

ESTUDIO DEL 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

DAVID ALEJANDRO ARCHILA BARÓN  
JULIÁN FERNANDO VEGA DELGADO

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

2017

ESTUDIO DEL 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

DAVID ALEJANDRO ARCHILA BARÓN

JULIÁN FERNANDO VEGA DELGADO

Trabajo de grado para optar al título de:

Ingeniero mecánico

Director:

JULIÁN ERNESTO JARAMILLO IBARRA

Ingeniero mecánico, PhD

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

2017

## **DEDICATORIA**

A mis Padres y hermano, quienes por su esfuerzo y apoyo incondicional me impulsaron a cumplir con mis metas en la formación profesional.

A mis compañeros de estudio Álvaro, Edward, Iván, Julián, Harol, Sergio por su compañía durante nuestra formación como profesionales y a quienes de alguna manera contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

**David Alejandro Archila B.**

## DEDICATORIA

A mis Padres, su amor interminable, sublime y sin condiciones.

A mi Hermana Luz y mi Hermano Juan, pienso en ustedes cada vez que veo mi interior.

A mis compañeros David, Julián, Álvaro.

Al poder incorruptible de la Música y la Amistad (MERISI, fiel hasta la muerte).

*Julián Fernando Vega Delgado*

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>17</b>
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>21</b>
<b>3. GENERALIDADES</b> .....	<b>25</b>
3.1 ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA .....	25
3.2 PAREDES VERDES .....	26
3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS PAREDES VERDES .....	27
3.4 UTILIZACIÓN DE LAS PAREDES Y TECHOS VERDES COMO PLATAFORMA DE CULTIVOS A PEQUEÑA ESCALA .....	31
3.5 SISTEMAS GENERADORES DE AGUA ATMOSFÉRICA .....	32
<b>4. TRANSFERENCIA DE CALOR</b> .....	<b>35</b>
4.1 CONDUCCIÓN .....	35
4.2 CONVECCIÓN.....	36
4.3 RADIACIÓN .....	37
4.4 ANÁLISIS TRANSITORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR COMBINADO	38
4.4.1 Métodos numéricos aplicados al análisis de transferencia de calor combinado .....	40
<b>5. MODELAMIENTO TÉRMICO DE HABITÁCULOS</b> .....	<b>41</b>
5.1 BALANCE TÉRMICO DE RECINTOS EN EDIFICACIONES VERDES Y NO VERDES .....	41
5.1.1 Balance térmico para los techos.....	42
5.1.1.1 Cuantificación del calor latente en los techos bajo estudio.....	44
5.1.1.2 Determinación del coeficiente de convección externo (h) .....	46
5.1.2 Balance térmico para las paredes.....	46
5.1.3 Balance térmico para el ambiente interior .....	51

5.1.3.1 Determinación del coeficiente de convección interno .....	53
5.2 MODELAMIENTO DE CONDUCCIÓN TRANSITORIA EN RECINTOS .....	55
5.3 APLICACIÓN DE LOS MODELOS A CADA RECINTO .....	60
5.3.1 Paredes de eterboard .....	61
5.3.2 Pared verde .....	62
5.3.3 Techo con placa de concreto .....	63
5.3.4 Techo con cubierta verde.....	64
<b>6. MONTAJE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>67</b>
6.1 PROCESO DE ADECUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RECINTOS	67
6.2 SISTEMA DE MONITOREO: ESTACIÓN DE INVESTIGACIÓN .....	71
6.3 PARED VERDE MODULAR DE FÁCIL INSTALACIÓN .....	75
6.4 SUMINISTRO DE AGUA Y RIEGO POR GOTEO OPTIMIZADO UTILIZANDO UN GENERADOR DE AGUA ATMOSFÉRICA PARA REPONER PÉRDIDAS Y REGENERAR GRADUALMENTE EL AGUA .....	79
6.4.1 Sistema de control de riego automático y encendido del sistema de reposición de agua.....	82
6.4.1.1 Encendido y apagado del subsistema de AWG .....	84
6.4.1.2 Activación del sistema de riego en horas preestablecidas.....	85
6.4.1.3 Adquisición de datos de humedad de la tierra de cultivo de las plantas de la huerta.....	86
6.4.2 Módulos de arduino utilizados para el desarrollo del proyecto.....	87
6.4.2.1 Módulo RTC Marca ELEGO.....	88
6.4.2.2 Modulo SD Marca ELEGO .....	88
6.4.2.3 Plataforma de Arduino utilizada Marca ELEGO .....	88
6.4.2.4 Módulo de relés Marca ELEGO .....	88
6.4.3 Configuración del sistema de riego y adquisición de datos .....	89
6.5 SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	90
6.5.1 Criticidad por Amperaje.....	91
6.5.2 Criticidad por cantidad de energía consumida en un ciclo.....	92
<b>7. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....</b>	<b>97</b>
7.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES .....	97
7.1.1 Caracterización de la velocidad del viento.....	98
7.1.2 Caracterización de la temperatura del aire ambiente.....	99

7.1.3 Caracterización de la radiación solar incidente y horas de luz solar al día .	100
7.1.4 Caracterización de la humedad relativa del ambiente exterior.....	101
7.2 DATOS COLECTADOS EN EL ESTUDIO TÉRMICO .....	102
7.3 PREDICCIÓN DE TEMPERATURAS .....	106
7.3.1 Análisis de la primera sesión de pruebas.....	106
7.3.2 Análisis de la segunda sesión de pruebas.....	109
7.4 CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA EN LOS RECINTOS .....	112
<b>8. AHORRO ENERGÉTICO OBTENIDO EN COSTOS DE REFRIGERACIÓN CONVENCIONAL.....</b>	<b>113</b>
8.1 Costo de retirar la carga térmica de cada recinto bajo estudio .....	113
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>117</b>
<b>10. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>119</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>120</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Correlaciones empíricas del número de Nusselt para convección natural sobre superficies planas .....	55
Tabla 2. Consumos del sistema fotovoltaico.....	91
Tabla 3. Promedio de los valores de radiación medidas el 18 y 19 de octubre ...	100
Tabla 4. Temperaturas superficiales interiores recinto con techo de concreto ....	103
Tabla 5. Temperaturas superficiales interiores recinto con techo verde .....	104
Tabla 6. Temperaturas superficiales iniciales recinto con techo de concreto e implementada una huerta vertical en una de sus paredes.....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes sistemas de paredes verticales .....	28
Figura 2. Pared verde tipo panel.....	28
Figura 3. Pared verde tipo fieltro.....	29
Figura 4. Pared verde tipo enrejado.....	29
Figura 5. Esquema de funcionamiento de un generador de agua atmosférica .....	34
Figura 6. Flujos de calor presentes en el análisis transitorio de calor.....	39
Figura 7. Flujos de calor considerados en el balance térmico de una edificación .	42
Figura 8. Flujos de calor sobre una pared .....	47
Figura 9. Flujos de calor en interior del recinto .....	52
Figura 10. Esquema de nodos para el techo .....	56
Figura 11. Formulación explícita de conducción transitoria en placa plana .....	56
Figura 12. Esquema de nodos para las paredes .....	59
Figura 13. Esquema de nodos del techo con placa de concreto.....	63
Figura 14. Esquema de nodos del techo con cubierta verde .....	65
Figura 15. Ubicación de las construcciones bajo estudio .....	68
Figura 16. Estado inicial de techos de los recintos .....	68
Figura 17. Adecuación de techo de concreto.....	69
Figura 18. Tepes de césped japonés.....	70
Figura 19. Adecuación de techo verde .....	70
Figura 20. Adecuación de paredes de eterboard.....	71
Figura 21. Carrete de termopares tipo k con sus conectores hembra y macho .....	71
Figura 22. Unidad de adquisición de datos Agilent 34972A.....	72
Figura 23. Sensor de radiación: piranómetro Davis 6450 .....	72
Figura 24. Estación meteorológica Vantage Vue y su respectiva consola receptora de datos .....	73
Figura 25. Cámara termográfica FLIR E4 .....	74

Figura 26. Esquema de maceta modular de la huerta vertical .....	76
Figura 27. Columnas modulares de la huerta vertical .....	76
Figura 28. Plántulas de lechuga.....	77
Figura 29. Adecuación de huerta vertical en fachadas .....	77
Figura 30. Canales y tanque depósito de agua .....	78
Figura 31. Tanque distribuidor de riego para la pared verde modular .....	78
Figura 32. Compresor de aire utilizado para el “Air Lift” EcoPlus 728360.....	79
Figura 33. Sistema generador de agua atmosférica AWG.....	81
Figura 34. Temperatura de condensación al final del evaporador .....	82
Figura 35. Diagrama de bloques para la programación del controlador .....	83
Figura 36. Caracterización de la humedad relativa del lugar entre las 12 y las 6 de la mañana .....	84
Figura 37. Programador de riego comercial.....	85
Figura 38. Sensor de humedad YL-69 .....	87
Figura 39. Esquema de adquisición de datos y control del sistema.....	87
Figura 40. Hardware final del controlador de riego y encendido del AWG.....	89
Figura 41. Selección de la hora de encendido del compresor en interfaz arduino.	89
Figura 42. Selección de la hora de encendido de la bomba de aire para Air lift ....	90
Figura 43. Compresor utilizado en el AWG: Embraco 3U50HLP .....	92
Figura 44. Inversor de corriente Cobra CPI 480 .....	92
Figura 45. Batería MTEK 121050 .....	93
Figura 46. Panel solar YINGLI 135 [W].....	94
Figura 47. Esquemático de instalación solar fotovoltaica .....	95
Figura 48. Huerta vertical en conjunto con sus subsistemas .....	96
Figura 49. Caracterización de velocidad del viento promedio vs tiempo .....	98
Figura 50. Caracterización de temperatura del aire exterior vs tiempo.....	99
Figura 51. Caracterización de humedad relativa del ambiente exterior vs tiempo .....	101

Figura 52. Imágenes de termografía exterior e interior del recinto con techo de concreto .....	103
Figura 53. Imágenes de termografía exterior e interior del recinto con techo verde y huerta vertical en una de sus paredes .....	103
Figura 54. Imágenes de termografía exterior e interior del recinto con techo de concreto y huerta vertical en una de sus paredes.....	104
Figura 55. Imágenes de termografía exterior e interior del recinto con techo verde .....	105
Figura 56. Temperatura del ambiente interior en los recintos estudiados durante la primera sesión de pruebas el día 18 de octubre de 2016 .....	107
Figura 57. Temperatura del aire interior del recinto con techo de concreto (medida y modelada) vs el tiempo de la primera sesión de pruebas el 18 de octubre de 2016 .....	107
Figura 58. Temperatura del aire interior del recinto con techo verde y huerta vertical (medida y modelada) vs el tiempo de la primera sesión de pruebas el 18 de octubre de 2016.....	108
Figura 59. Temperatura del ambiente interior en los recintos estudiados durante la segunda sesión de pruebas el 19 de octubre de 2016 .....	109
Figura 60. Temperatura del aire interior del recinto con techo de concreto y huerta vertical (medida y modelada) vs el tiempo de la segunda sesión de pruebas el 19 de octubre de 2016.....	110
Figura 61. Temperatura del aire interior del recinto con techo verde (medida y modelada) vs el tiempo de la segunda sesión de pruebas el 19 de octubre de 2016 .....	111
Figura 62. Tarifa de energía eléctrica regulada en Colombia para los estratos 1 al 6 en Colombia.....	116

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DEL 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\*

**AUTORES:** David Alejandro Archila Barón  
Julián Fernando Vega Delgado\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Pared verde, Modelo matemático, Carga térmica, Energía solar fotovoltaica, Deshumidificación, Generación de agua, Validación.

