio 40x40cm con vidrio de 4mm	\$80000
Ventana	2	Marco Aluminio 80x80 cm con vidrio de 4mm	\$160000
Ventanas termopanel	1	Ventana PVC americano termopanel 70x50cm U ventana 3W/m2K	\$250000

**4.3.7 Combinación de mejores resultados.** Se descarta un gran número de métodos pasivos a partir de los resultados obtenidos individualmente y de sus costos de implementación, por lo que se preseleccionan y se desea conocer el comportamiento completo del recinto con la pintura blanca en todas la superficies, con toda la casa aislada y la pintura aplicada, con algunas paredes sin aislamiento y sin pintura, del mismo modo aplicar las ventanas cerradas de 4 [mm] (40[cm] x 40[cm]) a los laterales que tuvieron el mejor desempeño.

**Tabla 38. Mejores combinaciones para el recinto.**

Método	Temperatura máxima [°C]
Pintura en toda la casa [Pt]	31,07
Pt+fiberglass en 3 paredes y techo sin puerta	27,01
Pt+fiberglass en 3 paredes con puerta	27,43
Pt+fiberglass en toda la casa	26,90

Se desarrollan las simulaciones anteriormente nombradas en donde se busca encontrar la mejor combinación de los métodos con los mejores comportamientos individuales, en la tabla 38 se puede observar cuatro simulaciones realizadas variando parámetros de aplicación que presentaron buenos comportamientos térmicos y económicos.

Dentro de estas cuatro simulaciones realizadas y teniendo en cuenta que los rollos de fiberglass en el mercado vienen con 18,59 [m<sup>2</sup>] la mejor opción será aislar las paredes frontal, izquierda y posterior, junto con el techo, además que la diferencia entre aislar toda la casa o solo las tres paredes es de 0,1°C. Exteriormente se simulara la pintura térmica aplicada alrededor de toda la casa a excepción de la pared derecha, a esta combinación se implementó los tres tipos de ventanas cerradas ubicadas lateralmente con aleros de lo cual se obtuvo la tabla 39.

**Tabla 39. Combinación de ventanas con alero a la mejor combinación de aislamiento.**

Método	Temperatura máxima [°C]
Ventana 4mm	26,71
Ventana U=1,9	26,61
Ventana U=3,3	26,52

Se observa la diferencia mínima entre ventanas termo panel y 4mm dado que el alero evita que la radiación directa incida por la ventana de la pared izquierda, la cual para el 6 de febrero reciba la mayor radicación.

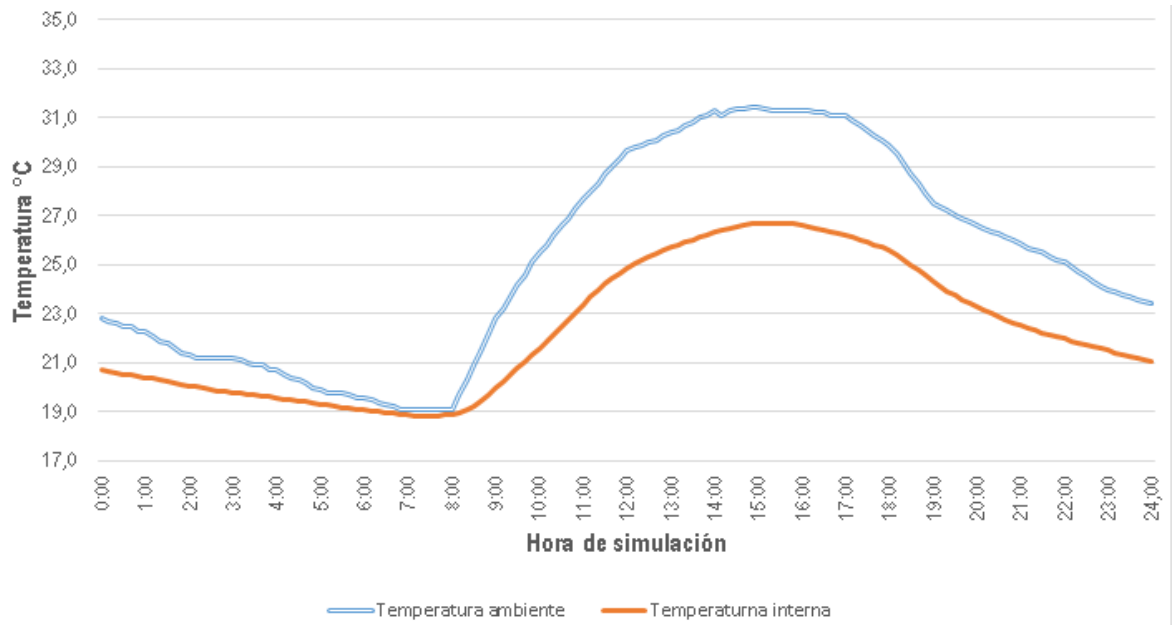
**4.3.8 Selección y resultados de alternativas a implementar.** Teniendo en cuenta la tablas 38 y 39 y analizando que la pintura puede cubrir un total de 30 [m<sup>2</sup>] y dos

rollos de fibra de vidrio cubren 36 [ $m^2$ ], se dará prioridad a las superficies expuestas al sol para el seis de Febrero (frontal, izquierda, posterior y techo), dado que la pared derecha en los meses de análisis (febrero, marzo y abril) no está en su mayoría expuesta a radiación solar. Por lo que la propuesta para aplicación del recinto piloto será:

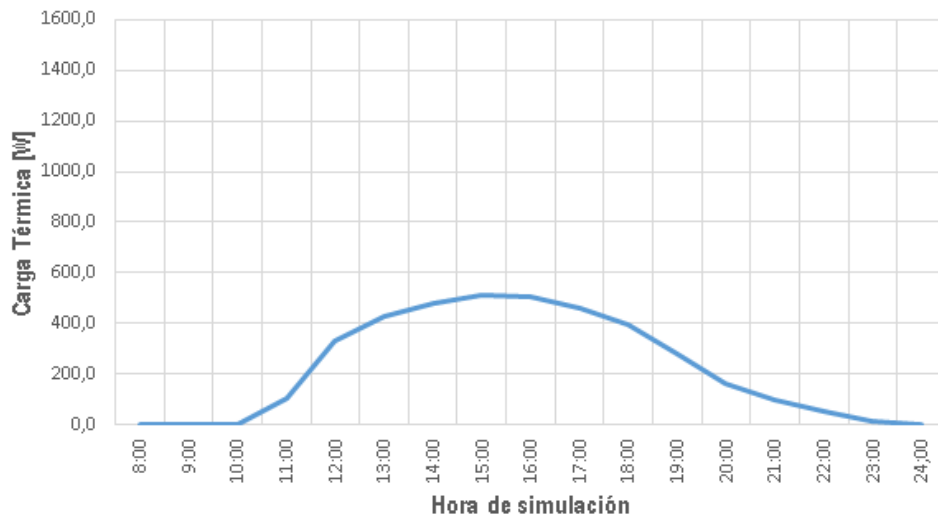
- Pintura para el techo y todas las paredes a excepción de la derecha.
- Aislamiento interno con fibra de vidrio instalándose en el techo y en todas las paredes a excepción de la derecha pues sobre esta pared no incide radiación solar directa.
- Implementación de ventanas de 4 [mm] con marco de aluminio de 40x40 [cm] con un alero horizontal sobre la ventana ubicada en la pared izquierda con un tamaño de 80 x 80 [cm].

Para el día crítico con las implementaciones propuestas, se puede notar en la figura 56 el comportamiento de la temperatura al interior del recinto y en la figura 57 la carga térmica necesaria para un set point de 25°C, en donde se obtiene una temperatura máxima de 26,71°C y una carga 512,9 [W]

**Figura 56. Simulación del comportamiento de la temperatura para el día 6 de Febrero con los métodos aplicados al recinto.**



**Figura 57. Simulación del comportamiento de la carga térmica para el día 6 de Febrero con los métodos aplicados al recinto.**



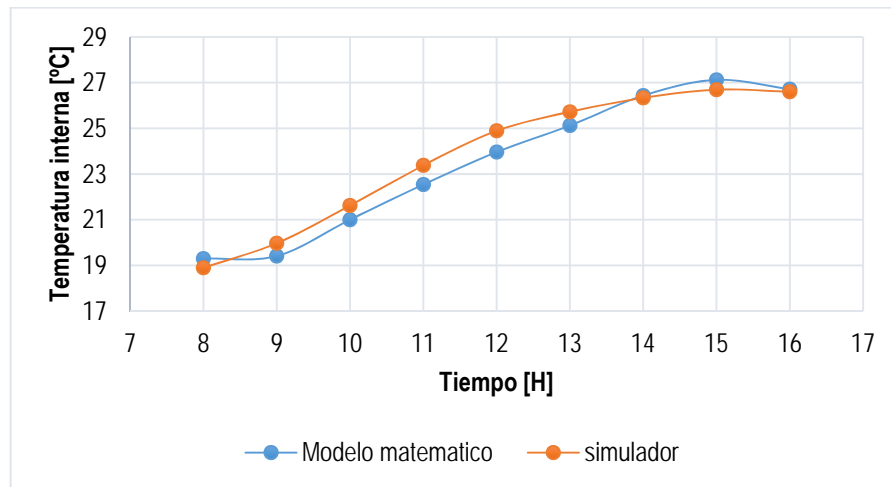
**Tabla 40. Comparación del recinto con métodos pasivos y sin método pasivos.**

Análisis seis de febrero día crítico	Temperatura promedio máxima registrada [°C]	Carga térmica de refrigeración [W]
Con mejoras	26,715	512,9
Sin mejoras	34,2	1508

Se puede observar que dentro de las simulaciones de la temperatura, hay una disminución máxima en estos tres meses de análisis de 7,48°C, es decir un 21,8 % menos de temperatura máxima respecto al modelo sin ninguna modificación. Dentro de la carga térmica tendremos una disminución de 995,1 [W] es decir un 65,9 % menos de carga a retirar como se observan en la tabla 40. Se debe recordar que las simulaciones no tienen ninguna carga interna y por este motivo los porcentajes de ahorros son elevados.

De la misma manera se utilizó el modelo en Matlab para el día crítico que es el 6 de febrero, en donde se modificó con todas las mejoras anteriormente nombradas (diagrama de flujo de este código se puede observar en anexo E, junto con el cálculo tipo) y se simularon las horas de interés dentro del recinto (8 a.m. – 4 p.m.), comparándolas con las obtenidas por el simulador, como se puede observar en la figura 58, se ve la similitud en sus resultado, en donde le porcentaje de error no alcanza el 4%, se toma como valor exacto el resultado del simulador y el valor aproximado el resultado de Matlab (anexo D, tabla D2)

**Figura 58. Comportamiento interno para el recinto modificado en el simulador y modelo matemático para el 6 de Febrero.**



#### **4.4 IMPLEMETACIÓN DEL MODELO PROPUESTO**

La aplicación de los métodos escogidos por su buen desempeño térmico en las simulaciones respecto a su precio, se implementaron en el mes de Abril, donde se realizó la adquisición de los materiales escogidos juntos con lo necesario para su implementación, de la misma manera se usó un montaje de un techo y una pared verde en el recinto contiguo a este con la finalidad de realizar una comparación del comportamiento de las temperaturas internas de ambos recintos de forma experimental (ver figuras 59, 60, 61). La aplicación y montaje de todos los métodos aplicados duro cerca de 6 días, primeramente se instalaron las ventanas en las paredes izquierda y derecha. Posterior a esto se pintaron las paredes frontal, izquierda, derecha con la pintura térmica y de la misma forma el techo. En el interior se aislaron las paredes y techo con fibra de vidrio, recubriéndolo con cartón para evitar tener contacto con él pues puede generar molestias en la piel y dado que es un montaje experimental.

**Figura 59. Instalación de la ventana izquierda.**



**Figura 60. Aplicación del aislante en la pared izquierda.**



**Figura 61. Instalación del Alero y proceso de pintado.**



Para el montaje de techo verde se realizó basados en las recomendaciones de Gernot Minke\*\* donde se tuvieron en cuenta el tipo de inclinación del techo en el recinto, en el cual se aplica una membrana plástica para la protección del techo e impermeabilización del mismo, posteriormente una capa de fieltro para evitar el deslizamiento del sustrato y el abono, a estas dos capas se le realizan aberturas en la parte de menor altura con el fin de drenar el agua y evitar estancamientos no deseados, de la misma manera se utiliza césped propio del parque tecnológico de Guatiguará, con el fin de tener como mínimo 10 cm de capa de tierra para evitar el deterioro del césped, pues comercialmente venden rollo delgados no apto para aplicar en techos o superficies artificiales donde no se cuenta con un espesor deseado de tierra. De la misma manera se fabrica una especie de paredes de contención en madera alrededor del techo con la finalidad de soportar el peso generado por la capa de césped (ver anexo H). Para la pared verde se utilizó un sistema tipo colgante, en la cuales se incorporaron 77 plantas instaladas en la pared izquierda

**Figura 62. Montaje de sistemas de climatización.**



---

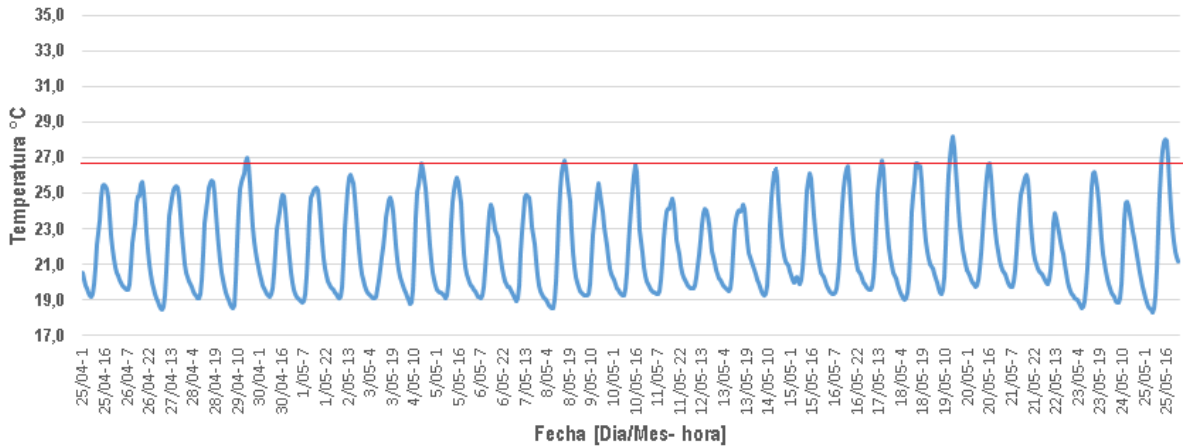
\*\* Gernot Minke es el primer referente mundial en lo que se refiere a la construcción sustentable o natural.

En la figura 62 se puede observar la implementación de los dos recintos terminados con sus implementaciones, buscando mejorar su desempeño térmico, con el fin de realizar una comparación experimental entre estas dos combinaciones implementadas.

**4.4.1 Análisis de resultados de la propuesta.** Las propuestas fueron puestas a prueba durante el periodo de 25 de abril al 25 de mayo, Este mes tuvo variaciones de temperatura bastante fuertes, en donde hubo días con valores altos de radiación. En donde se encontraron varios días que superaron la temperatura máxima interna del recinto encontrada para el 6 de febrero que se especificó como el día crítico en base al análisis de los tres meses de datos meteorológicos en lo que se basaron todos los análisis y cálculos realizados. En la tabla 34 se presentan los días donde la temperatura interna del recinto supero la temperatura propuesta como máxima para el 6 de febrero con el recinto modificado ( $26,71^{\circ}\text{C}$ ) y las temperaturas alcanzadas al interior del recinto.

De la misma manera se modificó el fichero climático desde enero 18 hasta el 25 de mayo, con el objetivo de poder corroborar los datos obtenidos por las termocuplas, en la figura 63 se muestra la simulación del recinto en el rango de 25 de abril al 25 de mayo (rango de tiempo de análisis), en donde la línea roja horizontal representa la temperatura ( $26,71^{\circ}\text{C}$ ), es decir los picos que superen esta línea tendrán una mayor temperatura a la crítica hallada durante los tres meses de análisis.

**Figura 63. Resultados de temperatura interna para el mes de prueba en el recinto piloto.**



Estos 9 días de la misma manera son los días en que las termocuplas obtuvieron temperaturas más elevadas de las esperadas dentro del recinto modificado. En la tabla 41 se presentan la temperatura máxima interna del recinto promediada de las termocuplas, juntos con las temperaturas halladas en la simulación.

**Tabla 41. Comparación de temperaturas medidas y simuladas para el mes de prueba en los días que superaron el día crítico.**

Fecha	Temperatura máxima censada [°C]	Temperatura máxima simulada [°C]	Porcentaje de error [%]
29/04/17	28,82	27,04	6
04/05/17	28,3	26,8	5,3
08/05/17	28,21	26,84	4,8
10/05/17	27,6	26,7	3,2
17/05/17	28,209	26,87	4,7
18/05/17	26,85	26,95	0,3
19/05/17	30,15	28,2	6,4
20/05/17	28,18	26,84	4,7
25/05/17	29,79	28,05	5,8

**4.4.1.1 Pared Verde:** Los resultados obtenidos dentro de la prueba experimental por parte de esta aplicación no tuvieron grandes disminuciones de temperatura interna dado que aun el recinto posee 3 superficies sin ningún elemento que pueda ayudar a evitar el ingreso de calor. Los resultados de temperaturas máximas se presentan en el anexo H, junto con sus costos de implementación y mantenimiento.