### DESCRIPCIÓN:

El estudio tiene como objetivo comprobar las ventajas térmicas que ofrece una huerta vertical de lechugas adaptada como una pared verde en recintos ubicados en zonas sin acceso a aguas de riego y no interconectadas al servicio de energía eléctrica. Para ello se adecuaron dos recintos de iguales dimensiones dentro de las instalaciones de la sede UIS Guatiguará, donde en uno de ellos se implementó un techo convencional de concreto y tejas, y el otro contaba con un techo verde. En este estudio se expone un modelo analítico que se valida con los datos experimentales. Dicho modelo parte de realizar balances de energía sobre las distintas configuraciones de techos, paredes y temperatura interior de cada uno de los recintos estudiados. Estos balances son llevados a un modelamiento de conducción transitoria para predecir el comportamiento de las temperaturas superficiales del recinto y de la temperatura del aire dentro de ellos, con el fin de predecir los distintos flujos de calor en ellos y su carga térmica. Las distintas edificaciones fueron equipadas con sensores para obtener datos experimentales de temperatura del aire en el interior de cada recinto durante las sesiones de prueba del modelo analítico que se implementó en una plataforma de Matlab®. En la experimentación se monitorearon otras variables requeridas por el modelo como la velocidad del viento, radiación solar, temperaturas de los ambientes interiores y superficiales. Los experimentos mostraron una reducción en el calor ganado desde el exterior hacia cada uno de los recintos, cuando se implementó la huerta vertical en ellos. Siendo una reducción del 35,4% para la configuración del techo verde y la pared verde respecto al calor sensible hallado en el recinto con techo de concreto, y una reducción del 34,3% para el techo de concreto y pared verde respecto al recinto con techo verde.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, Ingeniero Mecánico, PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF ENERGY SAVINGS OBTAINED FROM THE IMPLEMENTATION OF A DOMESTIC GARDEN ADAPTED AS A GREEN WALL WITHIN A BIOCLIMATIC CONSTRUCTION IN AREAS WITHOUT ACCESS TO IRRIGATION WATER AND NOT INTERCONNECTED\*

**AUTHORS:** David Alejandro Archila Barón  
Julián Fernando Vega Delgado\*\*

**KEYWORDS:** Green wall, Mathematical model, Thermal Load, Photovoltaic solar energy, Deshumidification, Water generation, Validation.

### DESCRIPTION:

The study aims to verify the thermal advantages offered by a vertical garden of lettuces adapted as a green wall in enclosures located in areas without access to irrigation water and not interconnected to the electric power service. To this end, two rooms of equal size were adapted within the facilities of the UIS Guatiguará headquarters, where one of them implemented a conventional roof of concrete and tiles, and the other had a green roof. In this study we present an analytical model that is validated with the experimental data. This model is based on energy balances on the different configurations of rooftops, walls and interior air temperature of each of the enclosures studied. These balances are taken to a transient conduction modeling to predict the behavior of the surface temperatures of the enclosure and of the temperature of the air inside them, in order to predict the different flows of heat in them and their thermal load. The different buildings were equipped with sensors to obtain experimental data of air temperature inside each room during the test sessions of the analytical model that was implemented in a Matlab® platform. In the experimentation other variables required by the model were monitored as the speed of the wind, solar radiation, temperatures of the interior and superficial environments. The experiments showed a reduction in the heat gained from the outside to each of the enclosures, when the vertical garden was implemented in them. Obtaining a reduction of 35.4% for the configuration of the green roof and the green wall compared to the sensible heat found in the enclosure with concrete roof, and a reduction of 34.3% for the concrete roof and green wall with respect to the enclosure with green roof.

---

\* Degree Project.

\*\* Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, Ingeniero Mecánico, PhD.

## INTRODUCCIÓN

El acceso a los alimentos es un derecho humano fundamental que permite una calidad de vida digna, aprovecharlos de la forma más eficiente es crucial para garantizar la supervivencia de las poblaciones vulnerables que se encuentran en zonas con periodos de sequía, y que consecuentemente se ven enfrentadas a hambrunas, problemas sanitarios, desnutrición infantil y una total destrucción de las escasas zonas de cultivo o pastoreo que puedan encontrarse.

La desertificación galopante que se presenta actualmente en una tercera parte de la superficie del planeta, potenciada por los efectos adversos del cambio climático deben poner en cuestionamiento nuestro compromiso con el medio ambiente y la preservación del ecosistema global para las futuras generaciones, es por ello que aprovechar los recursos energéticos e hídricos cada vez más limitados debe ser un objetivo fundamental en la forma como construimos nuestros hogares.

Actualmente el despilfarro y sobreconsumo de los recursos energéticos nos alejan de una realidad en donde la escasez de agua, energía eléctrica y alimentos se hacen cada vez más evidentes. Ante ello, las construcciones bioclimáticas se presentan como una solución a algunos de estos problemas, pues integrando diferentes tecnologías logran hacer una reducción considerable de la energía consumida.

Los techos y paredes verdes vienen siendo una alternativa cada vez más utilizada en los países desarrollados como una solución para reducir los gastos energéticos derivados de la calefacción y refrigeración gracias a su capacidad de aislamiento en climas fríos y enfriamiento en climas cálidos, junto con otras ventajas no menos importantes como son, el aislamiento acústico, la retención de agua lluvia, la posibilidad de cultivar alimentos y la estética que son factores que deben ser tenidos en cuenta a la hora de edificar con arquitectura sostenible.

Siendo actualmente este tipo de arquitectura una característica casi exclusiva de las personas con mayor poder adquisitivo, surge la necesidad de escalar los beneficios obtenidos de estas construcciones a las comunidades que necesitan urgentemente, obtener una mejora en su calidad de vida y un alivio en los problemas derivados de la variabilidad climática.

Por esto el objetivo de este proyecto es cuantificar las ventajas energéticas de los techos y paredes verdes realizando la medición de parámetros, modelización térmica del sistema y de esta forma hacer la validación del modelo para mostrar el comportamiento térmico de la pared verde en las condiciones especificadas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio del ahorro energético que se obtendría al implementar una huerta doméstica adaptada como una pared verde dentro de una construcción de arquitectura bioclimática ubicada en una zona sin acceso a agua de riego y no interconectada respecto a las paredes convencionales, cumpliendo con la misión y visión de la Universidad Industrial de Santander.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar y construir una pared verde modular de fácil instalación que integre los subsistemas de:

Riego: sistema automático de riego por goteo optimizado.

Obtención de agua: sistema de generación atmosférica de agua (AWG).

Sistema de energía: sistema fotovoltaico que supla las necesidades de la huerta.

Control: mediante un temporizador y una interfaz electrónica se activarán los sistemas de riego y de obtención de agua de acuerdo a los tiempos previamente programados

- Realizar una caracterización de las variables ambientales en la zona donde se va a implementar el prototipo, para establecer valores de velocidad, temperatura del viento y horas de luz solar al día.

- Realizar la modelación de la pared verde en conjunto con un techo verde y compararlo con una placa de concreto para calcular las pérdidas de calor en cada una y el ahorro energético que implicaría en gastos de refrigeración convencional.
- Validar el modelo matemático utilizado realizando una comparación entre los datos obtenidos directamente y la modelación realizada, teniendo en cuenta los errores y ajustes realizados.

## 2. ANTECEDENTES

Los siguientes son estudios térmicos realizados a los techos y paredes verdes, en muchos de ellos se proponen modelos físico-matemáticos para predecir el comportamiento térmico de los mismos. Además, se enuncia un proyecto antecedente en el que se detalla el diseño y construcción de generación de agua mediante el uso de energías renovables.

En Bucaramanga se realizó un análisis por Romualdo de Jesús Reyes Galvis y Julián Alberto Sánchez Aguirre en el año 2013 denominado ESTUDIO DE LAS VENTAJAS TÉRMICAS DE LOS TECHOS VERDES EN BUCARAMANGA en la que se construyeron tres modelos en madera de iguales dimensiones, pero con distintas configuraciones de techos, el modelo analítico se implementó en la plataforma de Matlab y se pudo comprobar que tanto la carga térmica como las temperaturas al interior son menores en construcciones donde se implementa un techo verde.

En Bucaramanga se realizó un análisis por Karen Alexandra Ruiz Bernal en el año 2015 denominado ANÁLISIS MULTIDIMENSIONAL DE LA INFLUENCIA DEL TECHO EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL INTERIOR DE RECINTOS, donde se estudió el uso de techos verdes en diseños de arquitectura bioclimática usando la técnica de dinámica de fluidos computacional, usando código numérico (OpenFOAM). Se calculó la carga térmica por convección usando la temperatura ambiente y el coeficiente térmico de convección del lugar considerando flujos de calor a través de paredes de un material de construcción estándar. Los resultados demostraron que la temperatura dentro de un recinto es menor usando techos verdes.

En un estudio realizado en la universidad de Columbia en la ciudad de Nueva York, denominado A TEMPERATURE AND SEASONAL ENERGY ANALYSIS OF GREEN, WHITE, AND BLACK ROOFS realizado por Stuart Gaffin, C. Rosenzweig, J. Eichenbaum-Pikser, R. Khanbilvardi y T. Susca en el año 2009, se evaluó el rendimiento térmico de un techo verde y un techo blanco de sistemas de viga pretensada de concreto y bovedilla (posee alta reflectividad). Se demostró que el desempeño de los techos blancos se ve seriamente afectado por la degradación de su albedo, además que los techos verdes tienen una mejor capacidad para reducir las fluctuaciones temporales de temperatura y para favorecer las condiciones de confort térmico hacia el interior del edificio en comparación con los techos blancos.

Otro estudio sobre los techos verdes fue presentado en un reporte de investigación realizado por Stuart Gaffin, Lily Parshall, Greg O'keeffe, Daniel Braman, David Beattie, y Robert Berghage en el año 2006, un capítulo del estudio se llamó ENERGY BALANCE MODELING APPLIED TO A COMPARISON OF WHITE AND GREEN ROOF COOLING EFFICIENCY, que provee un modelo de balance energético para ser aplicado a techos verdes y blancos (estándar). El método empleado consistió en la medición de temperaturas y variables ambientales con el fin de ejecutar la simulación y validación de modelos. Demostrando la reducción en las temperaturas que se puede lograr con vegetación en los techos.

Un estudio realizado en la universidad Humboldt de Berlín denominado ENERGY SAVING STRATEGIES THROUGH THE GREENING BUILDINGS realizado por Marco Schmidt en el año 2002, muestra que el consumo de energía destinado para la climatización y ventilación de edificios puede ser reducido usando técnicas de enfriamiento pasivas como la implementación de techos y paredes verdes en conjunto con un sistema de disposición de aguas lluvia; donde se determina que la pared verde absorbe un promedio anual del 81% de la radiación total incidente por evapotranspiración, la cual se cómo “la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

Se expresa en mm por unidad de tiempo”<sup>1</sup> ; en conjunto con la integración de sistemas de refrigeración adiabática.

En Bucaramanga se realizó el diseño y construcción de un prototipo de generación de agua atmosférica por Héctor Fernando Parrado Contreras y Juan Andrés Díaz Rivero en el año 2015 denominado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERACION ATMOSFÉRICA DE AGUA (AWG) ACCIONADO MEDIANTE ENERGIA EOLICA el cual proporciona las características, comportamiento y funcionamiento de cada uno de los componentes y requerimientos que presenta ese sistema, encaminado a dar solución a problemas de escasez de agua de una manera limpia y sostenible.

En la universidad de Maryland en Estados Unidos concebido como un reporte para el ayuntamiento de la ciudad de Clarksville se publicó un documento con el título de VEGETATED WALLS: THERMAL AND GROWTH PROPERTIES OF STRUCTURED GREEN FACADES, presentado por David Tilley, Jeff Prince, Serena Matt, y Brodie Marrow, donde se realiza un extenso estudio en el cual se caracterizan las propiedades térmicas de la vegetación en las paredes verdes además plantea un modelo utilizado en recintos con fachadas verdes, el cual fue utilizado en este proyecto.

En Bucaramanga se realizó la planificación y el diseño de múltiples soluciones bioclimáticas orientadas a "lograr un nivel significativo de sostenibilidad energética en el Edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander", en el trabajo de grado para optar por el título de Magister del ingeniero Germán Alfonso Osma Pinto denominado USO RACIONAL DE LA ENERGÍA A PARTIR DEL DISEÑO DE APLICACIONES SOSTENIBLES EN EL EDIFICIO ELÉCTRICA II DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. En dicho trabajo se encuentra

---

<sup>1</sup>Ecured, Evapotranspiración. [Artículo en línea]. Disponible en: <<https://www.ecured.cu/Evapotranspiraci%C3%B3n>>. [Citado el 10 de Julio de 2016].

estructurada la realización de ocho trabajos de pregrado relacionados con la generación limpia, iluminación LED, aplicaciones inmóviles en seguridad y ventilación e iluminación natural.

### **3. GENERALIDADES**

Actualmente la eficiencia energética es una de las principales metas de la arquitectura sostenible. La utilización de diversas técnicas para reducir las necesidades energéticas de edificios mediante el ahorro de energía y para aumentar su capacidad de capturar la energía del sol o de generar su propia energía. La edificación usando paredes verdes contribuye con la propagación de las buenas prácticas en la arquitectura bioclimática.

#### **3.1 ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA**

Se caracteriza por la forma de proyectar un edificio para aprovechar al máximo la energía del sol, vientos dominantes y características de los materiales. Es decir que una construcción bioclimática puede conseguir un gran ahorro e incluso a llegar a ser sostenible en su totalidad. También tiene impacto en la salubridad de los edificios a, través de un mejor confort térmico, el control de los niveles de CO<sub>2</sub> en los interiores, una mayor iluminación y la utilización de materiales de construcción no tóxicos avalados por declaraciones ambientales [1], aunque el costo de construcción puede ser mayor inicialmente, este puede amortizarse a largo plazo, al reducir considerablemente los costos de operación.

Existen varios métodos de diseño para hacer que una edificación interactúe con el medio circundante y lograr condiciones de autoabastecimiento, confort, térmico y lumínico, por ejemplo, la utilización de colectores solares de calefacción, la simple orientación de las casas para aprovechar al máximo la radiación solar, la creación de paredes con materiales aislantes naturales, estos ejemplos y otros más que contribuyan a la eficiencia energética de las edificaciones, son diseños bioclimáticos.

Dependiendo de la interacción del diseño de la edificación con el medio se puede clasificar el sistema como activo o pasivo. Cuando existen medios artificiales como por ejemplo bombas de calor o paneles solares se denomina un sistema activo y cuando el principio de captación, almacenamiento y distribución es capaz de funcionar sin aportaciones de energía exterior (sin equipos externos), se denomina sistema pasivo.

### **3.2 PAREDES VERDES**

Se definen como paredes verdes aquellas compuestas por plantas que crecen en un medio de cultivo o sustrato instalado en una estructura de sostenimiento en el costado de una edificación. Por lo cual, un arreglo de plantas situadas en disposición vertical entra en la categoría de pared verde. Las paredes verdes como plataforma de cultivo son muy prácticas para ciudades, en especial en áreas con poco espacio vertical.

En áreas áridas y con la selección de plantas adecuada, presenta ventajas térmicas que se manifiestan por medio de la evapotranspiración, es decir la pérdida de calor latente en el ambiente que combinada con una buena ventilación aumentan la sensación de confort térmico de los espacios rodeados de jardines verticales, tal como indica un artículo consultado de Radical nutrients<sup>2</sup>.

Las plantas pueden tener un efecto adicional conocido como fitorestauración, que es la filtración y retención de elementos tóxicos presentes en el suelo, el agua, o el aire, teniendo así un efecto purificador en los espacios tratados.

---

<sup>2</sup> Los greenwalls jardines verticales, muros verdes o paredes vegetales. [en línea]. 2016. Disponible en: <<http://www.radicalnutrients.com/2016/05/25/los-greenwalls-jardines-verticales-muros-verdes-paredes-vegetales>>. [Citado el 2 de Agosto de 2016]

Las paredes verdes son un sistema pasivo de enfriamiento, ya que el aire que circula sobre la vegetación de la pared entra en contacto con el gran contenido de humedad presente en las plantas, de modo que se evapora el agua produciendo una disminución de las temperaturas tanto del aire como de la pared. Estas paredes, según la tesis de Juan Navarro<sup>3</sup> actúan como aislantes térmicos, filtros solares y humidificadores del aire, brindando sombra y enfriamiento por evaporación.

### **3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS PAREDES VERDES**

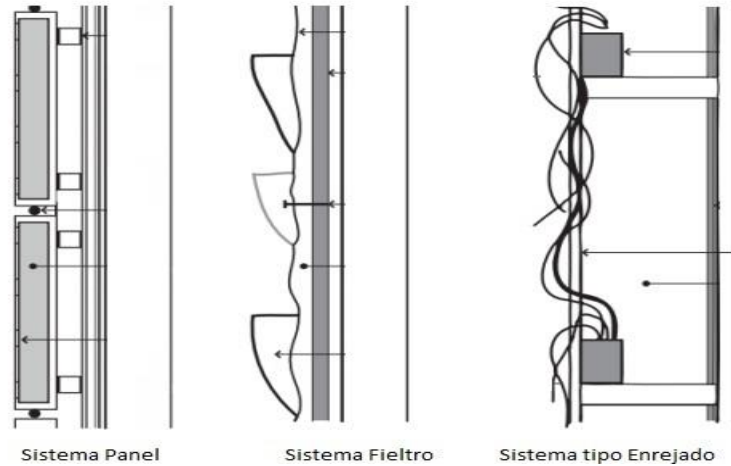
Esta arquitectura sustentable suele dividirse en fachadas verdes y paredes vivas. Las fachadas verdes se forman con plantas sembradas en la tierra que suben y se despliegan ayudadas por las raíces que se adhieren a las paredes para formar un manto, o soportadas por una estructura o pared vertical hecha con madera, cable, cuerda o metal. Generalmente son de una especie, siendo las plantas trepadoras las más comunes.

Las paredes vivas, en cambio, además de fachadas verdes pueden convertirse en verdaderos jardines verticales que ameritan los mismos cuidados y mantenimiento que los horizontales. Estos jardines se sostienen con la ayuda de paneles modulares o contenedores hechos generalmente de polipropileno con un sistema de riego incluido; aunque una clasificación más general está dada de acuerdo al tipo de instalación o sistema constructivo en tres sistemas [2] (Figura 1). Al no estar claramente limitados en peso, no se hace la distinción que se haría si fueran techos verdes (intensivas o extensivas).

---

<sup>3</sup> NAVARRO PORTILLA, Juan, Los jardines verticales en la edificación. Tesis de maestría en edificación. Valencia, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, 2013, 77 p.

Figura 1. Diferentes sistemas de paredes verticales



Fuente: CANALES GÁLVEZ, Michel Ignacio, Efectos del uso de techos y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de los edificios.2014, p.7.