## **4.5 SIMULACIÓN DEL RECINTO CON CARGA INTERNA**

Para realizar una comparación económica de los sistemas pasivos de refrigeración aplicados al recinto es necesario realizar una simulación mucho más real de la carga de refrigeración del recinto, es decir realizar un horario de cargas internas de personas, luces y equipos para poder realizar una comparación más real frente a un sistema de refrigeración convencional y poder analizar de esta manera un análisis económico a partir de un equipo de refrigeración convencional.

**4.5.1 Carga térmica.** Para la simulación de cargas térmica se tendrán las siguientes características, el mismo recinto piloto pero dentro del recinto habrá una cantidad de personas, una carga de iluminación y de equipos de cómputo, junto con un horario de trabajo establecido, Estos se muestran en la tabla 42 y de la misma manera se crean los horarios y cargas internas igual que como se mostró en la infiltraciones, para un horario de oficina de 8 am-12 am y 2 pm-6 pm.

**Tabla 42. Tipos de cargas internas a utilizar en el simulador.**

Tipo de carga	Carga [W] <sup>35</sup>	Modelo	Fracción radiante <sup>36</sup>	Fracción visible
Persona	150		0,7	0
Iluminación	28	Tbs165 G 2X115 philips	0,72	0,18
Equipos	Impresora [450]	genérico	0,3	0
	Computador [80]	Computador de mesa	0,1	0

Dentro de la comparación se realizarán dos simulaciones, una donde la casa sin ninguna modificación con las cargas internas anteriormente nombradas y la segunda el recinto con las modificaciones de elementos pasivos juntos con las cargas internas, con el fin de encontrar el porcentaje de ahorro.

En la tabla 43 se muestra el resultado de la carga térmica para ambas simulaciones para el día crítico. Sus graficas se muestran en el anexo I.

**Tabla 43. Resultados de carga térmica para recinto con y sin modificaciones para el 19 de mayo.**

Simulación	Carga térmica máxima [W]
Real sin modificaciones pasivas	2010
Real con modificaciones pasivas	803.32

**4.5.2 Selección de equipo y análisis de costos.** A partir del resultado obtenido se realiza la búsqueda de un equipo que pueda suministrar la carga térmica requerida por la simulación del recinto sin ninguna modificación (tabla 44), con el fin de poder determinar el gasto de uso eléctrico que pueda llegar a tener.

<sup>35</sup> ASHRAE. Handbook Cooling and heating load calculation manual: ASHRAE Research. 1992.

<sup>36</sup> ASHRAE. Handbook Fundamental: ASHRAE Research. 2013.

**Tabla 44. Cantidad de energía que se necesita retirar del recinto para un Set Point de 25°C.**

Modelo	Carga Térmica [W]	Factor de 10% [W]	Capacidad Térmica nominal buscada [W]	Capacidad Térmica nominal [W]
Casa sin modificaciones	2010	201	2211	2500

La figura 64 se muestra el equipo seleccionado para el recinto piloto, cuando la casa no presenta ninguna clase de modificación. También se puede observar la ficha técnica del equipo (figura 65) donde se puede observar su capacidad nominal como el consumo energético.

**Figura 64. Equipo AO9RLNSB.**



**Figura 65. Especificaciones técnicas del equipo AO9RLNSB.**

Unidad				9K	12K
Modelo unidad interior				AO9RLNSB	A12RLNSB
Capacidad	Refrigeración	Min / Nom / Max	W	890 / 2.500 / 3.700	900 / 3.500 / 4.040
	Calefacción	Min / Nom / Max	W	890 / 3.200 / 4.100	890 / 3.800 / 5.100
	Calefacción -7°C	Nominal	W	3.000	3.600
Consumo	Refrigeración	Nominal	W	670	1.080
	Calefacción +7°C	Nominal	W	840	1.000
EER			W/W	3,73	3,24
S.E.E.R.				6,2	6,1
P diseño C			kW	2,5	3,5
COP			W/W	3,81	3,80
S.C.O.P.				3,80	3,80
P diseño H			kW	2,8	3,2
Etiqueta Energética	Refrigeración			A++	A++
	Calefacción			A	A
Consumo anual	Refrigeración		kWh	141	201
Energía	Calefacción		kWh	1.179	1.400
Presión sonora	Refrigeración	S / B / M / A	dBA	19 / 23 / 33 / 39	19 / 23 / 33 / 39
	Calefacción	B / M / A	dBA	23 / 33 / 39	23 / 33 / 39
Potencia sonora	Refrigeración	Alta	dBA	58	58
Caudal de aire	Refrigeración	S / B / M / A	m³/min	3,5 / 5,5 / 8 / 10	3,5 / 5,5 / 8 / 10
		Máx (potencia)	m³/min	12	12
	Calefacción	B / M / A	m³/min	6,5 / 8,5 / 10,5	6,5 / 8,5 / 10,5
Tasa deshumidificación			l/h	1,1	1,3
Corriente funcionamiento	Refrigeración	Nominal / Max	A	3,0 / 6,5	4,7 / 6,5
	Calefacción	Nominal / Max	A	3,7 / 6,0	4,4 / 6,0
Corriente arranque	Refrigeración	Nominal	A	3	4,7
	Calefacción	Nominal	A	3,7	4,4
Alimentación eléctrica			Ø / V / Hz	1 / 220-240 / 50	1 / 220-240 / 50
Corta Circuitos			A	15	15
Cable alimentación eléctrica			N x mm²	3 x 1,0	3 x 1,0
Cable interconexión eléctrica			N x mm²	4 x 1,0 (incl. tierra)	4 x 1,0 (incl. tierra)
Dimensiones			mm	885 x 285 x 205	885 x 285 x 205
Peso neto			kg	10	10
Salida motor ventilador			W	20	20

Fuente: LG HVAC Solution. Multi V 2016. Disponible en: <https://www.lgpartner360.es/uploads/aire-acondicionado/A09RL.NSB.pdf>. Fecha de consulta: 19 de junio de 2017

Dicho aire acondicionado funciona con refrigerante 410a para el cual se calcula la energía necesaria para poder mantener el equipo de aire acondicionado funcionando en horarios de 8 horas por día y su consumo energético en razón de costos.

El consumo total está dado por el catalogo facilitando el cálculo del gasto energético para mantener el funcionamiento del equipo. El siguiente paso será calcular cuánto será el costo del funcionamiento del equipo, para eso se debe hallar el valor de Kw-h en Santander, los cuales se pueden observar en la tabla 45.

Tabla 45. Valor del Kw-h Electrificadora de Santander.

ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. ESP.								
INFORMA A SUS USUARIOS DEL SISTEMA DE ENERGIA ELECTRICA DE DEPARTAMENTO DE SANTANDER Y SUR DEL CESAR								
De acuerdo con las resoluciones 119/07, 097/08, 121/09, 172/09, 180/14, 191/14 y 015/16 expedidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, que permiten establecer los costos de la prestación del servicio a usuarios regulados, las tarifas para el mes de JUNIO 2017								
TARIFAS RESIDENCIALES								
ESTRATO		1		2		3		4
PROPIEDAD	NIVEL	% SUBSIDIO	TARIFA	% SUBSIDIO	TARIFA	% SUBSIDIO	TARIFA	TARIFA
ACTIVOS	MEDIDA		\$/kWh		\$/kWh		\$/kWh	\$/kWh
ESSA	I	-55.75%	207.4283	-44.68%	259.2854	-15.00%	398.4169	468.7258
CLIENTE	I	-55.88%	187.9921	-44.86%	234.9901	-15.00%	362.2189	426.1399
Nota: El subsidio es aplicado hasta el consumo de subsistencia.								
TARIFAS RESIDENCIALES				TARIFAS NO RESIDENCIALES				
ESTRATO		5 y 6		COMERCIAL / INDUSTRIAL		ACUEDUCTOS. ESP		OFICIAL
PROPIEDAD	NIVEL	% CONTRIB.	TARIFA	CONTRIB.	TARIFA	CONTRIB.	TARIFA	TARIFA
ACTIVOS	MEDIDA		\$/kWh	20%	\$/kWh	10%	\$/kWh	\$/kWh
ESSA	I	20.00%	562.4710	93.7452	562.4710	46.8726	515.5984	468.7258
CLIENTE	I	20.00%	511.3679	85.2280	511.3679	42.6140	468.7539	426.1399
	II			77.5529	465.3173	38.7764	426.5408	387.7644
	III			65.1242	390.7451	32.5621	358.1830	325.6209
	IV			57.7957	346.7742	28.8979	317.8764	288.9785

Fuente: Electrificadora de Santander S.A. ESP. Tarifas [diapositiva]. Piedecuesta: 1 Diapositiva a color. Disponible online en: [https://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202017/Tarifa\\_ESSA\\_201706.ppf](https://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202017/Tarifa_ESSA_201706.ppf). Fecha de consulta: 19 de junio de 2017

Seguidamente se analiza las horas de uso que tendrá dicho equipo para poder hallar la cantidad de kW-h mensuales que tendrá el equipo. Las horas son equivalentes a una jornada laboral de oficina, para los cuales se tomara 26 días de trabajo para los tres meses de análisis, se hallan la cantidad de horas trabajadas por el equipo en dichos meses junto con el costo de operación que tendrá le equipo.

$$(KW - h)_{dia} = KW_{consumo} * h_{uso/dia}$$

$$KW_{consumo} = 670 [W]$$

$$h_{uso/dia} = 8$$

$$(KW - h)_{dia} = 5.36$$

$$Costo_{dia} = (KW - h)_{dia} * Tarifa$$

$$Tarifa = 390.7451$$

$$Costo_{dia} = 2094.393736 [COP]$$

$$Costo_{total} = Costo_{dia} * n_{dias}$$

$$n_{dias} = 26 * 3 = 78$$

$$Costo_{total} = 163362.711 [COP]$$

La tabla 46 muestra los gastos generados por cada uno de los modelos de análisis, durante 3 meses, tanto la implementación de sistemas de climatización pasiva, como el costo del aire acondicionado seleccionado en el recinto sin ninguna modificación.

**Tabla 46. Costos de implementación de sistemas pasivos de refrigeración e implementación de un sistema de aire acondicionado.**

Ítem	Casa sin Modificaciones [COP]	Casa con modificaciones [COP]
Ventanas	0	80.000
Sombras	0	20.220
Aislamiento interno	0	368.800
Pintura Térmica	0	440.000
Estructura Sombra	0	40.000
Materiales Para el desarrollo de la implementación*	0	60.000
Mano de obra	0	120.000
Equipo de Aire acondicionado	1 575.900	0
Gastos energéticos	163.363	0
<b>TOTAL</b>	<b>1 739.263</b>	<b>1 129.020</b>

\*Todo lo referente a la carpintería como las bases de madera para la instalación del aislante interno, puntillas, serrucho, etc.

Para el análisis del ahorro de energía, se tendrá el mismo aire acondicionado pero al realizarse modificaciones pasivas de refrigeración la carga térmica es 803.32 [W], por lo que se usará el equipo a su mínima capacidad que es 890 [W] si tenemos en cuenta que al bajar la capacidad, el COP del equipo baja muy poco para aires acondicionados inverter, se podría mantener como una constante para el análisis de la energía requerida para dicha capacidad.

$$COP = \frac{CAP_{sistema}}{W_{compresion}}$$

El aire acondicionado tiene  $COP$  es de 3.81 a carga nominal, pero se bajará un pequeño porcentaje para hallar el trabajo a mínima carga, así que se tomará como 3.6 para una capacidad de 890 [W].

$$W_{compresion_{min}} = \frac{CAP_{min}}{COP_{min}}$$

$$W_{compresion_{min}} = 247.23 [W]$$

A dicho trabajo de compresión se le suma la energía que requieren los ventiladores del condensador 20 [W]

$$KW_{Consumo_{min}} = KW_{compresion_{min}} + KW_{ventiladores}$$

$$KW_{Consumo_{min}} = 0.26723 [KW]$$

$$KW_{consumo_{ahorrado}} = KW_{consumo_{nominal}} - KW_{Consumo_{min}}$$

$$KW_{consumo_{ahorrado}} = 0.67 - 0.26723$$

$$KW_{consumo_{ahorrado}} = 0.40277 [KW]$$

$$(KW - h)_{ahorrados_{dia}} = KW_{consumo_{ahorrado}} * h_{uso/dia}$$

$$(KW - h)_{ahorrados_{dia}} = 3.22216$$

$$(KW - h)_{ahorrados_{mes}} = (KW - h)_{ahorrados_{dia}} * n_{dias/mes}$$

$$n_{dias/mes} = 26$$

$$(W - h)_{ahorrados_{mes}} = 83.77616$$

$$Costo_{ahorro_{mes}} = (W - h)_{ahorrados_{mes}} * Tarifa$$

$$Costo_{ahorro_{mes}} = 32735.12402 [COP]$$

Para el cálculo del valor presente neto<sup>37</sup> se tiene en cuenta la tasa de interés de los certificados de depósito a término de 90 días (DTF) la cual es de 5.97%<sup>38</sup> efectivo anual.

$$VPN = -P + \sum_{t=1}^n \frac{FNE_t}{(1+i)^t}$$

Donde P es el costo de la inversión inicial para la implementación de sistemas pasivos de refrigeración.

$FNE_t$  es el ahorro mensual que se hace por la energía que no usa por el aire acondicionado al estar por debajo de su capacidad nominal. [COP]

$i$  es la tasa de interés de oportunidad, se asume un interés de  $DTF + 3\%$  pero este es efectivo anual, como los pagos se hacen mensuales se debe hallar su equivalente en un interés efectivo mensual.

Para el cálculo del interés efectivo mensual se usa el siguiente cálculo<sup>39</sup>:

$$i_{Anual} = (1 + i_{mensual})^{12} - 1$$

$$i_{mensual} = 0.7184\%$$

$n$  es el número de periodos para recuperar la inversión.

---

<sup>37</sup> ENCICLOPEDIA FINANCIERA. Valor presente neto. Disponible en: <http://www.encyclopediainanciera.com/finanzas-corporativas/valor-presente-neto.htm>. Fecha de consulta: 20 de junio de 2017

<sup>38</sup> Banco de la república en: Tasas de captación semanales y mensuales Disponible en: <http://www.banrep.gov.co/es/dtf>. Fecha de consulta: 20 de junio de 2017

<sup>39</sup> ASOBANCARIA. Como calcular la Tasa de interés. Disponible en: <http://www.asobancaria.com/sabermassermas/como-calcular-la-tasa-de-interes/>. Fecha de consulta: 20 de junio de 2017

Por medio de Excel se calcula el tiempo de recuperación de la inversión que es cuando el VPN es cero o mayor. En la tabla 47 se muestra el tiempo de recuperación en meses para el primer y el último mes en donde el VPN tendrá un valor negativo, y para el mes 44 tendremos el tiempo de recuperación de la inversión.

**Tabla 47. Tiempo de recuperación en meses.**

Mes	VPN
1	-1096518,35
39	-19055,89
40	5528,38

Esto nos muestra que la recuperación se realizaría en 3 años y 4 meses y partir de allí se tendrá una ganancia a partir de los métodos implementados en el recinto de análisis.

## 5. CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio meteorológico tres meses para un recinto piloto ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará, en donde, por medio de los programas en conjunto EnergyPlus, OpenStudio y SketchUp se realizó la simulación del recinto original, teniendo en cuenta los factores propios del lugar y la construcción, para su posterior análisis energético.
- Se diseñó un modelo matemático en el programa Matlab, con la finalidad de compararlo con los resultados obtenidos en el simulador EnergyPlus, teniendo una gran similitud en los resultados tanto del simulador y el modelo matemático respecto a los datos experimentales que se obtuvieron tanto en el análisis inicial del recinto sin modificaciones como en la aplicación final.
- Se realizaron cerca de 70 simulaciones aplicando métodos pasivos de climatización de diferentes tipos y aplicados virtualmente a diferentes partes del recinto piloto, en la búsqueda de los mejores comportamientos individuales y posterior combinación de los mismos.
- La fibra de vidrio como aislante térmico mostró el mejor comportamiento térmico y económico respecto a los demás aislantes sintéticos y naturales dentro del mercado.
- La pintura térmica “Sin calor” como método aplicado para superficies externas, logra disminuir la absorción de la superficie, bajando su temperatura de forma notable.

- La implementación de aleros evita la aplicación de ventanas a termo panel, generando un gran ahorro económico respecto a la implementación de este tipo de ventanas.
- Los costos de compra e instalación de los elementos pasivos seleccionados son más económicos que la compra e instalación de un aire acondicionado para el recinto sin arreglos.
- La implementación de métodos pasivos de climatización son una alternativa viable respecto al ahorro energético que puedan llegar a obtener por paredes externas, teniendo en cuenta que pueden ser aplicado a recintos pequeños no industriales para la obtención de resultados con un buen porcentaje de ahorro.
- Las herramientas OpenStudio y SketchUp facilitan y agilizan el proceso de simulación dentro del motor de cálculo que posee EnergyPlus, sin embargo algunas de las necesidades propias del usuario aun no son aplicables en el entorno gráfico ni en OpenStudio.
- Los sistemas de ventilación implementados no muestran efectividad en la climatización del recinto ya que dependen de la velocidad del viento, la cual durante el tiempo de análisis en las horas de la mañana es casi nula, permitiendo una ganancia de calor muy alta por las paredes del recinto.
- Para aumentar la eficiencia de los sistemas de climatización pasiva ecológicos se debe aplicar en una mayor área, evitando dejar superficies sin cubrimiento vegetal.
- Si se implementan sistemas de climatización pasiva en conjunto con sistemas de climatización activos, el ahorro energético que hará el aire acondicionado permitirá recuperar la inversión del sistema de climatización pasiva en un periodo

de 3 años y 8 meses para una temperatura interna de 25°C respecto a un recinto sin ninguna mejora pasiva.