- Tipo panel: conocida también como modular ecológica normalmente consta de paneles o unidades contenedoras del sustrato ligero confinado mediante gaviones, los cuales son recipientes de forma prismática rectangular, rellenos de material granular de distintos tamaños, recubiertos por lo general con rafias, (una fibra muy resistente y flexible obtenida de una palmera tropical). Previamente plantadas las especies vegetales que mejor se adapten y estos módulos se conectan a la estructura de la edificación y a un sistema de riego mecánico.

Figura 2. Pared verde tipo panel



Fuente: <http://gardenious.com/vertical-vegetable-gardening/>

- Tipo fieltro: conocida también como modular hidropónica donde las plantas son asentadas en bolsillos rellenos con el sustrato adecuado, anclados a una barrera impermeable que se conecta con la estructura. El sistema de riego puede ser variado según la altura de la edificación y las necesidades de la vegetación.

Figura 3. Pared verde tipo fieltro



Fuente: <http://gardenious.com/vertical-vegetable-gardening/>

- Tipo enrejado: las plantas crecen dentro de contenedores o maceteros, escalando por un enrejado. Pueden tener un sistema de riego mecanizado o manual. Son lo más parecido a lo que se puede entender como una persiana exterior vegetal.

Figura 4. Pared verde tipo enrejado



Fuente: <http://www.concienciaeco.com/2011/10/25/crea-un-jardin-vertical-con-botellas-de-pet/>

Durante el desarrollo de los jardines verticales se han llevado a cabo diversos estudios sobre los efectos que producen estos novedosos sistemas al integrarse en las edificaciones existentes o nuevas [3]. A continuación, se ha dispuesto una agrupación de los efectos más importantes resultantes de la integración de los mismos:

- Producción de oxígeno y absorción dióxido de carbono.
- Limpieza del aire al absorber y filtrar las partículas de suciedad.
- Regulación de la variación de humedad en el aire.
- Larga vida útil bajo una correcta ejecución.
- Surten efecto como aislamiento térmico y acústico.
- Protección de los intensos rayos solares del verano a las habitaciones edificadas con ellas.
- Absorción intrínseca del agua lluvia, por lo que alivian el sistema de alcantarillado.

Los beneficios anteriormente enunciados traen consigo beneficios económicos, aunque queda un amplio campo por investigar, más aun si se considera el potencial tan significativo de estos sistemas constructivos, por ende “Es importante ampliar su aplicación a la restauración, tanto de edificaciones como de espacios exteriores, y llevar a cabo estudios referidos al costo-beneficio de este tipo de soluciones”<sup>4</sup>. La aplicación de este proyecto de grado busca corroborar uno de ellos como es el caso de la cuantificación del ahorro energético de los costos asociados a la refrigeración en climas cálidos como el de Bucaramanga.

---

<sup>4</sup> NAVARRO PORTILLA, Juan, Los jardines verticales en la edificación. 2013, p.70.

### **3.4 UTILIZACIÓN DE LAS PAREDES Y TECHOS VERDES COMO PLATAFORMA DE CULTIVOS A PEQUEÑA ESCALA**

Desde el inicio del uso de las fachadas verdes y jardines colgantes en la arquitectura de la antigüedad y contemporánea se ha explorado la posibilidad de aprovechar estas plataformas de cultivo como medios de producción de alimentos a pequeña y mediana escala, esto con la idea de complementar el acceso a otros productos agrícolas diferentes a los de un cultivo tradicional o masivo.

La aparición de métodos alternativos de cultivo como la hidroponía y sus derivados, surgen a mediados de los años 70 como una forma de estudiar detalladamente las sustancias nutritivas que tenían efecto en el crecimiento de las plantas comestibles. Estas investigaciones fueron motivadas por la carrera espacial, y pronto fue creado un movimiento alrededor de estas alternativas de cultivo, que, adoptadas por entusiastas y profesionales por igual, tienen hoy aplicaciones industriales en cultivos como la lechuga, el tomate, la cebolla y diferentes tipos de hortalizas.

En el año de 2010 surge el que quizás ha sido el movimiento más representativo relacionado con huertas caseras y cultivos verticales, liderado por Britta Riley una artista y entusiasta de la tecnología de Nueva York que creó en este año una comunidad online conocida como Windows Farms, que buscaba la divulgación colaborativa de métodos de cultivo hidropónicos en interiores.

Motivada por la dificultad de acceder a alimentos orgánicos frescos, y los altos precios de los mismos en las grandes ciudades del hemisferio norte, surgió la idea de utilizar materiales reciclados como botellas plásticas y contenedores de agua usados para crear una plataforma de cultivo, que pudiese ser altamente replicada con materiales que se consiguen fácilmente en cualquier ferretería.

Con esta idea original y con la filosofía de mantener todo el conocimiento adquirido en código abierto la comunidad llegó a tener más de 46000 integrantes activos en

su página web y más de 1800 colaboradores alrededor del mundo, desarrollando 3 versiones de su huerta vertical y adquiriendo una gran cantidad de experiencia colectiva relacionada con los cultivos en interiores [4].

La comunidad llega a su fin cuando su fundadora decide iniciar una campaña comercial en la plataforma de Start-Ups Kickstarter con el mismo nombre de la comunidad online (Windows Farms), que a pesar de lograr recaudar más de \$US 250000 pierde su viabilidad como compañía al tener graves fallos en la fabricación y en la logística de envío de los módulos de huerta vertical que se pretendieron comercializar.

El auge de las redes sociales en años recientes, y el crecimiento exponencial del acceso a la información en general han facilitado la divulgación de nuevas ideas con respecto a los cultivos a pequeña escala y el uso de alternativas de cultivo no tradicionales. Esto ha llevado a la acuñación del término huertas urbanas para definir todo lo correspondiente al auto sustento por medio de cultivos propios tecnificados en el hogar, sin la necesidad de recurrir a grandes extensiones de tierra o grandes cantidades de agua.

Adoptado por comunidades y personas de todas las profesiones alrededor del mundo, esta es una comunidad que sigue creciendo y se vislumbra como una verdadera alternativa a solucionar los problemas de seguridad alimentaria en el planeta y a reducir considerablemente las emisiones de dióxido de carbono al eliminar la carga energética del transporte de alimentos del campo a las ciudades.

### **3.5 SISTEMAS GENERADORES DE AGUA ATMOSFÉRICA**

En décadas recientes y gracias a los avances concernientes a sistemas de acondicionamiento de aire y refrigeración, se han desarrollado proyectos cada vez más exitosos que utilizan el fenómeno de la condensación de la humedad

atmosférica, como una alternativa para solucionar el problema de falta de suministro de agua.

Los sistemas generadores de agua atmosférica “se encargan de cambiar el estado de las moléculas del agua que contiene el aire del ambiente, las moléculas inicialmente están en estado de vapor y el subsistema, mediante un sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor cambia el estado de estas a líquido”<sup>5</sup>.

Dicho fenómeno se produce cuando la temperatura de una superficie es inferior a la temperatura de punto de rocío del ambiente. Este proceso ocurre cuando existe una diferencia mayor a 2 [°C] entre la temperatura de rocío y la superficie fría (con aire en reposo).

Por lo general este fenómeno se da en invierno, aunque es factible de aprovechar este proceso en cualquier estación en casi todos los lugares al saber que el aire contiene cantidades variables agua, en forma de vapor, a esto se le conoce como humedad atmosférica (concentración de vapor de agua en el aire).

El elemento del sistema térmico que se encarga de este cambio de fase de las moléculas debe llevar el aire a una temperatura inferior a la de punto de rocío del lugar y proveer una superficie sobre la cual el vapor de agua se condense. Esto es logrado mediante el uso de sistemas de refrigeración que pueden ser de tipo termoeléctrico (placas de Peltier) o por compresión de vapor.

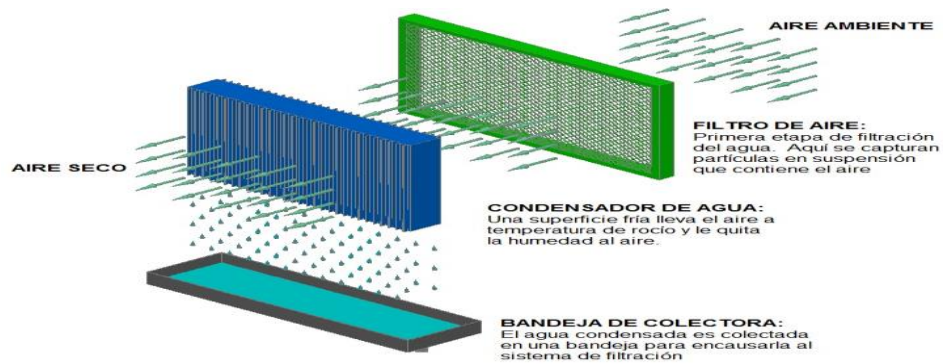
Dicho elemento en un sistema de compresión de vapor es el evaporador, allí la temperatura en la superficie de los tubos del evaporador se encuentra por debajo de la temperatura de rocío del estado actual del aire, garantizando la extracción de la energía del aire y el cambio de fase de las moléculas de agua [5].

---

<sup>5</sup> PARRADO CONTRERAS, Héctor; DÍAZ RIVERO, Juan. Diseño y construcción de un prototipo de generación atmosférica de agua (AWG) accionado mediante energía eólica. 2015, p.70.

Al evaporador también se le denomina como unidad manejadora, pues de su diseño dependerá la cantidad de aire que pueda acondicionar y de las condiciones de flujo que deben ser tenidas en cuenta para los cálculos detallados de la cantidad de agua condensada que, en teoría, deberían obtenerse en un tiempo determinado de funcionamiento.

Figura 5. Esquema de funcionamiento de un generador de agua atmosférica



Fuente: Generadores de agua QUIAN.

## 4. TRANSFERENCIA DE CALOR

Con el propósito de mejorar el entendimiento de los modelos fisicomatemáticos usados en el estudio de sistemas térmicos es necesario tener una noción de los conceptos básicos de transferencia de calor.

La transferencia de calor es la ciencia que estudia la naturaleza y la rapidez en la que un sistema pasa de un estado de equilibrio térmico a otro, entendiéndose dicha transferencia de energía como calor. La transferencia de calor se produce siempre que existe un gradiente térmico o cuando dos sistemas con diferentes temperaturas se ponen en contacto. El proceso persiste hasta alcanzar el equilibrio térmico, es decir, hasta que se igualan las temperaturas. Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos o regiones lo suficientemente próximas, la transferencia de calor no puede ser detenida, solo puede hacerse más lenta

### 4.1 CONDUCCIÓN

Este es un proceso donde el contacto directo entre dos o más cuerpos sin intercambio de materia, y con una diferencia de temperaturas entre sí, se produce una transferencia de calor: se transmite calor. El medio de transferencia puede ser sólido, como también puede presentarse en líquidos y gases (cuando no se encuentra en movimiento). La propiedad física de los materiales que determina su capacidad para conducir el calor es la conductividad térmica que depende de su estructura microscópica: en un fluido se debe principalmente a colisiones aleatorias de las moléculas; en un sólido depende del intercambio de electrones libres (principalmente en metales) o de los modos de vibración de sus partículas microscópicas (dominante en los materiales no metálicos). [6]

El flujo de calor por conducción se cuantifica para estado estacionario en una sola dirección en el sistema de coordenadas cartesianas, por medio de la ley de Fourier donde se establece que el flujo de calor es proporcional al área perpendicular al flujo de calor, el tipo de material, a la diferencia de temperatura, y es inversamente proporcional al espesor; enunciada en la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -KA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Siendo K la constante de conductividad térmica del material, A es el área de la superficie perpendicular al flujo de calor y  $dT/dx$  la variación de la temperatura respecto al espesor del material.

## 4.2 CONVECCIÓN

Es un proceso de transferencia de calor que se produce entre una superficie sólida y un fluido (líquido o gas) debido al movimiento de este. Cuanto más rápido es el movimiento del fluido, mayor será la transferencia de calor, y en ausencia de movimiento la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. [6]

Existen dos tipos de convección, la convección natural y la convección forzada. En el caso de la convección natural el movimiento del fluido se debe a los cambios de temperatura que provocan una variación en la densidad del mismo permitiendo, en el caso de los gases, que el fluido más caliente ascienda por la reducción de su densidad y que de la misma forma el fluido al enfriarse aumente su densidad y descienda debido a este incremento.

Cuando el movimiento del fluido se da por medio de elementos externos como bombas, ventiladores o incluso quemadores, estos presentan un aporte de velocidad al fluido y existe convección forzada, la cual puede ser externa cuando el

fluido está en contacto con placas o la superficie externa de cualquier elemento, e interna cuando el flujo se da a través de tuberías o ductos. [6]

La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se puede expresar por la ley de enfriamiento de Newton de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

En donde  $A_s$  es el área de la superficie del cuerpo en contacto con el fluido,  $h$  representa el coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $T_s$  es la temperatura superficial del cuerpo, y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido.

### 4.3 RADIACIÓN

La radiación es un mecanismo de transferencia de calor que a diferencia de la conducción y la convección no requiere la presencia de un medio interventor para realizar el paso de energía, ya que el intercambio de energía se da por medio de ondas electromagnéticas y fotones entre dos superficies diferentes.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. La emisividad es la propiedad de un material que relaciona la habilidad de un objeto para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si este fuera un cuerpo negro (objeto ideal que absorbe toda la luz y energía radiante que incide sobre él). El valor de la emisividad ( $\epsilon$ ) se encuentra en el rango de 0 a 1.

Según la ley de Stefan-Boltzmann para los cuerpos negros se tiene que la radiación emitida por las superficies reales se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{\text{máx}} = \varepsilon\sigma A_s \cdot T_s^4 \quad (3)$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es  $5,67 \times 10^{-8} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right]$ ,  $A_s$  es el área de la superficie emisora y  $T_s$  es la temperatura de la superficie emisora.

En general, la determinación de la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies es un asunto complicado, ya que depende de las propiedades de las superficies, de la orientación de una con respecto a la otra y de la interacción del medio que existe entre ellas con la radiación.

Cuando una superficie de emisividad  $\varepsilon$  y área superficial  $A_s$ , a una temperatura termodinámica,  $T_s$ , está por completo encerrada por una superficie mucho más grande (o negra), a una temperatura termodinámica,  $T_{\text{alred}}$ , y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se encuentra determinado por la expresión:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma A_s \cdot (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4) \quad (4)$$

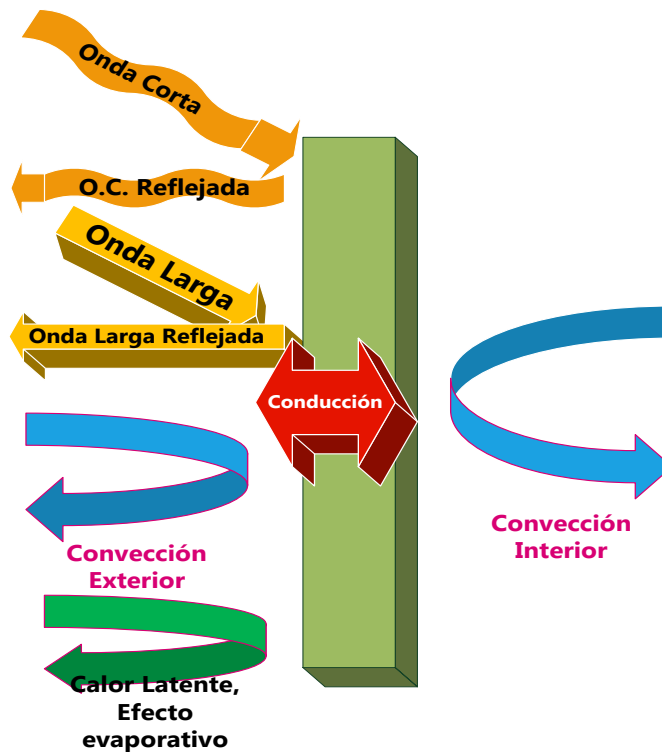
#### 4.4 ANÁLISIS TRANSITORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR COMBINADO

Un análisis de transferencia de calor puede realizarse según el objetivo del mismo de forma estable o transitoria, en un proceso estable la variación de la temperatura en un volumen de control es función solo de la posición y no del tiempo, sin embargo, esta limitación temporal impide hacer una caracterización realista de la mayoría de los procesos que ocurren en las situaciones de análisis. Para superar esta limitación se recurre a los métodos transitorios de análisis que pueden ser analíticos, experimentales y numéricos.

En el análisis y modelamiento térmico de habitáculos se deben tener en cuenta múltiples flujos de calor simultáneamente, que de igual manera combinan todas las formas de transferencia de calor, conducción a través de las paredes del habitáculo, la radiación solar, tanto directa como del ambiente, la convección interna y externa y adicionalmente en el caso de los techos y paredes verdes se debe tener en cuenta un factor de transferencia de calor latente debida a la evaporación de la humedad presente en las plantas[8].

Dada la complejidad del análisis térmico es necesario el uso de los métodos numéricos para su resolución teniendo en cuenta múltiples condiciones de frontera, más específicamente el uso de las diferencias finitas de temperatura en el análisis de la conducción dentro de las paredes, adicionando las condiciones de frontera antes mencionadas.

Figura 6. Flujos de calor presentes en el análisis transitorio de calor



**4.4.1 Métodos numéricos aplicados al análisis de transferencia de calor combinado.** El análisis de la transferencia de calor determina la rapidez de flujo del mismo y la distribución de temperaturas en los elementos bajo estudio. Su análisis se utiliza para determinar el flujo de calor durante los procesos de fabricación de distintos elementos constructivos, la pérdida de calor en los edificios, predecir el comportamiento de los materiales cuando se exponen al fuego y modelar el rendimiento de la calefacción y los sistemas de enfriamiento. Los problemas de transferencia de calor pueden resolverse utilizando métodos gráficos, analíticos y numéricos. Los métodos numéricos transforman el análisis de la transferencia de calor de un sistema en una serie de ecuaciones algebraicas que se resuelven simultáneamente [7].

Los métodos numéricos requieren de un pequeño conjunto de condiciones límites iniciales para determinar la transferencia de calor en el sistema. Los métodos numéricos incluyen el análisis de elementos finitos, el método de diferencias finitas, el elemento de impedancia límite y el método de la ecuación integral. El método de diferencias finitas divide el modelo de transferencia de calor en áreas con las mismas diferencias entre ellas, y es utilizado para calcular las temperaturas en distintos puntos de un volumen llamados nodos. La solución numérica es válida para cualquier instante, ya que en régimen transitorio, “las temperaturas cambian con el tiempo así como con la posición, y de este modo la solución de este tipo de problemas requiere la diferenciación en el tiempo y el espacio”<sup>6</sup>. La formulación en diferencias finitas de los diferentes métodos de transferencias de calor, son regidos bajo el método del balance de la energía a los datos de entrada en el límite de cada elemento perteneciente a un volumen de control.

---

<sup>6</sup> CENGEL, YUNUS A. Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, cuarta edición. México, DF 2011. P.322-324

## 5. MODELAMIENTO TÉRMICO DE HABITÁCULOS

La modelización del comportamiento térmico de cerramientos consiste en definir un sistema de ecuaciones algebraicas que permitan conocer la temperatura en puntos concretos (nodos) en función del tiempo. En este capítulo se profundiza en los modelos matemáticos que describen el comportamiento térmico de un recinto. Realizando balances energéticos de los distintos tipos de techos y paredes a analizar en conjunto al balance térmico para el ambiente interior (aire). Mediante la aplicación del método de diferencias finitas para la predicción de las temperaturas requeridas.