- La implementación de sistemas de climatización pasiva presentó un ahorro de carga de refrigeración del 60.03% para un recinto con personas y equipo interno para el 19 de mayo, mientras que para la misma fecha pero sin ningún tipo de carga interna presenta un ahorro del 65.31%.
- Para el día 6 de febrero en un recinto sin personal ni equipo interno las modificaciones permitieron un ahorro de carga de refrigeración del 65.98%, mientras que para la misma fecha en un recinto con personal y equipo se presenta un ahorro del 56.95%.
- Se observó una mejora en el comportamiento de la temperatura interna en el recinto para el día 6 de febrero, donde en éste sin modificaciones tenía una temperatura de 34.2°C y con la implementación de mejoras pasa a tener una temperatura interna de 26.7°C, mostrando una disminución de temperatura del 21.8 %.

## OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Algunos cálculos de infiltraciones fueron difíciles de hallar, ya que algunas paredes del recinto no tenían contacto pleno con el suelo, pues era una superficie irregular, dificultando saber que tanto aire podría entrar por dichos espacios, aumentando el porcentaje de error de los cálculos de cargas térmicas.
- El software EnergyPlus junto con OpenStudio y SketchUP carecen de la posibilidad propia de poder realizar un análisis más exhaustivo en cuanto a análisis de ventilación se refiere.
- Para un análisis térmico de cualquier edificación se recomienda tener datos climatológicos mínimo por un año con el fin de poder diseñar en base al día crítico teniendo en cuenta toda la información meteorológica del lugar.
- El mantenimiento y cuidado de elementos pasivos ecológicos en climas como en el aplicado, hace que minimice su capacidad de aplicación, dado la difícil mantenibilidad de algún tipo de vegetación en el lugar.
- Para el cálculo de cargas térmicas en el software, la manera más práctica se realiza a partir del OpenStudio, donde se debe obligatoriamente crear un termostato virtual al gusto del usuario con el fin de poder establecer cargas de refrigeración y/o calefacción.
- Se recomienda contar con un equipo de respaldo el cual permita evitar la pérdida de datos ante una eventual caída de tensión dentro de la red eléctrica, pues los equipos de censado ante la ausencia de algún supervisor quedan detenidos completamente provocando pérdidas de información.
- Se recomienda utilizar un modelo matemático externo al software con la finalidad de corroborar la veracidad de los resultados obtenidos, como también normas que puedan dar una estimación cercana a los valores obtenidos dentro del simulador.

- La construcción debe utilizar materiales usados comúnmente en construcción, para que los datos sean mucho más verídicos y darle peso práctico a cualquier análisis.
- La toma de datos debe tener cerca una fuente de energía eléctrica a 110V, para evitar la intermitencia en el funcionamiento de captación de datos por parte de las termocuplas.
- La mantenibilidad de los recintos debe ser frecuente, ya que se pueden presentar flexión en algunas vigas del techo, además de invasión por parte de la fauna local.
- Para edificaciones con cargas internas muy altas, se recomienda una combinación de métodos pasivos de refrigeración con sistemas de refrigeración activos, ya que los métodos pasivos no pueden evitar o amortiguar la ganancia de calor interna tanto sensible como latente, solo se encargan de ahorrar carga externa.
- La construcción del recinto debe hacerse sobre una superficie regular, es decir, las paredes deben llegar de lleno al suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

AHSRAE, Handbool Coolind and Heating Load Calculation Manual, Atlanta: ASHRAE research, Second edition, 1992. 209 p.

AHSRAE, Handbool Coolind and Heating Load Calculation Manual, Atlanta: ASHRAE research, First edition, 1980. 223 p.

ALCALDE, Albrerto. Estudio y simulación de un edificio con energy plus. Trabajo de grado para ingeniero tercnico industrial en electrónica industrial. Tarragona, España. Universitat Rovira i Virgili, 2010. 330 p

ÁLVAREZ PARTIDA, Francisco. Propuesta de adecuación bioclimática sustentable para lograr el confort térmico en viviendas unifamiliares de interés social en Tepic, Nayarit. Guadalajara, México. Trabajo de grado. Instituto tecnológico y de estudios superiores de occidente. 2015. 223 p.

ASHRAE, Handbook Fundamentals, Atlanta: ASHRAE research, 2009. 926 p.

CANET ORIOLA, José Antonio. Actuaciones para mejorar la eficiencia energética de una vivienda unifamiliar con calificación baja en Llutxent. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. 2015, 209 p.

CENGEL, Yunes. Termodinámica y transferencia de calor en: Transferencia de Calor y masa. Cuarta Edición. Mc Graw Hill 2011. 915 p

DAGORRET SEGUEL, Nicole Marie. Ahorro energético y económico a través de la implementación de medidas de gestión energética. El caso de la implementación de doble piel, en edificación de oficinas existentes de los años

90 en Santiago. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 171 p.

DÍAZ, Victorio; BARRENECHE, Raúl. Acondicionamiento térmico de edificios. Argentina; Editorial Nobuko, 2005. 446p.

DUFFIE, John & BECKMAN, William. Solar Engineering of Thermal Processes: Direction of Beam Radiation. 4ta Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, inc. 2013. 12 p

ENERGYPLUS. Disponible en: <https://energyplus.net/>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2017

GARCÍA, Carlos; MIRASSO, Aníbal; STORTI, Miguel. Simulación computacional para la mejora de la eficiencia energética en la climatización de viviendas. En: Mecánica computacional, Noviembre, 2013, vol. 22, 3107- 3119 p.

INCROPERA, Frank. Introducción. En: Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Pablo Eduardo Roig Vázquez, 1999, 5 p.

KREIDER, Jan. Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning. New York: CRC Press. 410 p.

MAGADAN TOMAS, Rubén. Análisis de la influencia de la envolvente en la demanda térmica y propuestas de mejora del cuartel Francisco moreno mediante simulación con Trnsys. Trabajo de grado para ingeniero mecánico. Vigo, España. Universidad de Vigo. 2016. 112 p.

MARADAY CHARRIS, Juan Francisco. Termodinámica Aplicada. Bucaramanga: Ediciones conceptos básicos. Cuarta Edición. Mc Graw Hill 2011. P. 1. Cuarta Edición. Mc Graw Hill 2011. 1 p.

MARGERIDA, Manuel. Aislamiento térmico. Barcelona: Editores técnicos asociados s.a, 1983. 308 p.

MORILLON, David; MEJÍA, David. Modelo para diseño y evaluación de control solar en edificios. Mexico DF. 2004

OPENSTUDIO. Disponible en: <https://www.openstudio.net/>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2017

SALVADOR, Ruben; GELLEGOS, Diana. Construcción sustentable, análisis de retraso térmico a bloques de tierra comprimido. 2015

SKETCHUP. La manera más sencilla de dibujar en 3D. Disponible en: <https://www.Sketchup.com/es>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2017

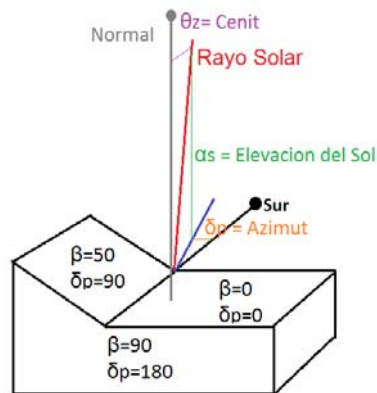
YARKE, Eduardo. Ventilación natural de edificios. Argentina: Editorial nobuko, 2005. 928 p.

## ANEXOS

### ANEXO A. GEOMETRÍA SOLAR

**Ángulos solares.** Los ángulos solares especifican la dirección de los rayos incidentes en una superficie de estudio, es decir, da la dirección en la que se mueve la energía radiada por el Sol hacia las paredes, techo, ventanas y puerta del recinto en el transcurso del día, además partes de la casa tendrán sombra parcial o total durante el día. En la figura A1 se muestran las principales variables de la geometría solar.

**Figura A1. Ángulos de un rayo incidente**



$\alpha_s$ = Elevación del sol.

$\theta_z$ = Ángulo de Cenit.

$\theta$ = Ángulo del rayo respecto a la normal de la superficie inclinada.

$\delta_s$ =Ángulo del rayo respecto del sur Horizontal. Azimut.

$\delta_p$ = Ángulo azimut de la pared .

$\beta$  = Ángulo de inclinación.

Donde:

$$\theta_z + \alpha_s = 90$$

$$\theta_z = f(\omega, \delta, \Phi)$$

Donde  $\theta_z$  o  $\alpha_s$  son función de la hora, el día del año y la latitud y  $\omega$  es el ángulo de la hora, el cual es producto de la rotación de la Tierra alrededor de su eje, siendo  $\omega = 0$  cuando la hora es 12:00 pm y aumentando o disminuyendo  $15^\circ$  por hora, teniendo en cuenta que  $\omega$  es positivo después de las 12:00 m y  $\omega$  es negativo antes de las 12:00 pm.

2 pm equivale a  $\omega = 30^\circ$

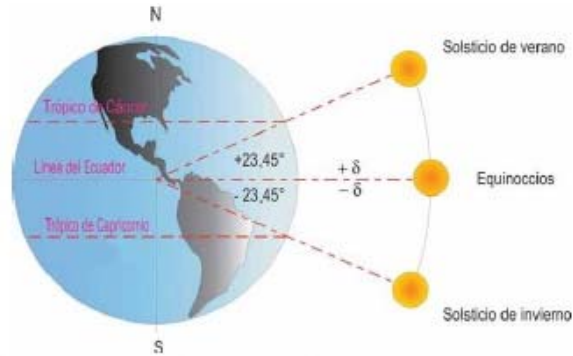
9 am equivale a  $\omega = -45^\circ$

Si no se tiene la hora solar local pero si la latitud local y una latitud de referencia y la hora exacta de dicho lugar se puede hallar de esta forma:

$$\omega_{\text{solar}} = \omega_{\text{reloj}} + 4\text{min} * (\text{Latitud referencia} - \text{Latitud local})$$

$\delta$  es la declinación solar que se debe al movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol en una órbita elíptica, la cual varía entre  $+23.45^\circ$  y  $-23.45^\circ$  con respecto al Ecuador como ve muestra en la figura A2.

**Figura A2. Esquema del cambio de la declinación solar respecto al Ecuador**



Fuente: Lección 5 Radiación Solar. Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358026/358026/exe-learning\\_CFM/leccin\\_5\\_radiacin\\_solar.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358026/358026/exe-learning_CFM/leccin_5_radiacin_solar.html)

Una expresión aproximada de la declinación solar para cada día del año sería:

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{(284 + n) * 360}{365}\right)$$

Siendo n el día del año.

$\Phi$  es la Latitud. Para toda latitud mayor a  $23.45^\circ$  el Sol puede estar en el Norte al Mediodía. Para toda latitud menor a  $23.45^\circ$  el Sol nunca estará en el Norte al Mediodía.

Ya conocidas la latitud, la declinación y el ángulo de la hora, podemos hallar la expresión para el ángulo de elevación solar o el ángulo de Zenit con la siguiente expresión:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\alpha_s) = \sin(\delta) * \sin(\Phi) + \cos(\delta) * \cos(\Phi) * \cos(\omega)$$

Además con los valores conocidos y el ángulo de elevación solar se puede hallar el Azimut:

$$\sin(\delta_s) = \frac{\cos(\delta) * \sin(\omega)}{\cos(\alpha_s)}$$

El azimut solar, es el ángulo del rayo incidente medido desde el sur en un plano horizontal y se toma positivo cuando el rayo va hacia el oeste y negativo cuando va hacia el este, es decir, cuando el ángulo de azimut es negativo, se puede decir que el sol está en el este, y cuando es positivo el sol está en el oeste.

Existen casos particulares que requieren sus propias expresiones los cuales son:

-El mediodía.

Al mediodía  $\omega = 0$

Y se llega a la siguiente expresión, solo válida para cálculos con  $\omega = 0$ , es decir, el medio día:

$$\theta_{z_{\text{mediodia}}} = \Phi - \delta$$

$$\sin(\delta_s) = 0$$

Si  $\delta_s = 0$  El sol está alineado con el Sur. Para que el sol este en el Sur  $\Phi - \delta$  es positivo.

Si  $\delta_s = 180$  El sol está alineado con el Norte. Para que el sol este en el Norte  $\Phi - \delta$  es negativo.

- El amanecer ya que se debe saber la duración del día.

Amanecer:

Se debe tener en cuenta que  $\alpha_s = 0$ , por tanto  $\cos(\alpha_s) = 1$

$$\sin(\delta_{s_{\text{amanecer}}}) = \frac{\cos(\delta) * \sin(\omega_{\text{amanecer}})}{\cos(\alpha_s)}$$

Se puede calcular la hora del amanecer la cual se halla mediante la siguiente expresión:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\alpha_{\text{amanecer}}) = 0 = \sin(\delta) * \sin(\Phi) + \cos(\delta) * \cos(\Phi) * \cos(\omega_{\text{amanecer}})$$

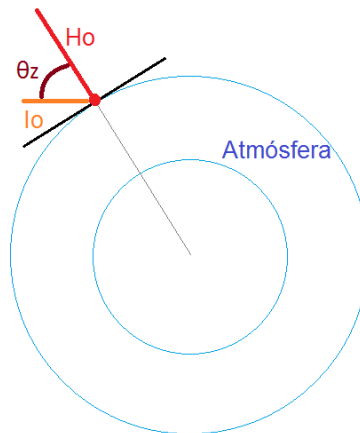
$$\cos(\omega_{\text{amanecer}}) = -\tan(\delta) * \tan(\Phi)$$

La hora del amanecer también permitirá hallar la duración del día:

$$Hora_{\text{amanecer}} = 12 - \left(\frac{\omega_{\text{amanecer}}}{15}\right)$$

**Magnitud de la radiación incidente sobre una superficie<sup>40</sup>:** Para el análisis de la cantidad de energía entregada por el sol a una superficie ubicada en la Tierra se debe tener en cuenta, la geometría de la superficie con respecto al rayo incidente, para esto se tiene en cuenta el ángulo de azimut al ser horizontal como se muestra en la figura A3.

**Figura A3. Radiación incidente en una superficie horizontal**



Fuente: Autores

<sup>40</sup> DUFFIE, John & BECKMAN, William. Solar Engineering of Thermal Processes: Extraterrestrial Radiation on a Horizontal Surface. 4ta Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, inc. 2013. P 37.

No toda la radiación sobre la Tierra incide en su superficie, lo es la intensidad de la radiación del rayo extraterrestre [W/m<sup>2</sup>] y se puede expresar de la forma:

$$H_o = I_{sc} \left( 1 + 0.034 \cos \left( \frac{360 * n}{365} \right) \right) * \cos(\theta_z)$$

Donde n es el día del año.

Se conoce que I<sub>sc</sub> es una constante solar cuyo valor es:

$$I_{sc} = 1358W/m^2$$

H<sub>o</sub> es la intensidad de radiación de rayo efectiva (normal a la superficie) extraterrestre.

I<sub>b</sub> es la intensidad de radiación de rayo en la superficie terrestre, siempre se tiene en cuenta que:

$$I_b < I_o$$

Por tanto se puede relacionar la cantidad de radiación total (H) con la intensidad de radiación de rayo (I<sub>b</sub>) y la radiación difusa (H<sub>d</sub>) así:

$$H = H_b + H_d = I_b * \cos(\theta_z) + H_d$$

Donde:

-H<sub>d</sub> es la intensidad de radiación difusa en la superficie.

-H es la cantidad de radiación efectiva total sobre la superficie.