### 5.1 BALANCE TÉRMICO DE RECINTOS EN EDIFICACIONES VERDES Y NO VERDES

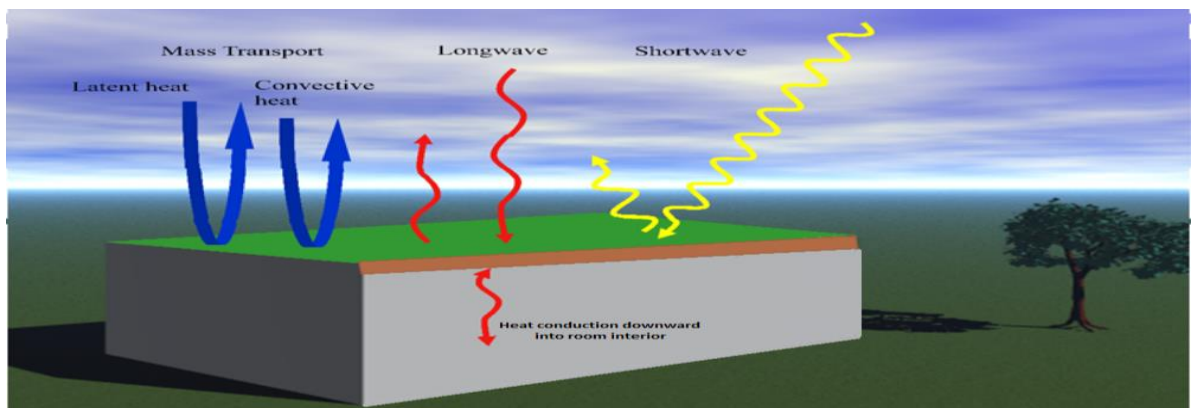
Las condiciones térmicas de una edificación están relacionadas con la magnitud de las pérdidas y ganancias de calor que está teniendo en un momento dado. Un recinto tenderá a calentarse cuando las ganancias de calor sean mayores que las pérdidas, y a enfriarse en la situación contraria.

$$E_{entra} - E_{sale} + E_{generada} = \frac{dE}{dt} = m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

Utilizando el método del balance térmico donde se calculan las pérdidas y ganancias de un cerramiento o edificación, se presenta el siguiente modelo matemático que relaciona los distintos flujos de calor que interactúan en el estudio térmico de las edificaciones de estudio. A continuación, se detalla el respectivo análisis para cada una de las variantes de construcción verde y no verde, en techos y paredes.

**5.1.1 Balance térmico para los techos.** A continuación, se detalla de forma simplificada los distintos flujos de calor que intervienen en el caso de estudio y la ecuación producto de la aplicación del método del balance térmico, aplicable a los techos verdes como a los no verdes. El siguiente modelo matemático ha sido ampliamente usado y en particular aplicado en el reporte de investigación “techos verdes en la región metropolitana de Nueva York” [8], al cual se le aplicaron modificaciones pertinentes al caso de estudio.

Figura 7. Flujos de calor considerados en el balance térmico de una edificación



Fuente: GAFFIN, et all. A temperature and seasonal energy analysis of green, white, and black roofs. 2009, p.6.

De la figura anterior se señalan los siete flujos de energía que se pueden identificar y que son necesarios para realizar el balance energético en un techo sin importar si es o no techo verde.

- Calor de convección ( $Q_{conv}$ ): representa el flujo de calor por intercambio de calor sensible entre la superficie exterior del techo y la atmósfera por variaciones de la temperatura seca del ambiente al que se aplica.
- Calor latente ( $Q_{latent}$ ): representa el flujo de calor por intercambio de calor entre la superficie exterior del techo y la atmósfera debido a variaciones del contenido de humedad (vapor de agua) presente en el ambiente.

- Calor de conducción ( $Q_{cond}$ ): representa el flujo de calor interno que es transmitido a través del techo debido a la diferencia de temperaturas interior y exterior del mismo.
- Radiación de onda corta ( $SW_{down}$ ): representa el flujo de calor debido a la energía solar total que incide sobre el techo. Esta es la suma de la radiación directa (aquella que no se dispersa por los componentes atmosféricos) y la radiación difusa (la radiación incidente que sufre cambios tanto de dirección como de longitud de onda debido a su recorrido por la atmósfera).
- Radiación de onda corta reflejada ( $SW_{up}$ ): representa el flujo de calor debido a la energía solar total que es reflejada hacia la atmósfera por el techo. La radiación de onda corta equivale a la radiación de onda corta multiplicada por la reflectividad del techo. Además, la energía solar total absorbida por el techo equivale a la diferencia entre radiación de onda corta y la radiación de onda larga.
- Radiación de onda larga ( $LW_{down}$ ): representa el flujo de calor por la radiación que es absorbida por el techo. Esta radiación contiene una menor cantidad de energía que la radiación de onda corta.
- Radiación de onda larga emitida por la superficie ( $LW_{up}$ ): representa el flujo de calor de la energía térmica de onda larga que es emitida desde la superficie del techo

$$[SW_{down}-SW_{up}+LW_{down}-LW_{up}-Q_{cond}-Q_{conv}-Q_{latent}].A=m.C_{roof}.\frac{d}{dt}\left[\frac{T_{roof}-T_{ceil}}{2}\right] \quad (6)$$

En donde:

$$Shortwave_{down} = Directa + Difusa$$

$$Q_{convection} = h.(T_{roof}-T_{air})$$

$$h=Shortwave_{up} = \rho.Shortwave_{down}$$

$$Q_{latent} = \begin{cases} 0 \\ \frac{Q_{convection}}{\beta} \end{cases}$$

$$\text{Longwave}_{\text{down}} = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_{\text{air}}^4$$

$$\text{Longwave}_{\text{up}} = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_{\text{roof}}^4$$

$$Q_{\text{conduction}} = k * \frac{(T_{\text{roof}} - T_{\text{ceiling}})}{\Delta_x}$$

r: Reflectividad del techo.

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann.

$T_{\text{air}}$ : Temperatura del aire externo.

k: Conductividad térmica del techo.

$T_{\text{roof}}$ : Temperatura superficial exterior del techo.

$\beta$ : Relación de Bowen.

$T_{\text{ceiling}}$ : Temperatura de superficie interior del techo.

$\Delta_x$ : Espesor del techo.

$\varepsilon_s$ : Emisividad del techo.

$C_{\text{roof}}$ : Calor específico del techo.

h: Coeficiente de convección.

A: Área del techo.

m: Masa del techo.

La ecuación 6 constituye un balance energético en estado transitorio que representa la situación descrita en la figura 7, donde los términos del lado izquierdo de la igualdad representan los flujos de calor que entran y salen del techo de la edificación, y los términos del lado derecho de la igualdad representan la variación con la que cambia el calor acumulado en el techo respecto al tiempo.

**5.1.1.1 Cuantificación del calor latente en los techos bajo estudio.** El término de la ecuación 6 que diverge en el análisis según el tipo de techo es el flujo de calor latente, ya que este se encuentra asociado a la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización).

Esto indica que, en los techos con cubiertas verdes, el flujo de calor latente es estimable, y en cambio para techos normales, sin cubierta verde, este término es cero. Sin embargo, el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente no pueden medirse por separado.

El flujo de calor sensible es el calor que calienta el aire en los alrededores considerados ( $Q_{convection}$ ) y el flujo de calor latente es la energía que se emplea exclusivamente para producir evaporación. El cociente entre ambos flujos ( $Q_{sensible}/Q_{latente}$ ) se conoce como: relación de Bowen.

$$\beta = \frac{Q_{convection}}{Q_{latente}} \quad (7)$$

Un artículo<sup>7</sup> sobre el coeficiente de Bowen ha determinado que para zonas semi áridas, su valor ronda a 5 y para zonas con pastizales su valor ronda el valor de 0.5. Como se implementó césped a un techo se seleccionó un valor de Bowen de 0.9 debido a la humedad del lugar.

La caracterización del coeficiente de Bowen es de suma importancia para el desarrollo de cualquier estudio que involucre la disipación o el intercambio de calor latente por medio de la evapotranspiración, ya que la selección de un valor determinado afecta significativamente los resultados. Sin embargo, la medición de la cantidad de humedad perdida o ganada por un arreglo de plantas como un techo verde o un jardín vertical puede resultar bastante compleja y requiere de un estudio mucho más detallado.

---

<sup>7</sup> Bowen ratio. [En línea]. 2012. Disponible en: <[http://glossary.ametsoc.org/wiki/Bowen\\_ratio](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Bowen_ratio)>. Citado el 2 de Agosto de 2016.

**5.1.1.2 Determinación del coeficiente de convección externo (h).** En el estudio realizado por Gaffin<sup>8</sup> es determinada una correlación que cuantifica el coeficiente de convección externo para el uso en recintos por convección forzada, para techos y paredes, en función de la velocidad del viento (u) y la longitud característica de la superficie (L) como se muestra en la ecuación 8. Esta ecuación está determinada para valores de  $u > 1,75$  [m/s]. Sin embargo, cuando es menor a este valor se adiciona 0.01 para compensar los momentos en que no hay flujo de aire.

$$h = 5.01(L)^{0.2} \cdot u^{0.8} + 0.01 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot k} \right] \quad (8)$$

La longitud característica de una la placa, para techos y paredes está dada por la siguiente expresión:

$$L = \frac{A}{P} \quad (9)$$

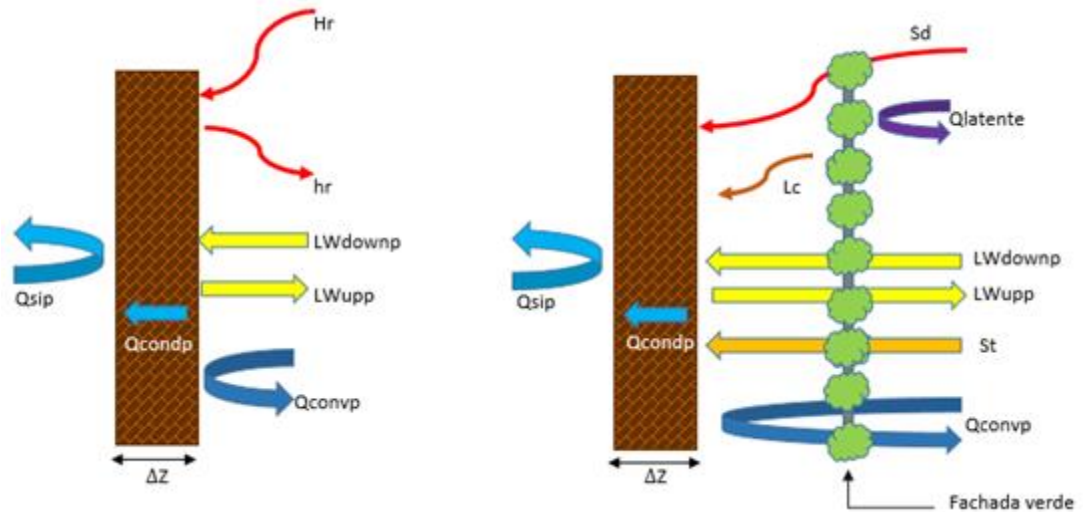
Donde A es el área de la placa y P es el perímetro de la misma.