Para un cálculo de radiación en sombras se debe tener en cuenta la radiación difusa sobre una superficie la cual se puede hallar según Orgill y Hollands<sup>41</sup> con el

---

<sup>41</sup> DUFFIE, & BECKMAN, Op. Cit. P 76.

coeficiente de extinción:

$$\frac{H}{H_0} = K_T$$

Se usan diversas ecuaciones dependiendo del rango del coeficiente de extinción

$$1 - 0.249 * K_T \quad \text{Para } K_T < 0.35 \quad \text{Para un sitio Opaco}$$

$$1.557 - 1.84 * K_T \quad \text{Para } 0.35 < K_T < 0.75$$

$$0.177 \quad \text{Para } K_T > 0.75 \quad \text{Para un sitio Claro}$$

Las anteriores ecuaciones sirven para hallar la razón

$$\frac{H_d}{H} = f(K_T)$$

## ANEXO B. RESULTADOS EN LA APLICACIÓN DE MÉTODO CLTD

**Tabla B1.** 29 de enero

<b>Enero (día crítico 29)</b>										
	Hora de análisis									
Superficie	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
P. frontal	-150	556	1340	1778	1911	1791	1625	1559	1369	1630
P. izquierda	-354	-220	53	296	492	658	818	967	986	880
P. posterior	-1734	-1359	112	-216	167	387	811	1532	2098	2520
P derecha	-450	-289	-119	80	166	205	345	340	331	251
Techo	-440	-232	86	341	552	713	848	970	967	867
<b>Carga total [Btu/h]</b>	-3127	-1544	1472	2279	3288	3753	4447	5368	5752	6148

**Tabla B2.** 6 de febrero

<b>Febrero (día crítico 6)</b>										
	Hora de análisis									
Superficie	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
P. frontal	-101	554	1273	1531	1922	1931	1791	1622	1289	1029
P. izquierda	-401	-292	-50	224	426	655	828	927	876	786
P. posterior	-1387	-1087	290	55	458	865	1327	1897	2257	2727
P derecha	-357	-222	-26	328	240	342	404	439	361	296
Techo	-372	-186	104	388	604	820	967	1044	979	894
<b>Carga total [Btu/h]</b>	-2617	-1233	1590	2525	3649	4613	5317	5929	5763	5732

**Tabla B3. 4 de marzo**

<b>Marzo (día crítico 4)</b>										
	Hora de análisis									
Superficie	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
P. frontal	-300	574	1215	1822	1993	1822	1540	1435	1631	1075
P. izquierda	-585	-368	-165	160	375	515	618	749	692	880
P. posterior	-1545	-927	338	253	694	838	1094	1758	2099	2520
P derecha	-401	-158	0	224	329	342	335	402	317	251
Techo	-406	-126	131	459	687	825	909	1015	944	867
<b>Carga total [Btu/h]</b>	-3237	-1005	1519	2918	4077	4342	4497	5358	5684	5593

**Tabla B4. 29 abril**

<b>Abril (día crítico 29)</b>										
	Hora de análisis									
Superficie	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
P. frontal	-583	433	1164	1513	1684	1577	1489	1281	1103	797
P. izquierda	-766	-480	-232	-34	181	353	662	631	656	544
P. posterior	-1754	-929	467	7	447	686	1223	1737	2322	2725
P derecha	-419	-107	95	193	298	343	431	447	444	357
Techo	-507	-164	131	348	575	741	910	971	973	868
<b>Carga total [Btu/h]</b>	-4029	-1247	1626	2026	3185	3700	4715	5066	5499	5291

## ANEXO C. CÁLCULO TIPO DE INFILTRACIONES

**Tabla C1.** Área de fugas efectiva.3.120.

Elemento	Área [m2]	Área de fugas efectiva [cm2]
Ventana	0.1024	0.611
Puerta	1.6892	18.417
Marco Ventana	0.0576	0.076
Marco Puerta	0.2008	1.004

**Tabla C2.** Calor sensible de infiltraciones.

Hora	$Q_{infiltraciones} \left[ \frac{in^3}{min} \right]$	$\Delta T [F]$	$q \left[ \frac{Btu}{h} \right]$	$q[W]$
9	0,86	-3,19	-2,99	-0,88
10	1,37	-1,31	-1,98	-0,58
11	1,83	-0,26	-0,52	-0,15
12	3,57	1	3,93	1,15
13	4,26	1,24	5,84	1,71
14	5,29	1,33	7,77	2,28
15	7,07	0,88	6,88	2,02
16	4,25	1,80	8,44	2,48
17	3,60	1,10	4,37	1,28

**Tabla C3.** Calor sensible por infiltraciones para la puerta.

Hora	$Q_{infiltraciones} \left[ \frac{in^3}{min} \right]$	$\Delta T [F]$	$q \left[ \frac{Btu}{h} \right]$
9	0,76	-3,18	-2,65
10	1,22	-1,31	-1,75
11	1,62	-0,26	-0,46
12	3,16	1	3,48
13	3,78	1,24	5,17
14	4,69	1,33	6,88
15	6,27	0,88	6,09
16	3,77	1,80	7,48
17	3,19	1,10	3,87
Promedio			3,12

**Tabla C4.** Calor sensible por infiltraciones para el marco de la puerta.

Hora	$Q_{infiltraciones} \left[ \frac{in^3}{min} \right]$	$\Delta T [F]$	$q \left[ \frac{Btu}{h} \right]$
9	0,04	-3,18	-0,14
10	0,07	-1,31	-0,09
11	0,09	-0,26	-0,02
12	0,17	1	0,19
13	0,20	1,24	0,28
14	0,25	1,33	0,37
15	0,34	0,88	0,33
16	0,20	1,80	0,41
17	0,17	1,10	0,21
Promedio			0,17

**Tabla C5.** Calor sensible por infiltraciones para la ventana.

Hora	$Q_{infiltraciones} \left[ \frac{in^3}{min} \right]$	$\Delta T [F]$	$q \left[ \frac{Btu}{h} \right]$
9	0,0503222	-3,18	-0,18
10	0,08074759	-1,31	-0,12
11	0,1074829	-0,26	-0,03
12	0,20990826	1	0,23
13	0,2507557	1,24	0,34
14	0,31124009	1,33	0,46
15	0,4161191	0,88	0,40
16	0,25030671	1,80	0,50
17	0,21188383	1,10	0,26
Promedio			0,21

**Tabla C6.** Calor sensible por infiltraciones para el marco de la ventana.

Hora	$Q_{infiltraciones} \left[ \frac{in^3}{min} \right]$	$\Delta T [F]$	$q \left[ \frac{Btu}{h} \right]$
9	0,01	-3,18	-0,02
10	0,01	-1,31	-0,01
11	0,01	-0,26	-0,004
12	0,03	1	0,03
13	0,03	1,24	0,04
14	0,04	1,33	0,06
15	0,05	0,88	0,05
16	0,03	1,80	0,06
17	0,03	1,10	0,03
Promedio			0,03

**Tabla C7.** Infiltraciones totales.

Hora [horas]	Velocidad del Viento [m/s]	$\Delta T$	Infiltraciones Totales [L/s]
9	1.33	-1.31	0.40
10	1.78	-0.26	0.65
11	2.22	1	0.86
12	4.47	1.24	1.68
13	5.36	1.33	2.01
14	6.69	0.88	2.50
15	8.94	1.80	3.34
16	5.36	1.10	2.01
Promedio			1,68

## ANEXO D. PORCENTAJES DE ERROR DE SIMULADOR Y MODELO MATEMÁTICO.

Los porcentajes de error fueron calculados mediante una desviación del valor medido de una magnitud física respecto al valor real de dicha magnitud, con lo cual podemos calcular el error experimental relativo que se expresa

$$\%error = \frac{ve - va}{ve}$$

Donde

$vt$  = valor exacto

$ve$  = valor aproximado (simulado y Matlab)

**Tabla D1.** Simulación para recinto sin modificaciones para el seis de febrero.

Hora	Temperaturas internas			porcentaje de error	
	simulador	experimental	Matlab	% error simulador	% error Matlab
8	20,52	21,41	21,69	4,17	-1,28
9	23,42	24,19	23,84	3,14	1,44
10	26,32	27,44	27,91	4,05	-1,71
11	29,71	30,7	30,00	3,21	2,26
12	31,93	31,64	31,14	-0,90	1,59
13	32,77	32,63	31,92	-0,43	2,17
14	33,64	32,98	32,88	-2,01	0,31
15	34,20	33,10	32,96	-3,31	0,43
16	33,32	32,20	32,01	-3,49	0,59

**Tabla D2.** Simulación para recinto con modificaciones aplicadas.

Temperaturas internas			
hora	Matlab	Simulador.	% error
8	19,3	18,9	2,07
9	19,41	19,97	-2,88
10	21	21,62	-2,95
11	22,54	23,38	-3,72
12	23,96	24,89	-3,88
13	25,12	25,72	-2,38
14	26,43	26,33	0,37
15	27,12	26,69	1,58
16	26,71	26,6	0,41

## ANEXO E. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.

Se presentan los materiales simulados, juntos con los costos de aplicación y la empresa que proporciona su información térmica y sus dimensiones de ventas.

**Tabla E1. Aislantes .**

Aislantes						
No	Aislantes para paredes (33,68 m <sup>2</sup> necesario)					
	Producto	Especificaciones [largo-ancho-espesor]	Precio [Cop]	No necesario	Precio a pagar [Cop]	Empresa
1	Manta aislante de lana de roca	0,6096 m x 2.43 m x 3''	38714	23	890422	calorcol
2	Manta aislante de lana de roca	0,6096 m x 2.43 m x 4''	50680	23	1'165640	calorcol
3	Afelpado 7,62	0.9 m x 5.0 m x 3.0''	51364	8	410912	calorcol
4	Afelpado 10,16	0.9 m x 5.0 m x 4.0''	144195	8	1'153560	calorcol
5	Placa de poliuretano	1.22 m x 2.44 m x 3''	144024	12	1'728288	calorcol
6	Placa de poliuretano	1.22 m x 2.44 m x 3''	189581	12	2'274972	calorcol
7	Manta cerámica	0.61 m x 2.44 m x 3''	80654	23	1'855042	calorcol
8	Manta cerámica	0.61 m x 2.44 m x 4''	121535	23	2'795305	calorcol
9	Placa térmica	0.61 m x 1.22 m x 3.0''	11698	46	538108	calorcol
10	Placa térmica	0.61 m x 1.22 m x 4.0''	14200	46	653200	calorcol
11	Placa Cerámica	1.0 mx 1.2 m x 0.5''	135000	28	3'780000	calorcol
12	Placa Cerámica	1.0 mx 1.2 m x 1''	233750	28	6'545000	calorcol
13	Rolloflex	0.61 m x 2.44 m x 3.0''	18451	23	424373	calorcol
14	Rolloflex	0.61 m x 2.44 m x 4.0''	24297	23	558831	calorcol
15	<b>Frescasa (fibra de vidrio) sin papel</b>	<b>18,59 m<sup>2</sup> - 3.5''</b>	<b>184400</b>	<b>2</b>	<b>368800</b>	<b>Fiberglass</b>
16	Frescasa (fibra de vidrio)	17,8 m <sup>2</sup> - 2,5''	128000	2	256000	Fiberglass
17	Frescasa (fibra de vidrio) con papel	18,59 m <sup>2</sup> - 3.5''	231400	2	462800	Fiberglass
18	Celulosa natural	1,2 m x 0,6 m - 40mm	19057	47	895679	Logrotrex
19	Cáñamo	1 m x 1 m - 40 mm	25500	34	892500	Ultravioleta
20	Lino	1 m x 0,625 - 50mm	32700	34	1'111800	Logrotrex
21	Lana de oveja	4 m x 0,850 - 50 mm	35600	10	356000	Logrotrex
22	arlita	1 m x 1m - 50 cm	65000	34	2'210000	Logrotrex

**Tabla E2. Productos para el techo.**

No	Productos para techos (12 m <sup>2</sup> )					
	Producto	Especificaciones	Precio	No Necesarios	Total	Empresa
1	<b>Pintura térmica</b>	<b>40 m<sup>2</sup></b>	<b>440000</b>	<b>1</b>	<b>440000</b>	<b>Industrias GM</b>
2	Pintura metálica	20 klg	230000	1	230000	Sispac
3	Tejas upvc	12 m <sup>2</sup> -0,002m	490000	1	490000	Sispac
4	roof insolation	1m x 1m -0,019 m	17000	12	204000	fiberglass
5	fiber glass foil aluminio	18,59 m <sup>2</sup> - 3.5''	342.400	1	342400	fiberglass
6	foil gris	10m x 1m -0,003 m	80000	1	80000	fiberglass
7	foil negro	10m x 1m -0,003 m	160000	1	160000	fiberglass

**Tabla E3. Fachadas ventiladas.**

Fachada ventiladas						
No	Producto	Especificaciones	Precio	No necesario	Total	Empresa
1	pared izquierda o derecha	placa etherboar 244x120cm	60000	2	120000	eternit
2	pared posterior o frontal	placa etherboar 244x120cm	60000	3	180000	eternit
3	recinto completo	placa etherboar 244x120cm	60000	10	500000	eternit
4	Soportes-accesorios e instalacion por pared		100000	1	140000	eternit

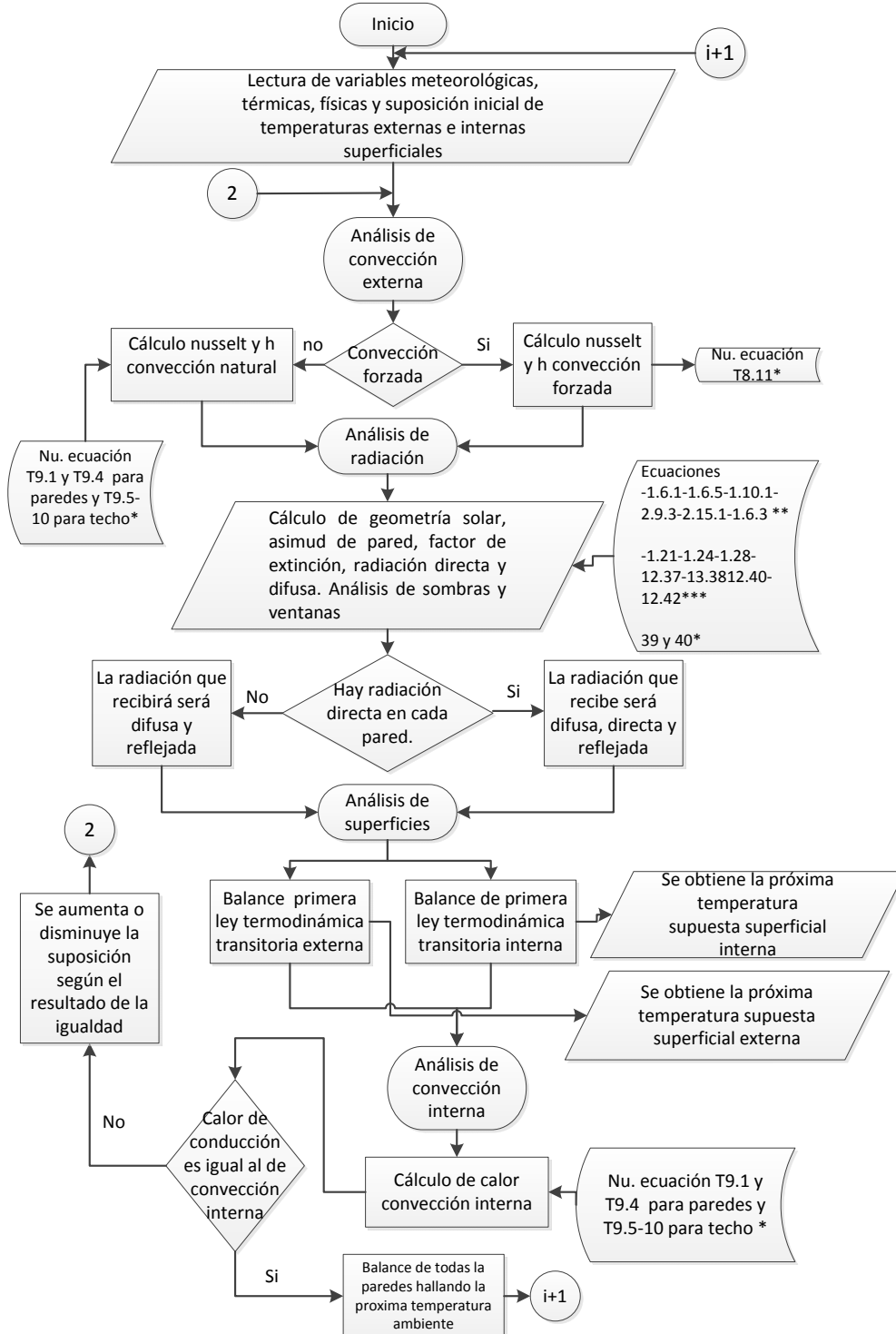
**Tabla E4. Muro Trumbe.**

Muro trumbe						
No	Producto	Especificaciones	Precio	No necesario	Total	Empresa
1	pared izquierda o derecha	placa de vidrio 5,8m <sup>2</sup>	17000	6	120000	Colonial
2	frontal	placa vidrio de 9,6 m <sup>2</sup>	17000	10	170000	Colonial
3	tracera	placa vidrio de 12 m <sup>2</sup>	17000	12	204000	Colonial
4	paredes laterales	placa vidrio de 11,6 m <sup>2</sup>	17000	12	204000	Colonial
5	soportes y accesorios por pared		40000	1	40000	Colonial

**Tabal E5. Sombras y ventanas.**

SOMBRAS				
Producto	Cantidad	Especificaciones	Precio	Empresa
<b>Toldo</b>	<b>1</b>	<b>Toldo de 80 x 80 [cm]</b>	<b>\$20220</b>	<b>Carpas IKL Cra 1 No 3-30 Chimita-Giron B/manga</b>
Toldo	1	Toldo de 1x1,5m	\$1200000	Tecnicarpas Colombia SAS
Toldo	2	Santorini 45° 80x80cm	\$1800000	Sun-Off Carrera 35 No. 36 - 28, Cabecera sun-off.com
Toldo	1	DTT (2x1,5m)	\$2600000	Sun-Off Carrera 35 No. 36 - 28, Cabecera sun-off.com
VENTANA				
Producto	Cantidad	Especificaciones	Precio	Empresa
<b>Ventana</b>	<b>2</b>	<b>Marco Aluminio 40x40cm con vidrio de 4mm</b>	<b>\$80000</b>	<b>Vidriería Colonial</b>
Ventana	2	Marco Aluminio 80x80 cm con vidrio de 4mm	\$160000	Vidrieria Colonial
Ventanas termopanel	1	Ventana PVC americano termopanel 70x50cm U ventana 3W/m2K	\$250000	HOMECENTER

## ANEXO F. PROGRAMA MATLAB PARA CASA MODIFICADA.



\*ASHRAE, Handbook Fundamentals, Atlanta: ASHRAE research, 2009.

\*\*DUFFIE, John & BECKMAN, William. Solar Engineering of Thermal Processes: Direction of Beam Radiation. 4ta Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, inc. 2013.

\*\*\* CENGEL, Yunes. Termodinámica y transferencia de calor en: Transferencia de Calor y masa. Cuarta Edición. Mc Graw Hill 2011.

Se muestra el diagrama de flujo para el funcionamiento del programa para el análisis del comportamiento térmico de la casa con las modificaciones realizadas, posterior a esto se muestra el cálculo tipo para el desarrollo del programa Matlab.

- **Cálculo tipo para el recinto.**

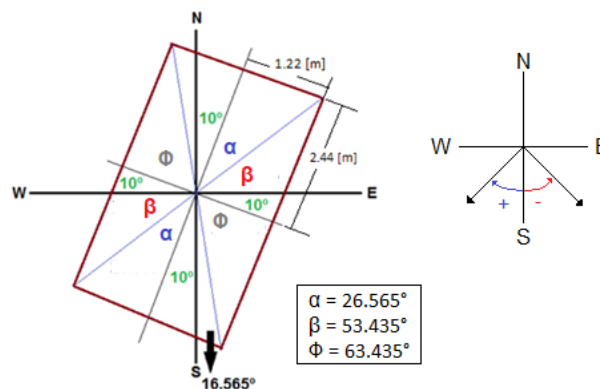
Como se nombró anteriormente el día y hora para el inicio del análisis el 6 de febrero es a las 8:00 a.m., el cual tiene las siguientes características meteorológicas.

**Tabla F1.** Datos para el cálculo tipo.

Hora	H total [W/m <sup>2</sup> ]	Dirección del viento (ángulo respecto al Norte)	Velocidad [m/s]	Temp externa [°C]	Temp interna [°C]
8:00 am	423.65	0°	0	19.16	19.545

Para identificar donde incide la radiación solar se debe analizar el ángulo de azimut solar, se tienen en cuenta los límites donde incidirá la radiación solar para cada una de las paredes, para el recinto se analizó el ángulo de azimut de cada pared para dar limites, dicho análisis se muestra en La Figura F1.

**Figura F1.** Ángulos límites para cada una de las paredes de la casa.



Para entenderlo de una manera más práctica se presenta la tabla F2 con los condicionales que debe tener el azimut solar, para saber si sobre dicha pared cae el sol directamente.

**Tabla F2.** Condiciones para radiación directa en paredes.

Pared	Condición a cumplir por el Azimut solar ( $\delta_s$ )
Frontal	$-170^\circ < \delta_s < 10^\circ$
Lateral Izquierda	$-80^\circ < \delta_s < 100^\circ$
Posterior	$10^\circ < \delta_s < 180^\circ$ O $-180^\circ < \delta_s < -170^\circ$
Lateral Derecha	$100^\circ < \delta_s < 180^\circ$ O $-180 < \delta_s < -80^\circ$

Para iniciar el cálculo de la cantidad de calor que llega a la pared por radiación solar, se analiza la geometría respecto al posicionamiento Solar.

Para esto se conocen las siguientes variables:

$$\omega_{reloj} = 15 * -4$$

$$\beta = 90$$

$$\rho_{piso} = 0.26$$

$$n = 37$$

$$\Phi = 6.9985$$

$$\Phi_{ref} = 4.61$$

$$I_{sc} = 1358$$

Donde:

-n hace referencia al día del año correspondiente al 6 de febrero.

- $\omega$  reloj hace referencia a la hora del día cuyo valor es 0 a las 12m y aumenta 15° por hora en la tarde y disminuye en 15° por cada hora en la mañana, la hora a analizar serán las 8 a.m.

- $\beta$  es el ángulo de elevación de la pared, al estar en vertical sería  $90^\circ$
- $\Phi$  es la latitud de Guatiguará.
- $\Phi_{ref}$  es la latitud de donde se tiene la hora exacta que es Bogotá.
- $I_{sc}$  es la constante Solar cuyo valor es  $1358 \text{ W/m}^2$ .
- $\rho_{piso}$  es la reflectividad del piso, se toma el valor de 0.26 al ser prado verde lo que rodea la casa tomado de la Tabla F2.

**Tabla F2.** Reflectancia de suelos de superficies en primer plano.

Foreground Surface	Reflectance
Water (large angle of incidences)	0.07
Coniferous forest (winter)	0.07
Bituminous and gravel roof	0.13
Dry bare ground	0.2
Weathered concrete	0.22
Green grass	0.26
Dry grassland	0.2 to 0.3
Desert sand	0.4
Light building surfaces	0.6
Snow-covered surfaces:	
Typical city centre	0.2
Typical urban site	0.4
Typical rural site	0.5
Isolated rural site	0.7

Source: Adapted from Thevenard and Haddad (2006).

Fuente: ASHRAE, Handbook Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, research, 2009: F14.  
Climatic Design Information: Ground Reflectance of Foreground Surfaces, P11.

Se realizará el cálculo de la geometría solar:

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{(284 + n) * 360}{365}\right)$$

$$\omega = \omega_{reloj} + A$$

$$A = 4[\text{min}] * (\Phi_{ref} - \Phi) * \frac{15}{60}$$

$$\sin(\alpha_s) = \sin(\delta) * \sin(\Phi) + \cos(\delta) * \cos(\Phi) * \cos(\omega)$$

$$\cos(\theta_z) = \sin(\alpha_s)$$

$$\sin(\delta_s) = \frac{\cos(\delta) * \sin(\omega)}{\cos(\alpha_s)}$$

Donde.

$-\delta$  es la declinación solar.

$-\omega$  es el ángulo de la hora exacta.

$-\alpha_s$  es el ángulo de elevación del Sol.

$-\theta_z$  es el ángulo de cenit solar.

$-\delta_s$  es el ángulo de azimut solar.

$$\alpha_s = 24.09^\circ$$

$$\delta = -16.11^\circ$$

$$\delta_s = -68.83^\circ$$

$$\omega = -62.39^\circ$$

$$\theta_z = 65.91^\circ$$

Todos los ángulos están en grados.

Al tener el valor del azimut solar se puede ver en la tabla F2 que al ser menor a  $100^\circ$  y mayor a  $-80^\circ$  caerá radiación solar directamente sobre la pared lateral izquierda.

Con los datos obtenidos se pasa a calcular la cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie de análisis.

$$I_o = I_{sc} * \left( 1 + 0.034 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right) \right)$$

$$H_o = I_o * \cos(\theta_z)$$

Donde:

$I_o$  es la intensidad de radiación de rayo extraterrestre [ $W/m^2$ ]

$H_o$  es la intensidad de radiación de rayo Efectiva sobre una superficie horizontal extraterrestre [ $W/m^2$ ]

Para calcular la cantidad que radiación que cae directamente se tiene el piranómetro, pero también se debe saber la cantidad de radiación difusa que cae al recinto, para esto usamos el factor de extinción:

$$K_t = H/H_o$$

Donde:

-H es la radiación efectiva total que se obtiene mediante el piranómetro [W/m<sup>2</sup>].

-I<sub>o</sub> es la Intensidad de la radiación de rayo extraterrestre [W/m<sup>2</sup>]

-H<sub>o</sub> es la intensidad de la radiación de rayo efectiva a una superficie horizontal extraterrestre [W/m<sup>2</sup>]

-K<sub>t</sub> es el coeficiente de extinción. Con el cual se halla una razón de la radiación difusa con la radiación efectiva total.

$$\frac{H_d}{H}$$

Dicha razón se puede hallar con alguna de las siguientes ecuaciones, su uso depende del rango de valores que va a tendrá el coeficiente de extinción K<sub>t</sub>.

$$1 - 0.249 * K_t \text{ Para } 0 \leq K_t \leq 0.35$$

$$1.557 - 1.84 * K_t \text{ Para } 0.35 \leq K_t \leq 0.75$$

$$0.177 \text{ Para } K_t > 0.75$$

$$I_o = 1395.119 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$H_o = 569.4 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$K_t = 0.5788$$

Por lo tanto

$$\frac{H_d}{H} = 1.557 - 1.87 * K_t$$

Dando como resultado:

$$H_d = 70.19 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Ya conocida la cantidad de radiación difusa que llega al recinto, se puede hallar la cantidad de calor recibida por la superficie en  $[W/m^2]$ .

$$q_s = (H - H_d) * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \left( \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)^2 + \rho_{piso} * H * \left( \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)^2$$

Cuyo primer término de la suma es la radiación directa, el segundo término la radiación difusa y el tercero la radiación que refleja el suelo hacia dicha superficie. La función  $\cos(\theta)$  depende del posicionamiento de la superficie y se puede calcular de esta forma:

$$\cos(\theta) = \cos(\delta_s - \delta_p) * \cos(\alpha_s) * \sin(\beta) + \sin(\alpha_s) * \cos(\beta)$$

Como se dijo anteriormente sobre la superficie a la hora del análisis incide directamente la radiación solar, se toma en cuenta en este instante toda la radiación que cae en la superficie tanto la directa como la difusa y la reflejada.

$$q_s = 483.4 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Al ser por unidad de área se debe multiplicar por el área total del análisis la cual es

$$A = 5.7643[m^2]$$

Por lo tanto la radiación solar que llega a la superficie es

$$Q_s = 2786[W]$$

El calor que absorbe el material en si es.

$$Q_{s_{abs}} = Q_s * \alpha_{etherboard}$$

Como  $\alpha$  del etherboard es 0.445

$$Q_{s_{abs}} = 1240 [W]$$

Se analiza la convección externa, al existir una velocidad externa se toma como una convección forzada.

Para esto se necesita una temperatura promedio del fluido:

$$T_f = \frac{T_{s_{ext}} + T_{ext}}{2}$$

Se calculan las propiedades del aire a dicha temperatura promedio y presión atmosférica, es decir, una presión de 101 [Kpa]

$$P = 101 [KPa]$$

$$Pr = Pr(Air_{ha}; T = T_f; P = P)$$

$$v = KinematicViscosity(Air_{ha}; T = T_f; P = P)$$

$$K_{aire} = K(Air_{ha}; T = T_f; P = P)$$

La longitud característica de la pared a analizar es 2.3 [m]

$$Lc = 2.3[m]$$

Además se hallará también la temperatura promedio para el cálculo de propiedades ya que en el exterior hay convección natural ya que la velocidad externa es de 0 [m/s].

$$\beta_{p_{ext}} = \frac{1}{T_{p_{ext}}}$$

$$Gr = \frac{g * \beta_{p_{ext}} * (T_{s_{ext}} - T_{ext}) * Lc^3}{\nu^2}$$

$$Ra_{ext} = Gr * Pr$$

$$Nusselt_{ext} = \left( 0.825 + \frac{0.387 * Ra_{ext}^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$h_{ext} = \frac{Nusselt_{ext} * K}{Lc}$$

$$Q_{conv_{ext}} = h_{ext} * Area * (T_{s_{ext}} - T_{ext})$$

Por otra parte se analizará el calor por radiación.

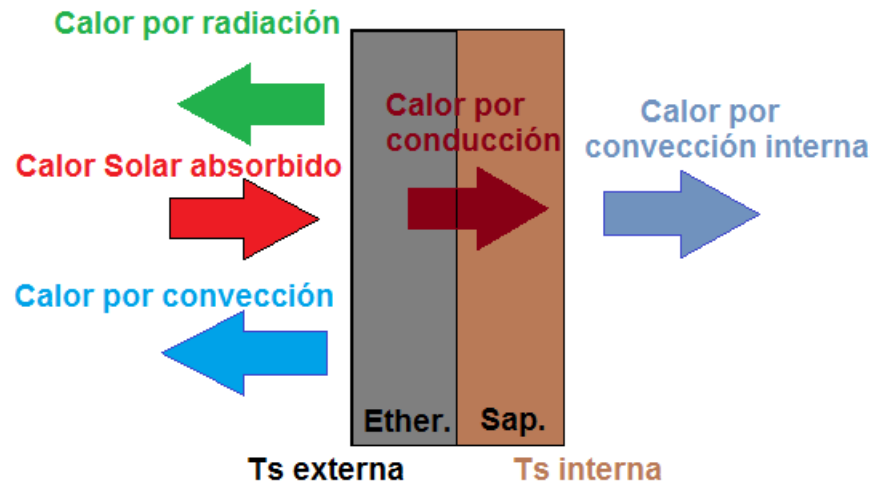
$\varepsilon = 0.9$  Emisividad del etherboard

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 * K^4} \right] \text{ Constante de Stefan Boltzmann}$$

$$Q_{rad} = \sigma * \varepsilon * Area * \left( (T_{s_{ext}} + 273)^4 - (T_{ext} + 273)^4 \right)$$

La Figura F2 Muestra el análisis termodinámico de la superficie externa para hallar la relación que tienen los tres calores hallados anteriormente.

**Figura F2.** Grafica del flujo de energía a través de la superficie externa.



Fuente: Autores

Se tendrá en cuenta que el calor por conducción es:

$$Q_{cond} = \frac{T_{s\ ext} - T_{s\ in}}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{ether} + R_{sap}$$

$$R_{ether} = \frac{e_{ether}}{K_{ether} * Area}$$

$$R_{sap} = \frac{e_{sap}}{K_{sap} * Area}$$

Analizando un volumen de control correspondiente a la superficie externa y las energías que entran y salen.

$$Q_{s\ abs} - Q_{rad} - Q_{conv} - Q_{cond} = 0$$

Se analizará a continuación la convección natural interna.

Para el cálculo de la convección interna, se parte como en la externa, con la longitud característica interna.

$$Lc_i = 2.3[m]$$

Además se hallará también la temperatura promedio para el cálculo de propiedades

$$T_{p_{in}} = \frac{T_{sin} + T_{int}}{2}$$

$$\beta_{pared} = \frac{1}{T_{p_{in}}}$$

$$Pr_{int} = Pr(Air_{ha}; T = T_{p_{in}}; P = P)$$

$$v_{in} = KinematicViscosity(Air_{ha}; T = T_{p_{in}}; P = P)$$

$$K_{interno} = K(Air_{ha}; T = T_{p_{in}}; P = P)$$

$$Gr = \frac{g * \beta_{pared} * (T_{sin} - T_{int}) * Lc_i^3}{v_{in}^2}$$

$$Ra = Gr * Pr_{int}$$

$$Nusselt_{in} = \left( 0.825 + \frac{0.387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr_{int}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$h_{in} = \frac{Nusselt_{in} * K_{interno}}{Lc_i}$$

$$Q_{conv_{in}} = h_{in} * Area * (T_{s_{in}} - T_{int})$$

Mediante un análisis numérico se variará la temperatura externa hasta que el calor por conducción y por convección interna sea el mismo, ya que este sería el análisis termodinámico de la superficie interna.

Se realizará de forma gráfica un análisis el cual es mediante la variación de la temperatura de la superficie externa de la pared, se verá cómo se comporta el calor por conducción y el calor por convección interno, los cuales son representados en la figura F3. Con líneas negra y azul respectivamente.

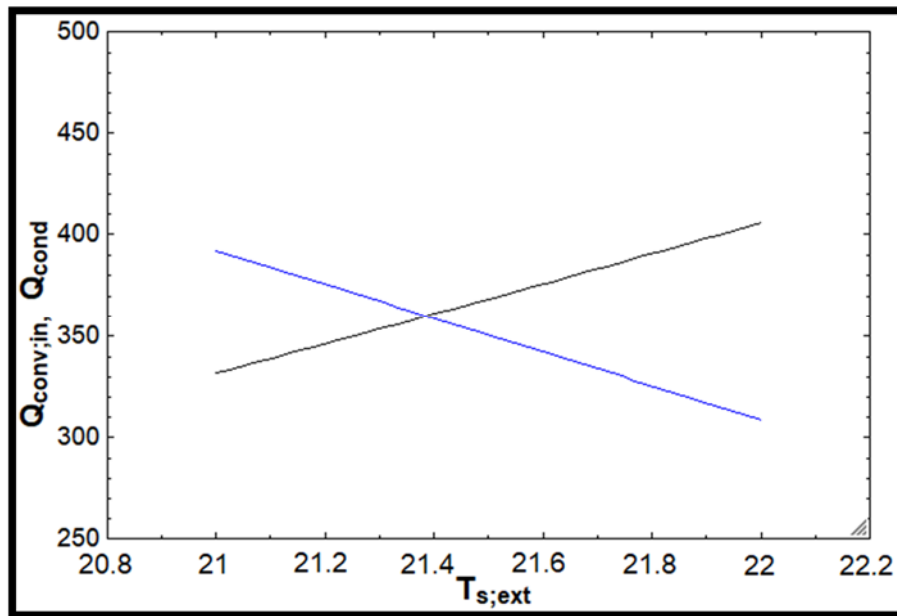
Lo anteriormente dicho se hace para cumplir con este análisis termodinámico sobre la superficie interna

$$Q_{cond} = Q_{conv_{int}}$$

De la figura F3. Se obtiene como resultado que la siguiente temperatura externa de superficie y calor por conducción es:

$$T_{s_{ext}} = 21.42^{\circ}$$

**Figura F3.** Comportamiento del calor por conducción y convección interna con la variación de la temperatura de superficie externa.