**5.1.2 Balance térmico para las paredes.** El balance de las paredes inscrito en el modelo matemático hace parte del conjunto que abarca el modelo global de las construcciones a modelar. Este balance térmico es desarrollado de forma similar al abarcado para los techos, teniendo en cuenta algunas consideraciones. A continuación, se muestra el esquema de los flujos de calor que actúan sobre una pared con y sin vegetación en ella.

---

<sup>8</sup> GAFFIN, Stuart; ROSENZWEIG, Cynthia; PARSHALL, Lily; BEATTIE, David; BERGHAGE, Robert; O'KEEFEE, Greg; BRAMAN, Dan. Techos verdes en la región metropolitana de Nueva York. Reporte de investigación. Universidad de Columbia, 2006.

Figura 8. Flujos de calor sobre una pared



En la figura de la izquierda se realiza el balance de energía de la pared sin cubierta verde, mientras en la figura derecha se realiza el balance de paredes con vegetación cubriéndola, en ambos casos con los respectivos flujos de energía que interactúan en el balance energético.

El procedimiento<sup>9</sup> para calcular la radiación solar incidente en superficies inclinadas fue tomado del autor Duffie [9], en el cual para caracterizar la radiación solar sobre una superficie, se establecen los parámetros necesarios para ello tales como: declinación, ángulo horario, latitud, altura solar, azimut solar, azimut de pared y por ultimo las correlaciones existentes entre la radiación directa y difusa sobre superficies como techos y paredes.

$H_R$  se calcula haciendo un ajuste a la radiación total tomada por los instrumentos de medida debido a factores propios del ambiente, como la reflectividad del suelo [ $\rho_r$ ] el ángulo de inclinación de la superficie [ $\beta$ ], y seguidamente el ángulo de incidencia sobre la superficie [ $\theta$ ], ya que estos factores afectan la radiación real que llega a

<sup>9</sup> DUFFIE, John A, y BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes, 2nd edition. New York: Willey, 1980. p 9-97.

una superficie o placa inclinada. La general que caracteriza la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada está dada por:

$$H_R = (H - H_d) * R_b + H_d * R_d + H * \rho_r * R_r \quad (10)$$

Los diferentes términos usados en la ecuación anterior, se definen como:

- H: Es la radiación solar de onda corta total (directa+difusa) que incide sobre el recinto, que en el balance térmico para los techos se ha definido como SWdown.
- H<sub>d</sub>: Es la radiación solar de onda corta difusa que incide sobre la construcción.
- H<sub>R</sub>: Es la radiación solar de onda corta que incide sobre las paredes.
- h<sub>r</sub>: Es la radiación solar de onda corta que es reflejada por las paredes, esta equivale al producto de la reflectividad de la pared ( $\rho_p$ ) con H<sub>R</sub>.

Además, se sabe que las radiaciones incidente y reflejada sobre las paredes son menores que la radiación solar total incidente y reflejada sobre el techo. En cada uno de los tres términos de la ecuación anterior se puede apreciar la radiación difusa, la radiación directa y la total respectivamente afectada cada una por los coeficientes  $R_d$ ,  $R_r$  y  $R_b$  que determinan su variación según las características antes mencionadas de inclinación de la superficie y ángulo de incidencia sobre la superficie inclinada. Estos coeficientes están definidos por las correlaciones<sup>10</sup> expuestas por Duffie en función de: los ángulos de elevación solar, zenit, azimut solar y azimut de pared.

• **Balance de energía para paredes sin vegetación.**

$$[H_R - h_r + LW_{downp} - LW_{upp} - Q_{sip} - Q_{convp} - Q_{condp}] \cdot A_P = m \cdot C_{pared} \cdot \frac{d}{dt} \left[ \frac{T_{Pe} - T_{Pi}}{2} \right] \quad (11)$$

---

<sup>10</sup> DUFFIE, John A, y BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes, 2nd edition. New York: Willey, 1980. P 91-92.

Para distinguir los diferentes términos utilizados, se emplea el subíndice p, refiriendo que se trata para el estudio de paredes.

$$H_R = (H - H_d) \cdot R_b + H_d \cdot R_d + H \cdot \rho_r \cdot R_r$$

$$LW_{upp} = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{pe}^4$$

$$h_r = \varepsilon_p \cdot H_R$$

$$LW_{downp} = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{air}^4$$

$$Q_{convp} = h \cdot (T_{pe} - T_{air})$$

$$Q_{condp} = K_p \cdot \frac{(T_{pe} - T_{pi})}{\Delta Z}$$

En donde:

$\rho_p$ : Reflectividad de pared

$T_{air}$ : Temperatura del aire externo.

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann.

$T_{pe}$ : Temperatura exterior de pared.

$\varepsilon_p$ : Emisividad de pared.

$T_{pi}$ : Temperatura interior de pared.

$\rho_r$ : Reflectividad del piso.

$K_p$ : Conductividad térmica de pared.

H: Radiación total.

$H_R$ : Irradiación efectiva sobre pared.

$H_d$ : Radiación difusa.

h: coeficiente de convección externo

$A_p$ : Área de la pared.

$C_{pared}$ : Calor específico de pared.

$m_p$ : Masa de la pared.

.

- **Balance de energía para paredes con vegetación.**

Para este balance se introducen flujos de energía como se muestran en la parte derecha de la figura 8. Estos son descritos en el estudio propuesto por Tilley [10], en el cual los flujos de calor que inciden en paredes verdes son un porcentaje del que incide sobre una pared ordinaria, con el fin de obtener la mejor aproximación de la radiación de onda larga y corta que incide en el recinto, como el efecto que proveería la vegetación en términos de disipación de calor.

Aunque los flujos de calor que inciden en una fachada verde expuestos en el reporte de investigación de Tilley, están bien representados esquemáticamente, se encontraron inconsistencias en la formulación de algunas ecuaciones. Por lo que en el presente trabajo se exponen las correlaciones que si cumplen con el análisis experimental. Además el término de calor latente de la pared verde equivale a la

razón entre la suma de calores sensibles y la relación de Bowen, que para esta fachada, el coeficiente de Bowen<sup>11</sup> equivale a 0.45 por tratarse de un cultivo similar a zonas con pastizales.

$$[S_d + S_t + LW_{\text{downp}} + LC - LW_{\text{upp}} - Q_{\text{convp}} - Q_{\text{latente}} - Q_{\text{Cond}}] \cdot A_p = m \cdot C_p \cdot \text{ared} \cdot \frac{d}{dt} \left[ \frac{T_{pe} - T_{pi}}{2} \right] \quad (12)$$

Los diferentes términos<sup>12</sup> usados en la ecuación anterior, fueron obtenidos del balance energético realizado en el reporte de investigación de David Tilley sobre fachadas verdes, y se definen como:

$$\begin{aligned} S_d &= (1-P) \cdot (\epsilon_p \cdot HR) & LW_{\text{downp}} &= (1-P) \cdot \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{\text{air}}^4 \\ S_t &= P \cdot (\epsilon_c \cdot HR) \cdot (1 - \epsilon_p) & LW_{\text{upp}} &= \epsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{pe}^4 \\ Q_{\text{convp}} &= h \cdot (T_{pe} - T_{\text{air}}) & LC &= P \cdot \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{\text{canopy}}^4 \\ Q_{\text{latente}} &= \frac{Q_{\text{convp}}}{\beta} & Q_{\text{condp}} &= K_p \cdot \frac{(T_{pe} - T_{pi})}{\Delta Z} \end{aligned}$$

En donde:

- S<sub>d</sub>: es el flujo de calor asociado a la radiación de onda corta (directa+difusa) recibida en la porción no cubierta por vegetación de la pared del recinto.
- S<sub>t</sub>: es el flujo de calor asociado a la radiación de onda corta que es transmitida a través de la vegetación.
- LW<sub>downp</sub>: es la radiación de onda larga recibida desde el cielo a la pared del recinto.
- LW<sub>upp</sub>: es la radiación de onda larga emitida desde la pared del recinto.
- Lc: es la radiación de onda larga emitida desde la vegetación hacia el muro del recinto.

<sup>11</sup> Bowen ratio. [En línea]. 2012. Disponible en: <[http://glossary.ametsoc.org/wiki/Bowen\\_ratio](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Bowen_ratio)>. Citado el 2 de Agosto de 2016.

<sup>12</sup> TILLEY, David; PRICE, Jeff; MATT, Serena; MARROW, Brodie. Muros vegetales: propiedades térmicas y de crecimiento de las estructuras con fachadas verdes. Reporte de investigación, Universidad de Maryland, College park, 2012.P.38-43

- $Q_{\text{Conv}p}$ : es el calor sensible por convección entre la pared del recinto y el aire ambiente exterior.
- $Q_{\text{cond}}$ : es el flujo de calor por conducción a través de la pared del recinto.
- $Q_{\text{latent}p}$ : es el flujo de energía en forma de calor relacionado al proceso de evapotranspiración desde la superficie del medio de cultivo y la transpiración de la vegetación.
- $P$ : representa la proporción de cubrimiento vegetal que equivale a la superficie de pared dividida entre la superficie total de hojas.

$r_p$ : Reflectividad de pared

$r_c$ : Reflectividad de pared verde.

$P$ : Proporción de cubrimiento vegetal.

$\varepsilon_p$ : Emisividad de pared.

$\varepsilon_c$ : Emisividad de pared verde.

$\rho_r$ : Reflectividad del piso.

$H_R$ : Radiación de pared

$m_p$ : Masa de la pared.

$A_p$ : Área de la pared.

$T_{\text{air}}$ : Temperatura del aire externo.

$T_{pe}$ : Temperatura exterior de pared.

$T_{pi}$ : Temperatura interior de pared.

$T_{\text{canopy}}$ : Temperatura punta de hojas.

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann.

$K_p$ : Conductividad térmica de pared.

$C_{\text{Pared}}$ : Calor específico de pared.

$h$ : coeficiente de convección externo.