Realizando el mismo cálculo tipo para las demás áreas se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla F3.** Resultados por EES de cálculo por superficie.

Superficie	<u>Temp</u> Externa de pared	<u>Temp</u> Interna de pared
Frontal	21.9	21.9
Lateral izquierda	21.42	21.9
Posterior	22	21.9
Lateral derecha	21.18	21.9
Techo	21.12	21.9
Puerta	22.7	21.9

Este proceso anteriormente mostrado es el mismo que realiza el Matlab solo difieren en los balances en intervalos de tiempo con la finalidad de obtener resultados en

estados transitorios.

- **Cálculo tipo para el calor por cada una de las ventanas**

Se analizara el 6 de febrero a las , se tiene información de las propiedades físicas de la ventana:

$$k_{vidrio} = 0.84 \left[ \frac{W}{m * K} \right]$$

$$\varepsilon_{vidrio} = 0.84$$

$$A_{vidrio} = (0.32)^2 [m^2]$$

$$\tau_{vidrio} = 0.837$$

$$e_{vidrio} = 0.004 [m]$$

$$\alpha_{vidrio} = 0.088$$

Propiedades físicas del marco:

$$k_{marco} = 0.8 \left[ \frac{W}{m * K} \right]$$

$$\varepsilon_{marco} = 0.9$$

$$A_{marco} = 0.0576 [m^2]$$

$$e_{marco} = 0.036 [m]$$

$$\alpha_{marco} = 0.8$$

Con la geometría solar y las ecuaciones de radiación solar se conocerá la cantidad de calor que llegará a la superficie producto de la radiación a esa hora.

$$q_{sdirecta} = 518.837 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{sdifusa} = 119.733 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{sreflejada} = 86.702 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$q_{sTotal} = q_{sdirecta} + q_{sdifusa} + q_{sreflejada}$$

Se tienen también las propiedades de la envolvente del recinto

$$T_{ext} = 31.5[{}^{\circ}C]$$

$$T_{cielo} = 279[K]$$

Al no existir ninguna clase de sombra la radiación llegara directamente a la superficie del cristal de la ventana, el cual al ser un material opaco permite la transmisión de este al recinto.

$$Q_{trans\text{vidrio}} = A_{\text{vidrio}} * q_{sTotal} * \tau_{\text{vidrio}}$$

$$Q_{trans\text{vidrio}} = 62.16[W]$$

Ambos materiales tanto el vidrio como el aluminio del que está hecho el marco absorben calor, dichos calores serán necesarios para el análisis de transferencia de calor.

$$Q_{abs\text{vidrio}} = A_{\text{vidrio}} * q_{sTotal} * \alpha_{\text{vidrio}}$$

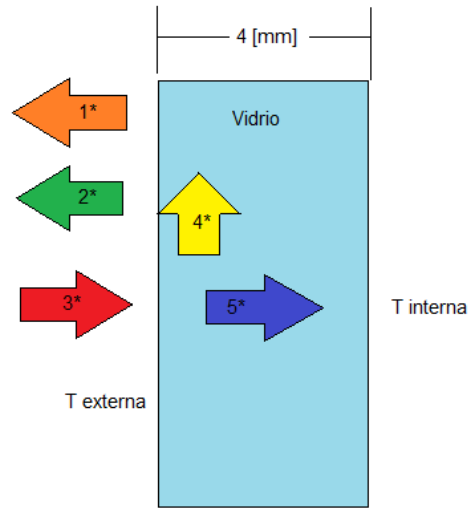
$$Q_{abs\text{marco}} = A_{\text{marco}} * q_{sTotal} * \alpha_{\text{marco}}$$

$$Q_{abs\text{vidrio}} = 6.536 [W]$$

$$Q_{abs\text{marco}} = 33.42[W]$$

La transferencia de calor ocurrirá entre la ventana con los alrededores (cielo), con el aire en la envolvente del recinto y con el interior del recinto como se muestra en la Figura E4.

**Figura F4.** Método grafico de la Transferencia de calor en la ventana.



Donde:

1. Calor por radiación entre la superficie y el cielo
2. Calor por convección de la superficie con el viento de la envolvente
3. Calor por radiación solar que llega a la superficie
4. Calor absorbido por la superficie
5. Calor que se transmite a través del vidrio.

Los cálculos anteriormente dados nos proveerán de un coeficiente de convección externo e interno los cuales son:

$$h_{int} = 7.079 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

$$h_{ext} = 7.88 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Gracias a ello podremos hallar el U de la ventana desde su superficie hasta el aire interior.

$$U_{vidrio} = \frac{1}{\frac{e_{vidrio}}{K_{vidrio}} + \frac{1}{h_{int}}}$$

Se puede entonces Balancear la Superficie externa:

$$Q_{abs\text{vidrio}} = Q_{conv\text{vidrio}} + Q_{rad\text{vidrio}} + Q_{cond\text{vidrio}}$$

$$Q_{conv\text{vidrio}} = h_{ext} * A_{vidrio} * (T_{Sup\text{vidrio}} - T_{ext})$$

$$Q_{rad\text{vidrio}} = A_{vidrio} * \varepsilon_{vidrio} * \sigma * \left( (T_{Sup\text{vidrio}} + 273)^4 - (T_{cielo})^4 \right)$$

$$Q_{cond\text{vidrio}} = U_{vidrio} * A_{vidrio} * (T_{Sup\text{vidrio}} - T_{int})$$

Se realizará el mismo procedimiento para el marco:

$$Q_{abs\text{marco}} = Q_{conv\text{marco}} + Q_{rad\text{marco}} + Q_{cond\text{marco}}$$

$$Q_{conv\text{marco}} = h_{ext} * A_{marco} * (T_{Sup\text{marco}} - T_{ext})$$

$$Q_{rad\text{marco}} = A_{marco} * \varepsilon_{marco} * \sigma * \left( (T_{Sup\text{marco}} + 273)^4 - (T_{cielo})^4 \right)$$

$$Q_{cond\text{marco}} = U_{marco} * A_{marco} * (T_{Sup\text{marco}} - T_{int})$$

Se supone una temperatura interna de 25°C.

$$T_{in} = 25^{\circ}C$$

Para realizar un cálculo de las cargas térmicas ganadas a través de la ventana se hallará la cantidad de calor total que pasa por la ventana así:

$$Q_{ventana\text{Total}} = Q_{cond\text{marco}} + Q_{cond\text{vidrio}} + Q_{trans\text{vidrio}}$$

Danto como resultado

$$Q_{ventana\text{Total}} = 92.11 [W]$$

Si la ventana no está expuesta directamente al sol, y dicha pared y suelo adyacente está sombreado el calor que llega sobre esta será.

$$Q_{trans\text{vidrio}} = A_{\text{vidrio}} * q_{s\text{Total}\text{sombra}} * \tau_{\text{vidrio}}$$

$$q_{s\text{Total}\text{sombra}} = q_{s\text{difusa}}$$

$$Q_{abs\text{vidrio}} = A_{\text{vidrio}} * q_{s\text{Total}\text{sombra}} * \alpha_{\text{vidrio}}$$

$$Q_{abs\text{marco}} = A_{\text{marco}} * q_{s\text{Total}\text{sombra}} * \alpha_{\text{marco}}$$

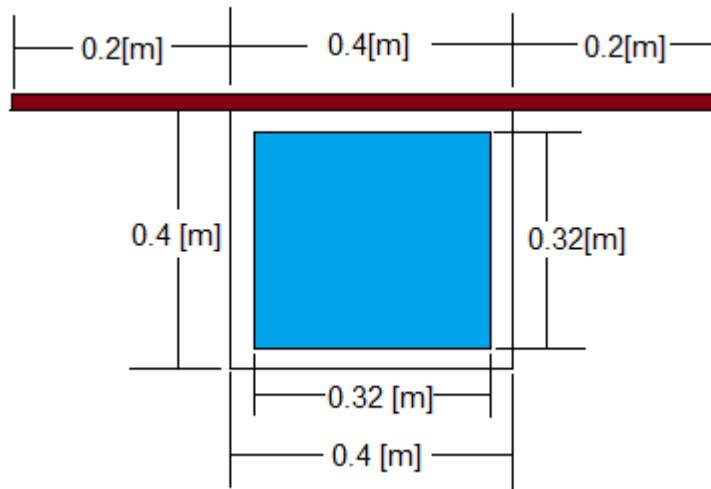
Se realizarán los balances como se mostraron anteriormente, dando como resultado

$$Q_{\text{ventana}\text{Total}\text{sombra}} = 14.8 [W]$$

Lo cual muestra que la mejor manera de disminuir cargas por ventanas es aplicando sombras, para ello se instalaron unas ventanas de 80[cm] x 80[cm].

La figura E5 muestra la instalación de la sombra para la ventana y la geometría Vista frontal.

**Figura F5.** Vista frontal de instalación de ventana con sombra



Para la hora estipulada de las 3pm se calcula cual sería la altura y el ancho de la sombra. Mediante las siguientes ecuaciones.

$$P_v = 0.8[m]$$

$$P_H = 0.8[m]$$

Donde  $P_v$  y  $P_H$  son las distancias física tanto horizontal como vertical de la sombra, la cual tiene el mismo valor por la forma de la sombra. Para el siguiente cálculo se necesitará calcular la proyección vertical y horizontal de la sombra a las 3pm.

$$S_w = P_v * |\tan(\gamma_s + \gamma_p)|$$

Donde:

$\gamma_s$  Azimut solar a las 3pm

$S_w$  Proyección horizontal.

$\gamma_p$  Azimut de la pared que es  $-10^\circ$ , al estar posicionada la sombra en la pared lateral izquierda

$$S_H = P_H * \frac{\tan(\beta)}{\cos(\gamma_s + \gamma_p)}$$

Donde:

$S_H$  Proyección vertical.

$\beta$  Es el ángulo de elevación de la pared que sería  $90^\circ$

Para las 3pm

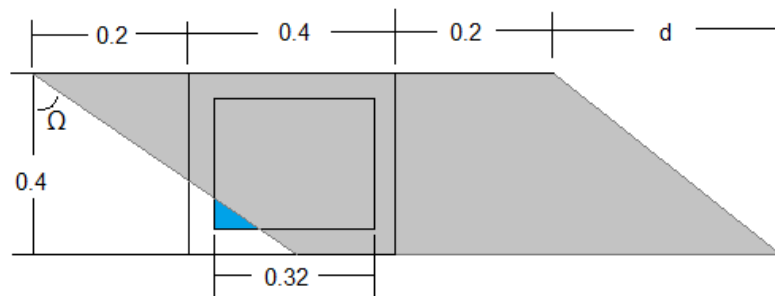
$$\gamma_s = 60.58$$

$$S_w = 2.269[m]$$

$$S_H = 2.15[m]$$

Se analizara solo la parte que puede dar sombra a la ventana por lo tanto se recortara la sombra como se muestra en la figura E6.

**Figura F6.** Geometria de la sombra.



Donde el ángulo  $\Omega$  se halla por relación de triángulos.

$$\tan(\Omega) = \frac{S_w}{S_H}$$

Ya con este ángulo se podrá pasar a hallar las áreas descubiertas.

Para hallar el área descubierta de la izquierda en la ventana tenemos la altura que

es de 0.4 [m] con el ángulo  $\Omega$  se puede hallar las dimensiones de la base sin sombra.

$$\tan(\Omega) = \frac{d}{0.4}$$

El área descubierta de la izquierda será:

$$A_{descIzq} = \frac{d * 0.4}{2} [m^2]$$

Se halla el área descubierta total de la ventana.

$$Base_{vent_{desc}} = d - 0.2$$

$$\tan(\Omega) = \frac{Base_{vent_{desc}}}{Altura_{vent_{desc}}}$$

$$A_{vent_{desc}} = \frac{Base_{vent_{desc}} * Altura_{vent_{desc}}}{2} [m^2]$$

Para el área del vidrio descubierta.

$$Base_{vidrio_{desc}} = Base_{vent_{desc}} - Ancho_{marco}$$

$$Ancho_{marco} = 0.04 [m]$$

$$\tan(\Omega) = \frac{Base_{vidrio_{desc}}}{Altura_{vidrio_{des}}}$$

$$A_{vidrio_{desc}} = \frac{Base_{vidrio_{desc}} * Altura_{vidrio_{des}}}{2} [m^2]$$

Con dicha área se podrá hallar el área descubierta del marco.

$$A_{marco_{desc}} = A_{vent_{desc}} - A_{vidrio_{desc}} [m^2]$$

Y con dichas áreas se calculará el área sombreada de cada parte de la ventana.

$$A_{vidrio_{Total}} = 0.32^2 [m^2]$$

$$A_{marco_{Total}} = 0.4^2 - 0.32^2 [m^2]$$

$$A_{vidrio_{sombra}} = A_{vidrio_{Total}} - A_{vidrio_{desc}} [m^2]$$

$$A_{marco_{sombra}} = A_{marco_{Total}} - A_{marco_{desc}} [m^2]$$

La pared de análisis siempre tendrá la cara al sol, por lo tanto las radiaciones son:

$$q_{sdescubierta} = q_{sdirecta} + q_{sdifusa} + q_{sreflejada} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Para la radiación en la parte sombreada se tiene en cuenta que sobre el suelo si cae radiación y se refleja.

$$q_{sombra} = q_{sdifusa} + q_{sreflejada} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Se transmite cierta radiación ya sea en vidrio descubierto o sombreado.

$$Q_{transvidriodesc} = A_{vidriodesc} * q_{sdescubierta} * \tau_{vidrio} [W]$$

$$Q_{transvidriosomb} = A_{vidriosomb} * q_{sombra} * \tau_{vidrio} [W]$$

Se absorbe calor por cada una de las superficies.

$$Q_{absvidriodesc} = A_{vidriodesc} * q_{sdescubierta} * \alpha_{vidrio} [W]$$

$$Q_{absvidriosomb} = A_{vidriosomb} * q_{sombra} * \alpha_{vidrio} [W]$$

$$Q_{absmarcodesc} = A_{marcodesc} * q_{sdescubierta} * \alpha_{marco} [W]$$

$$Q_{absmarcosomb} = A_{marcosomb} * q_{sombra} * \alpha_{marco} [W]$$

Con dichos calores se puede hallar los calores que van hacia el recinto interior analizando cada superficie como se hizo anteriormente.

Se usarán los mismos coeficientes de convección. Tanto interno como externo.

$$h_{int} = 7.079 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

$$h_{ext} = 7.88 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Se analizará una superficie para dejar claro el análisis.

$$Q_{absvidriodesc} = Q_{convvidriodesc} + Q_{radvidriodesc} + Q_{condvidriodesc}$$

$$Q_{convvidriodesc} = h_{ext} * A_{vidriodesc} * (T_{svidriodesc} - T_{ext})$$

$$Q_{rad_{vidriodesc}} = A_{vidriodesc} * \epsilon_{vidrio} * \sigma * \left( (T_{S_{vidriodesc}} + 273)^4 - (T_{cielo})^4 \right)$$

$$Q_{cond_{vidriodesc}} = U_{vidrio} * A_{vidriodesc} * (T_{Sup_{vidriodesc}} - T_{int})$$

Después de realizar dicho análisis para cada superficie marco y vidrio tanto sombreado como descubierto se halla la cantidad de radiación total que va hacia el recinto.

$$Q_{ventana_{Total2}} = Q_{cond_{vidriodesc}} + Q_{cond_{vidriosomb}} + Q_{cond_{marcodesc}} + Q_{cond_{marcosomb}} \\ + Q_{trans_{vidriodesc}} + Q_{trans_{vidriosomb}}$$

Dando como resultado a una Temperatura interna de 25°C.

$$Q_{ventana_{Total2}} = 32.97 [W]$$

Recordemos que en una ventana sin sombra.

$$Q_{ventana_{Total}} = 92.11 [W]$$

El ahorro se calcula de la siguiente forma.

$$Ahorro \% = \frac{Q_{ventana_{Total}} - Q_{ventana_{Total2}}}{Q_{ventana_{Total}}} * 100$$

$$Ahorro \% = 64.2\%$$

## ANEXO G. MODELAMIENTO DE MÉTODOS PASIVOS

- **Paredes**

Para la simulación en la superficies se crean aislantes como un material nuevo y se agrega a cada una de las capas de la pared, teniendo en cuenta que el aislante debe quedar en la parte interior del recinto.

Dentro del mercado de aislantes que se encuentra en la actualidad, se pueden catalogar en dos grupos principales, los sintéticos y los naturales, en las tablas G1 y G2 se pueden observar los aislantes naturales y sintéticos que pueden ser adquiridos en nuestro país, las tablas muestran las propiedades utilizadas para su creación en el simulador.

Para cada uno de los materiales se realiza como mínimo una simulación, para aquel material que tenga diferentes conductividades o espesores se realizan varias. En total se desarrollaron 29 simulaciones en donde solo se modificaba las capas de las paredes. Las características térmicas de estos materiales se realizaron bajo una investigación con sus respectivos proveedores.

**Tabla G1. Materiales Aislantes naturales.**

Materiales aislantes naturales						
No	material	conductividad térmica [W/m*c°]	espesor [cm]	densidad [kg/m^3]	calor especifico [J/kg*k]	absortancia térmica
1	Celulosa	0,035 - 0,039	4	45	2100	0,7
2	Cáñamo	0,041 - 0,046	7	20- 25	1500	0,8
3	Lino	0,04 - 0,047	4,5	30	1500	0,8
4	Cáñamo	0,043	10	25	1500	0,8
5	Arlita	0,1	5	300-800	1100	0,8
6	Lana de oveja	0,04	6-10	20-80	1000	0,8
7	Algodón	0,03	1,8	60	840	0,8
8	Perlita	0,04	2	50-125	837	0,8

**Tabla G2. Materiales Aislantes sintéticos.**

Materiales aislantes sintéticos						
No	Material	Conductividad térmica [W/m*c°]	Espesor [cm]	Densidad [kg/m^3]	Calor especifico [J/kg*k]	Absortancia térmica
9	Placas en poliuretano	0,0245	2,54	40	1758	0,7
		0,0245	11,43	40	1758	0,7
10	Manta cerámica	0,0374	2,54-10,16	96	1130	0,6
		0,0374	2,54-10,16	192	1130	0,6
11	Placa térmica	0,03317	2,54-10,16	40	840	0,7
		0,03317	2,54-10,16	80	840	0,7
		0,03317	2,54-10,16	144	840	0,7
12	Lana de poliéster	0,063	5	6,1	850	0,75
13	Fiberglaas (fibra de vidrio)	0,04507	8,89-6,35	32	1030	0,7
		0,04507	8,89-6,35	90	1030	0,7
14	Aislante especial para techo (Roof insulation)	0,03881	0,019	112,1	450	0,8

- **Techo**

Para los techos se busca mejorar o aumentar la reflectividad que poseen las tejas de barro, y de igual manera que en las paredes, aislar el techo para retardar el tiempo que tarda el flujo de calor en entrar al recinto. Para la reflectividad se disponen de los siguientes materiales o aplicaciones que se muestran en la tabla G3, con su respectiva información térmica.

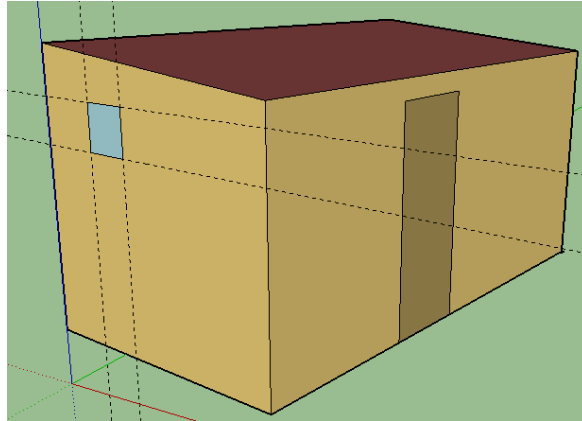
**Tabla G3.** Aplicaciones externas para techos.

No°	Material	Conductividad térmica [W/m*c°]	Espesor [m]	Densidad [kg/m^3]	Calor específico [J/kg*k]	Absortancia térmica	Absortividad solar
1	Pintura blanca	0,056	0,001	750	1500	0,2	0,1
2	Foil negro	0,09374	0,003	3	900	0,9	0,8
3	Foil medio	0,03448	0,0035	3	900	0,5	0,6
4	Foil reflectante Fiberglass	0,01031-	0,075	4,1	900	0,7	0,15
5	Pintura aluminio	200	0,001	788	930	0,7	0,15
7	Teja UPVC	0,0643	0,003	116,13	1172	0,6	0,5

- **Ventanas**

Para la implementación de las ventanas se inicia con la estructura geométrica de estas, para ellos se inicia en SketchUp el posicionamiento y medidas de la ventana. Para la creación del área que ocupará la ventana, se debe seleccionar el recinto y mediante un rectángulo crear la sub-superficie que se ocupará. Al crearse la sub-superficie el software lo toma como una ventana igual que en la figura G1, al contrario de si se crea una sub-superficie que sea tan grande que toque el suelo del recinto ya que el software lo toma como una puerta.

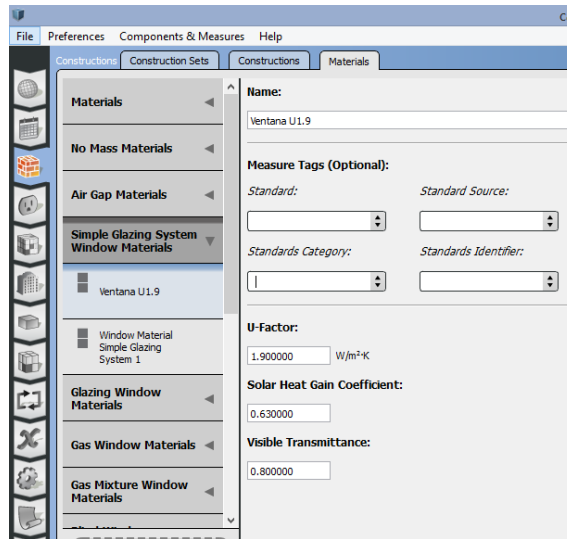
**Figura G1.** Sub-superficie ventana.



Ahora mediante el software OpenStudio se darán propiedades del material que simulará la sub-superficie creada. Los materiales para las ventanas se pueden crear de dos maneras diferentes, una es mediante el coeficiente global de transferencia de calor  $U$  [ $W/m^2$ ] el cual algunos fabricantes usan para describir vidrios aislantes o a termo panel.

En la figura G2 se muestra el ingreso de los materiales para una ventana a termo panel con un valor  $U$  conocido, además de dicho valor se debe tener el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) y la transmitancia.

**Figura G2.** Ingreso de las propiedades para una ventana a termo panel.



Por otra parte, para la creación de una ventana simple se pueden agregar los materiales como capas de material en la sub superficie, en la figura G3 se muestra como se agregan valores para una ventana simple de 4[mm] de espesor.

**Figura G3.** Ingreso de propiedades para un vidrio de 4[mm] en OpenStudio.

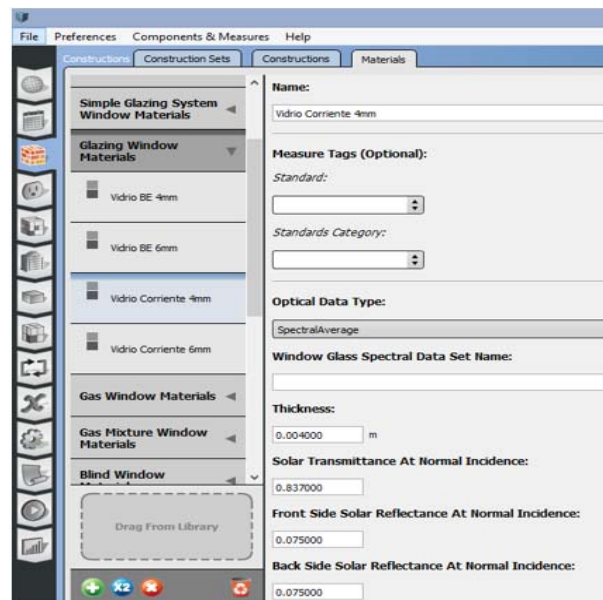
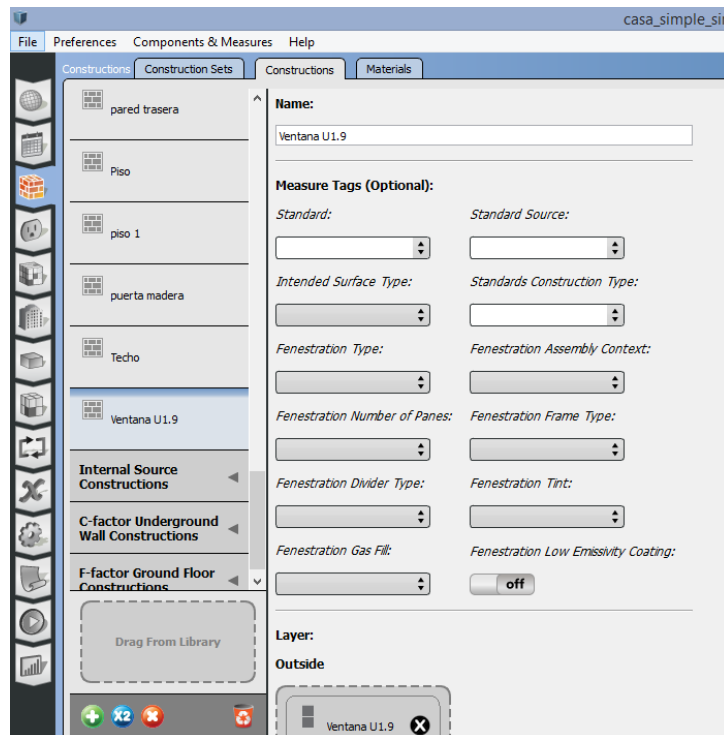


Figura G4. Modelado de una ventana de  $U=1.9$  [ $W/m^2 \cdot K$ ].



El siguiente paso es hacer la construcción del vidrio por capas como se vio anteriormente en una pared, para luego implementarlo al recinto, en la figura G4, se muestra como se modela una ventana a termo panel, solo se tomaría como una capa siempre, ya sea a termo panel o simple.

Posterior a esto se define dónde irá esta construcción, para eso se muestra en la figura G5 la sub-superficie en la pestaña espacios, se debe arrastrar la construcción preestablecida hasta la casilla de la sub-superficie en la que se desea se tengan dichas características.

**Figura G5.** Sub superficies en OpenStudio.

Space Name	All	Subsurface Name	Parent Surface Name	Subsurface Type	Multiplier	Construction	Outside Boundary Condition Object
	<input type="checkbox"/>			Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	
casa	<input type="checkbox"/>	Sub Surface 2	pared lat derecha	FixedWindow	1.000000	ASHRAE 189.1-2009 ExtWinc	
	<input type="checkbox"/>	puerta	pared frontal	Door	1.000000	puerta madera	
	<input type="checkbox"/>	Sub Surface 1	pared lat izq	FixedWindow	1.000000	ASHRAE 189.1-2009 ExtWinc	

Todas las sub-superficies del recinto deben estar completas en cuanto a su característica de construcción. En la figura G6, Se puede observar la configuración de dos sub-superficies, una puerta y una ventana.

**Figura G6.** Caracterización para ventanas y puertas para el recinto.

Space Name	All	Subsurface Name	Parent Surface Name	Subsurface Type	Multiplier	Construction	Outside Boundary Condition Object
	<input type="checkbox"/>			Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	
casa	<input type="checkbox"/>	puerta	pared frontal	Door	1.000000	puerta madera	
	<input type="checkbox"/>	Sub Surface 1	pared lat izq	FixedWindow	1.000000	Ventana U1.9	

Para finalizar el diseño de una ventana se trabajan los marcos, estos tendrán también propiedades específicas que deben ser ingresadas en el software. La tabla G4 muestra los datos tanto para un marco de metal como de madera que se encuentran en el mercado. Para un vidrio mono capa se usan marcos de aluminio y para vidrios termopanel se usa marco de madera.

**Tabla G4.** Datos para marcos en OpenStudio.

propiedades	Unidades	marco de aluminio	marco de madera
ancho del marco	[m]	0,04	0,07
marco fuera de proyección	[m]	0,015	0,02
marco dentro de la proyección	[m]	0,015	0,02
conductancia del marco	[W/m2-k]	5,7	1,8
relación de la conductancia de borde de vidrio del marco al centro de la conductancia del vidrio		1,3	1,3
absorción solar del marco		0,8	0,8
absorción visible del marco		0,8	0,8
Emisividad hemisférica térmica		0,9	0,9

Para una mejor explicación de las propiedades se usa la figura G7, la cual muestra la proyección del marco tanto hacia afuera de la casa como hacia adentro, el ancho del mismo, las otras propiedades son las conductividades térmicas, la absorción solar y visible y emisividad que se explicó anteriormente.

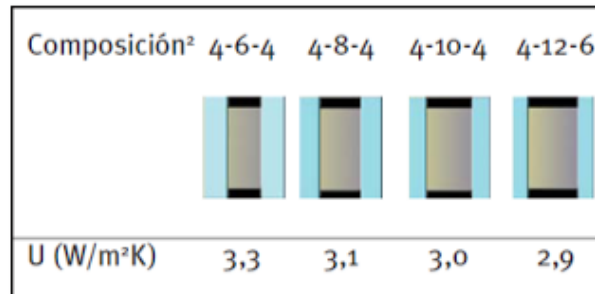
**Tabla G5.** Propiedades ventanas a termo panel.

Tipo de ventana	Factor U [W/m <sup>2</sup> *K]	SHGC	Transmisividad Visible
<b>Ventana U1.9</b>	1.9	0.63	0.8
<b>Ventana U2.1</b>	2.1	0.65	0.8
<b>Ventana U2.3</b>	2.3	0.67	0.8
<b>Ventana U2.5</b>	2.5	0.68	0.8
<b>Ventana U2.9</b>	2.9	0.72	0.8
<b>Ventana U3.3</b>	3.3	0.74	0.8
<b>Ventana U3.7</b>	3.7	0.77	0.8

Fuente: Propiedades de materiales arquitectónicos URSA.

En la tabla G5, se puede observar como son las propiedades físicas, es decir, su transmisividad visible y el coeficiente de ganancia solar, así como su coeficiente de transferencia de calor U.

**Figura G7.** Medidas físicas en [mm] para los distintos valores de U.



Fuente: Vidrio. Disponible en: <http://lasventanasdecasa.blogspot.com.co/p/vidrio.html>

La Figura G8, muestra la configuración física tanto de espesores de vidrios como del espacio entre ellos para diversas configuraciones de termopanel.

En la tabla G6 se muestran las propiedades para los diferentes vidrios sencillos a los cuales se les realizarán simulaciones.

**Tabla G6.** Propiedades ventanas de vidrio sencillo.

Propiedades	Vidrio 4mm	Vidrio 6mm	Vidrio BE* 4mm	Vidrio BE* 6mm
Espesor [m]	0,004	0,006	0,004	0,006
Transmitancia solar a incidencia normal	0,837	0,775	0,894	0,6
Reflectancia solar a incidencia normal en la cara frontal	0,075	0,071	0,079	0,17
Reflectancia solar a incidencia normal en la cara posterior	0,075	0,071	0,079	0,22

Transmitancia visible a incidencia normal	0,898	0,881	0,911	0,84
Reflectancia visible frontal a incidencia normal	0,081	0,08	0,082	0,055
Reflectancia visible posterior a incidencia normal	0,081	0,08	0,082	0,078
Transmitancia infrarroja a incidencia normal	0	0	0	0
Emisividad hemisférica infrarroja en la cara frontal	0,84	0,84	0,84	0,84
Emisividad hemisférica infrarroja en la cara posterior	0,84	0,84	0,84	0,1
Conductividad	0,9	0,9	0,9	0,9
Factor de corrección de ensuciamiento para transmitancia solar y visible	1	1	1	1

\*Vidrios de baja emisividad, es decir,  $\varepsilon < 0.03$

Fuente: Propiedades de materiales arquitectónicos URSA.

Se debe tener en cuenta que las propiedades visibles están relacionadas con la incidencia de la luz a través de la ventana, mientras que las propiedades solares están ligadas a la energía y las infrarrojas a la energía infrarroja, o sea, longitudes de onda alrededor de 8 a 14 micrómetros.

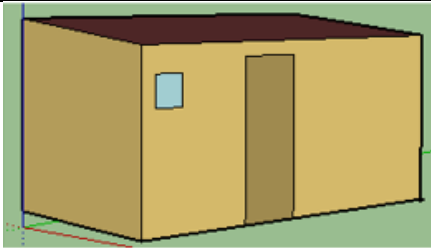
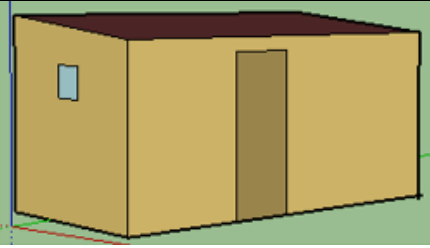
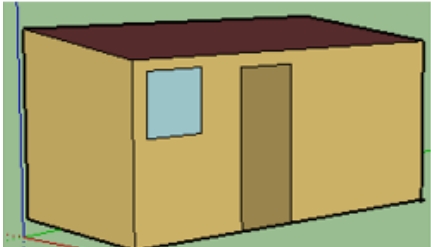
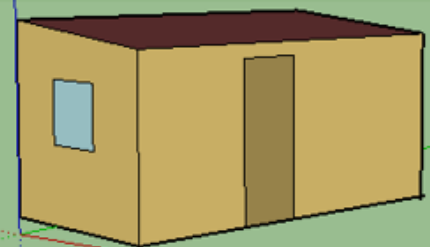
**Tabla G7.** Propiedades de los marcos para ventanas.

Propiedades	Marco de Aluminio Simple	Marco de madera
Ancho del marco	0,04	0,07
Proyección externa del marco	0,015	0,02
Proyección interna del marco	0,015	0,02
Conductividad marco	5,7	2,2
Proporción de la conductividad del vidrio del marco	1,3	1,3

con el borde a la conductividad del centro del vidrio		
Absortancia Solar del marco	0,8	0,8
Absortancia visible del marco	0,8	0,8
Emisividad hemisférica	0,9	0,9

Fuente: Propiedades de materiales arquitectónicos URSA.

**Tabla G8.** Configuración y dimensionamiento de ventanas.

	Ventanas en Frontal y Posterior	Ventanas en Caras laterales
Ventanas 40 x 40 [cm]		
Ventanas 80 x 80 [cm]		

Finalmente para el marco las propiedades que se implementarán se pueden visualizar en la tabla G7, para saber las dimensiones y el posicionamiento de las ventanas se hacen diversas pruebas en el simulador, para el dimensionamiento se tienen dos opciones, ventanas de 40[cm] de ancho y 40[cm] de alto o ventanas de 80[cm] de ancho y 80[cm] de alto ya que son dimensiones estándar; para el posicionamiento también se tienen 2 opciones, ventanas en las áreas laterales del recinto, es decir, una en el área lateral izquierda y otra en la lateral derecha o ventanas en las áreas frontal y posterior como se muestra en la tabla G8.

- **Infiltraciones**

Teniendo en cuenta que se simularán ventanas, se aplica de la misma forma como se realizó para la puerta el cálculo de infiltraciones en las ventanas y marcos de las ventanas, el cálculo tipo se muestra en el numeral 4.2.3 del cuerpo del trabajo, en donde dependerá del tipo de ventana a implementar y sus dimensiones geométricas, utilizando las mismas ecuaciones que se utilizaron para infiltraciones en puertas y marco de puertas.

Para hallar cada una de las áreas efectivas se multiplica el área total de dicho elemento por el factor. En la tabla G9 se muestran los resultados para cada uno de los elementos.

**Tabla G9.** Área de fugas efectiva.

Elemento	Área[m <sup>2</sup> ]	Área de fugas efectiva [cm <sup>2</sup> ]
Ventana	0,102	0,611
Marco Ventana	0,058	0,076

Para finalmente hallar las infiltraciones la cual varía por horas como se muestra en la tabla G10. Se toma infiltraciones para dos ventanas, una puerta, un par de marcos de ventanas y un marco de puerta para el día 6 de febrero, en las horas más significativas.

**Tabla G10.** Infiltraciones en ventanas y marco de ventanas

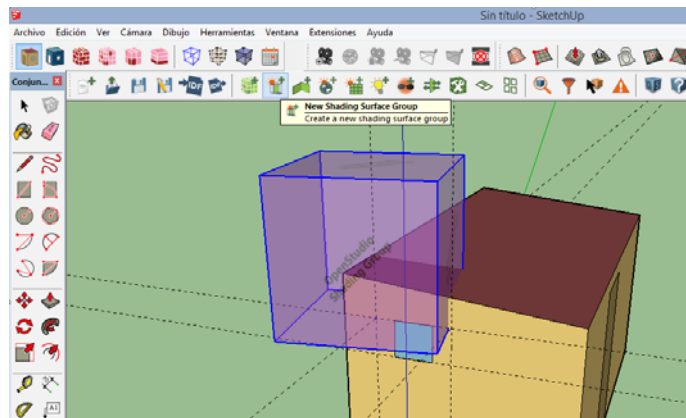
Hora [horas]	Velocidad del Viento [m/s]	ΔT	Infiltraciones Totales [L/s]
--------------	----------------------------	----	------------------------------

11	2,222	1	0,862
12	4,472	1,244	1,684
13	5,361	1,334	2,012
14	6,694	0,884	2,497
15	8,944	1,804	3,339
16	5,361	1,103	2,008

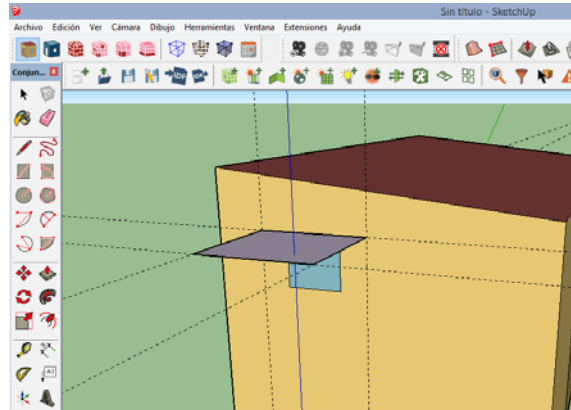
- **Aleros**

La implementación de las sombras se inicia con un modelo geométrico en SketchUp, en donde por medio de la herramienta medir anteriormente nombrada se delimita lo que serán las medidas de la sombra, teniendo la geometría deseada para la sombra, mediante la herramienta New Shading Surface Group se crea un cubo que se centrara en la arista seleccionada, para dar paso a la creación de la sombra. La figura G9 muestra el cubo creado por la herramienta anteriormente nombrada.

**Figura G8.** Aplicación de la herramienta New Shading Surface Group.



**Figura G9.** Sombra completa SketchUp.



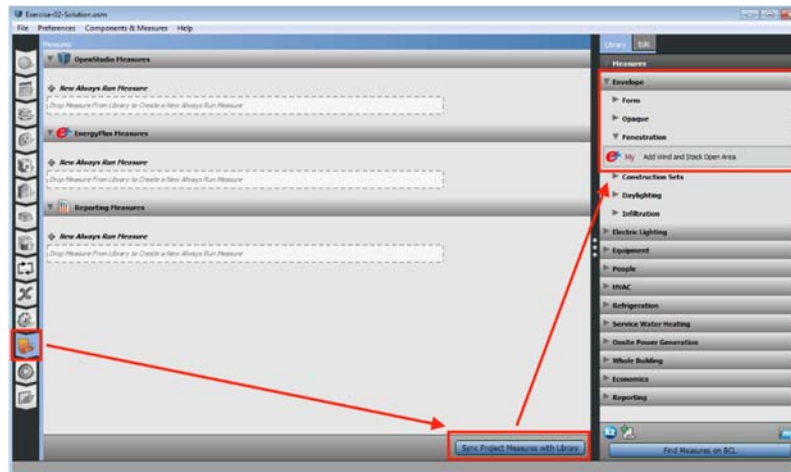
Para finalmente crear la sombra como se muestra en la figura G10. Esta sombra tendrá las dimensiones determinadas, el software permite cualquier tipo de geometría para esta sombra, hasta posibles superficies ajenas a la casa que generen sombra.

- **Ventanas Abiertas**

La implementación de ventanas abiertas en OpenStudio se realiza mediante un herramienta EnergyPlus llamada “Add wind and Stack Open Area” la cual crea una “ZoneVentilation: WindandStackOpenArea” la cual debe estar delimitada en una área externa, funciona como un control ON- OFF el cual, cuando la temperatura interna supera cierto límite, las ventanas se abrirán.

Se puede iniciar la creación del área abierta en el OpenStudio en la pestaña “measures” y agregar el componente de energyplus “Add wind and Stack Open Area” como se muestra en la figura G11

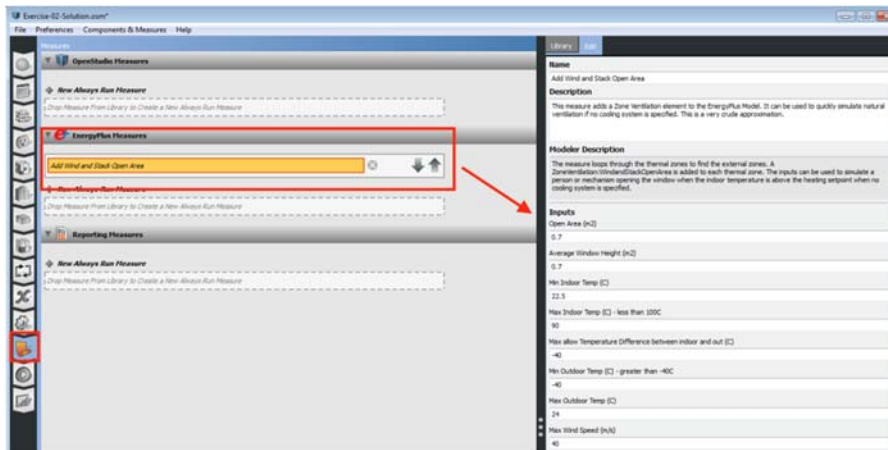
Figura G10. Implementation de Add wind and stack.



El siguiente paso es la creación del área abierta, para eso se arrastra desde la parte derecha a la casilla bajo EnergyPlus measures la opción Add wind and Stack Open Area, al dejarla sobre la casilla se puede pasar al siguiente paso que es darle cualidades a dicha área como se muestra en la figura G12.

Se crean 2 áreas abiertas cada una con las características que se muestran en la figura G12, en donde se tuvieron en cuenta para ventanas de 40 [cm] de lado y la velocidad del aire máxima.

Figura G11. Adición de nueva área abierta agregada.



**Figura G12.** Características de cada una de las figuras.

Inputs	
Open Area (m2)	0.1024
Average Window Height (m2)	0.32
Min Indoor Temp (C)	25.2
Max Indoor Temp (C) - less than 100C	33.104
Max allow Temperature Difference between indoor and out (C)	4.55
Min Outdoor Temp (C) - greater than -40C	25.2
Max Outdoor Temp (C)	31.4
Max Wind Speed (m/s)	8.944

En la figura G13 las características requeridas son tanto el área abierta efectiva de la ventana la cual es de 32 [cm] x 32 [cm] ya que el marco tiene 4 [cm] de ancho, la altura promedio de la ventana que es 32[cm], la temperatura mínima interna y externa tomadas de la tabla 5, la temperatura máxima externa, la velocidad máxima del viento (tabla 6) y la diferencia máxima entre las temperaturas exterior e interior datos los cuales se obtienen de la tabla 5.

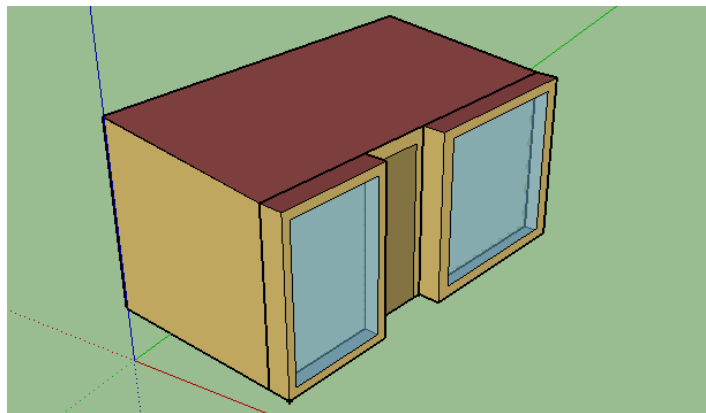
- **Muro Trombe**

Para la simulación del muro trombe, inicialmente se realiza una nueva zona térmica contigua a la pared donde se desea implementar el sistema, posterior a esto se debe crear una ventana sobre esta nueva zona térmica como se muestra en la figura F14, en donde se puede observar el muro trombe aplicado en la pared frontal del recinto, estos pasos se realizan en SketchUp. Una vez realizado el diseño geométrico, se importa el archivo a OpenStudio donde a esta nueva zona térmica se le debe incluir la propiedad de cálculo de “Trombewall”, en donde se dan las

características propias para refrigerar.

Este procedimiento se realizó para cada una de las paredes por separado para analizar su desempeño por pared, dado que su implementación para las cuatro paredes sería inviable económicamente.

**Figura G13.** Muro Trombe para pared frontal.



- **Fachada ventilada**

Para el desarrollo de la fachada ventilada es necesario la utilización del entorno de EnergyPlus, en el cual inicialmente en la opción "SurfaceProperty:Other Side Conditions Model" se crea un objetivo con la característica de "Gap Convection Radiation", el cual permitirá analizar convección y radiación en huecos. Posteriormente en "Building:Surface Detailed" se identifica la superficie a la cual se desea aplicar este método y seleccionada la superficie se modifica la propiedad de cálculo de análisis de esta superficie por el nuevo objeto creado. Finalmente en la opción "Advanced Construction Surface Zone Concept" se crea un objeto de características de superficie exterior con cavidad ventilada, en ella se llama al objeto creado que permite analizar convección y radiación en huecos y exigirá datos de diseño como el porcentaje de apertura del hueco, la emisividad de la superficie, la absorptividad,

flotabilidad del aire y datos por defecto que el programa toma para una funcionalidad en la fachada ventilada como se muestra en la figura G15, donde se muestra la aplicación de este método para la pared trasera, junto con los valores utilizados.

Para la simulación de fachadas ventiladas se diseñaron en base en que la superficie exterior sea otra capa de Etherboard, donde se maneja entre un 5-10% de apertura, es decir al tamaño de la nueva superficie (igual al tamaño de la pared que se esté analizando tendrá 5-10% de apertura en donde entrara la corriente de aire) con 10 y 20 cm de espacio entre la pared dicha del recinto y la pared exterior donde se realizara la ventilación, Este análisis se realiza para cada pared por separado y una simulación con fachadas ventiladas en las cuatro paredes.

**Figura G14.** Configuración de características de fachada ventilada

Field	Units	Obj1
Name		ventfachada
Boundary Conditions Model Name		fachadaventilada
Area Fraction of Openings	dimensionless	0,01
Thermal Emissivity of Exterior Baffle Material	dimensionless	0,9
Solar Absorbivity of Exterior Baffle	dimensionless	0,5
Height Scale for Buoyancy-Driven Ventilation	m	1
Effective Thickness of Cavity Behind Exterior Baffle	m	0,06
Ratio of Actual Surface Area to Projected Surface Area	dimensionless	1
Roughness of Exterior Surface		Rough
Effectiveness for Perforations with Respect to Wind	dimensionless	0,25
Discharge Coefficient for Openings with Respect to Buc	dimensionless	0,65
Surface 1 Name		pared trasera

## ANEXO H: PROPUESTA TECHO VERDE

Para el comportamiento de la casa con elementos pasivos ecológicos. Se tiene en cuenta la temperatura máxima interna diaria y la hora en que alcanza dicha temperatura (tabla H1).

**Tabla H1.** Comportamiento térmico de la casa con techo y pared verde.

Fecha	Temperatura Máxima Interna [°C]	Hora [horas]
26-abr	29,77	16
27-abr	31,55	17
28-abr	31,1	16
29-abr	29,88	16
30-abr	30,43	17
01-may	29,9	16
02-may	31,43	17
03-may	31,5	17
04-may	30,05	16
05-may	30,58	17
06-may	30,29	17
07-may	30,14	16
08-may	30,86	16
09-may	30,67	17
10-may	30,2	16
11-may	30,68	17
12-may	31,2	17
13-may	31,1	17
14-may	29,88	17
15-may	31,5	17
16-may	31,32	17
17-may	30,12	17
18-may	30,17	17
19-may	31,94	17
20-may	30,74	17
21-may	30,07	17
22-may	31,33	17
23-may	30,14	16
24-may	31,66	17
25-may	30,7	17
26-may	30,23	17
27-may	30,56	17

28-may	30,61	17
29-may	31,29	17
30-may	30,74	17
31-may	31,08	16
01-jun	31,32	17
02-jun	30,07	17
03-jun	30,68	16
04-jun	30,29	17

Se muestran imágenes de montaje del techo verde a continuación.

**Figura H1.** Montaje de marco



**Figura H2.** Inicio de montaje de techo verde.

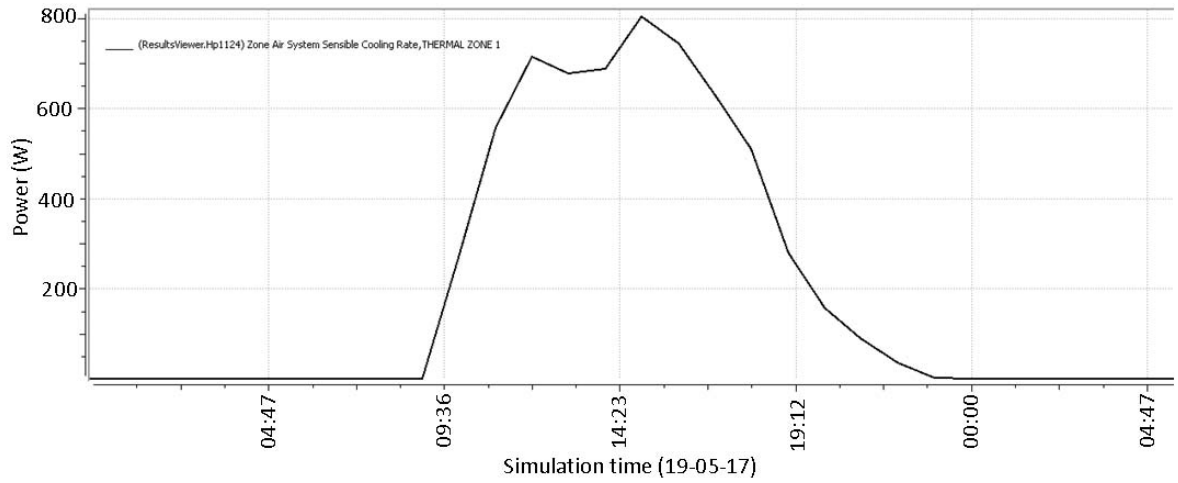


**Figura H3.** Montaje final de casa ecológica.



## ANEXO I. RESULTADOS DE SIMULACIONES FINALES

**Tabla I1.** Carga real para recinto con modificaciones pasivas 19 de mayo.



**Tabla I2.** Carga real para recinto sin modificaciones 19 de mayo.