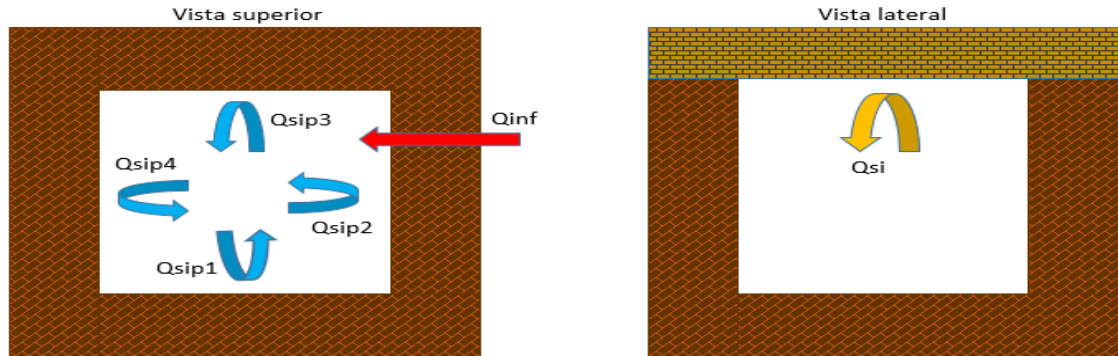
$LAI$ : índice de área de follaje

**5.1.3 Balance térmico para el ambiente interior.** Para culminar el modelo matemático general de los recintos de estudio, se realiza el balance energético en estado transitorio para el aire interior del recinto. Se requiere el calor convectivo interno desde cada pared y el techo despreciando el intercambio de calor por radiación y se introduce el termino  $Q_{\text{inf}}$  para cuantificar el calor perdido por infiltraciones de aire al recinto.

El calor convectivo interno desde las paredes es denominado  $Q_{\text{sip}}$  con subíndices de 1 al 4 que indica desde cual pared es transmitido. Asimismo, el calor convectivo

interno desde el techo es llamado  $Q_{si}$ . En la ecuación 13 se ha representado el balance energético propuesto en la siguiente figura.

Figura 9. Flujos de calor en interior del recinto



$$Q_{si} + Q_{sip1} + Q_{sip2} + Q_{sip3} + Q_{sip4} + Q_{inf} = (\rho_{air} \cdot V_{air}) \cdot C_{air} \cdot \frac{d}{dt} [T_{airi}] \quad (13)$$

Las ecuaciones para los flujos de calor sensible y el obtenido por infiltraciones son:

$$Q_{sip1} = h_{ip1} \cdot A_p \cdot (T_{p1i} - T_{airi})$$

$$Q_{sip2} = h_{ip2} \cdot A_p \cdot (T_{p2i} - T_{airi})$$

$$Q_{sip3} = h_{ip3} \cdot A_p \cdot (T_{p3i} - T_{airi})$$

$$Q_{sip4} = h_{ip4} \cdot A_p \cdot (T_{p4i} - T_{airi})$$

$$Q_{si} = h_{iT} \cdot A_t \cdot (T_{ceil} - T_{airi})$$

$$Q_{inf} = \rho_{air} \cdot C_{air} \cdot V_{inf} \cdot (T_{air} - T_{airi}) / 3600$$

El volumen de infiltración del aire se calculó según la metodología propuesta en el manual de HVAC de Kreider<sup>13</sup>, por lo cual se tiene que:

$$V_{inf} = A_{leak} \cdot \sqrt{a_s \cdot \Delta_T + a_w \cdot u^2} \quad (14)$$

Donde las variables que intervienen en las anteriores ecuaciones se definen como:

$T_{airi}$ : Temperatura de aire interno.

$T_{pi}$ : Temperatura interior de pared.

$T_{ceil}$ : Temperatura de interior del techo.

$T_{air}$ : Temperatura del aire externo.

<sup>13</sup> KREIDER, Jan. Handbook of Heating, Ventilation, and Air Conditioning, New York. 2001. p.410

$C_{air}$ : Calor específico del aire a presión constante.  
 $V_{air}$ : Volumen de aire en el recinto.  
 $A_P$ : Área de la pared [m<sup>2</sup>].  
 $h_{pi}$ : Coeficiente de convección interno de las paredes.  
 $A_{leak}$ : Área efectiva de fugas [cm<sup>2</sup>].  
 $a_s$ : Coeficiente de stack  $\left[ \frac{\left(\frac{L}{s}\right)^2}{cm^4 * K} \right]$ .  
 $V_{inf}$ : Volumen infiltraciones de aire [L/s].

$\Delta_T$ : Diferencia de temperaturas del interior y exterior [K].  
 $u$ : velocidad del viento [m/s].  
 $A_t$ : Área del techo.  
 $h_{iT}$ : Coeficiente de convección interno del techo.  
 $\rho_{air}$ : Densidad del aire.  
 $a_w$ : Coeficiente de viento  $\left[ \frac{\left(\frac{L}{s}\right)^2}{cm^4 * \left(\frac{m}{s}\right)^2} \right]$ .

**5.1.3.1 Determinación del coeficiente de convección interno.** En un recinto cerrado el intercambio de calor de las paredes al aire se da por convección natural. Para la determinación del coeficiente de convección dentro de los recintos de estudio se emplea la metodología expuesta en el libro de Cengel [6] para las paredes que pueden ser consideradas superficies planas ubicadas de forma vertical. En convección se emplean los siguientes números adimensionales que proveen directrices secuenciales para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección.

- Número de Nusselt:

Representa la relación que existe entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si solo existiese conducción. Está en función del coeficiente de convección  $h_i$ , la conductividad térmica del aire  $k$  y la longitud característica del cuerpo sometido a convección, todo esto como indica la siguiente ecuación:

$$Nu = \frac{h_i \cdot L}{k} \quad (15)$$

- Números de Prandtl y Grashof:

El número de Nusselt se determina gracias a estos dos números adimensionales donde, Prandtl representa la relación entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento sobre la difusividad molecular del calor, y Grashof representa la relación que existe entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas que actúan sobre un fluido. Estos se calculan por medio de las ecuaciones 16 y 17 respectivamente.

$$Pr = \frac{v \cdot C_v}{k} \quad (16)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \cos(\Lambda) \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) L^3}{v^2} \quad (17)$$

Donde se tiene que:

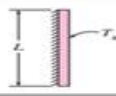
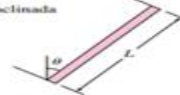


hi: Coeficiente de convección [w/m <sup>2</sup> k]	g: Constante de gravedad [m/s <sup>2</sup> ]
v: Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]	T <sub>s</sub> : Temperatura de superficie [k]
T <sub>∞</sub> : Temperatura del aire [k]	K: Conductividad del aire [W/m.k]
L: Longitud característica [m]	C <sub>v</sub> : Calor específico del aire [J/kg.k]
β: Coef. de expansión volumétrica [1/k]	Λ: inclinación del techo [°]

El producto entre el número de Prandtl y Grashof se denomina como número de Rayleigh. Con este se puede establecer el número de Nusselt mediante correlaciones para convección natural sobre superficies planas ubicadas de manera horizontal, vertical e inclinada.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (18)$$

Para las paredes se usaron correlaciones de placas planas verticales y para los techos correlaciones de placa plana inclinada, como se muestra a continuación.

Tabla 1. Correlaciones empíricas del número de Nusselt para convección natural sobre superficies planas

Configuración geométrica	Longitud característica $L_c$	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	$L$	$10^4 - 10^9$ $10^{10} - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = 0.59Ra^{1/4}$ $Nu = 0.1Ra^{1/3}$ $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{1/4}]^{1/2}} \right\}^2$ (compleja pero más exacta)
Placa inclinada 	$L$		Utilícense las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente Reemplácese $g$ por $g \cos \theta$ para $0 < \theta < 60^\circ$
Placa horizontal (Área superficial $A$ y perímetro $p$ ) a) Superficie superior de una placa caliente (o superficie inferior de una placa fría)  b) Superficie inferior de una placa caliente (o superficie superior de una placa fría) 	$A_s/p$	$10^4 - 10^7$ $10^7 - 10^{11}$  $10^8 - 10^{11}$	$Nu = 0.54Ra^{1/4}$ $Nu = 0.15Ra^{1/3}$  $Nu = 0.27Ra^{1/4}$

Fuente: CENGEL, YUNUS A. Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones, cuarta edición. México, DF 2011. p. 528

## 5.2 MODELAMIENTO DE CONDUCCIÓN TRANSITORIA EN RECINTOS

Para analizar los recintos de estudio se definen las ecuaciones que describen el comportamiento térmico del cerramiento, utilizando el método de diferencias finitas para predecir las temperaturas del aire al interior del recinto ( $T_{air}$ ) y de las superficies como techos y paredes ( $T_{ceil}$ ,  $T_{pi}$ ) en el intervalo de tiempo determinado ( $\Delta t$ ).

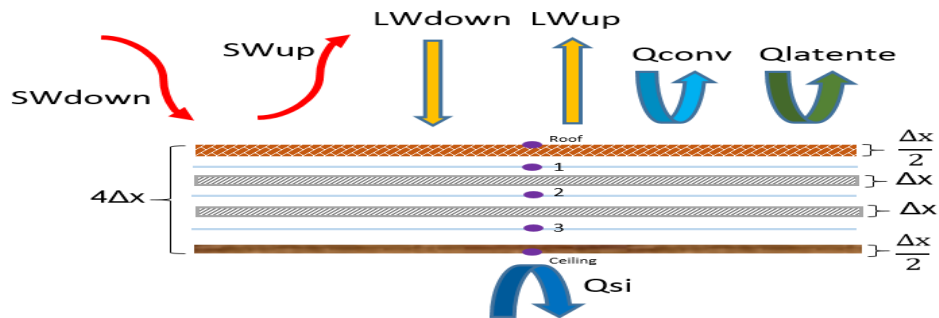
$$Q_{entra} - Q_{sale} = \frac{dE}{dt} = m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = (\rho \cdot V) \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = (\rho \cdot dx \cdot A) \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (19)$$

Para el techo se subdivide en secciones de espesor  $\Delta x$  donde el inicio y final de sección se denota por nodos (frontera e internos) a los cuales se aplican balances térmicos que permiten la predicción de las temperaturas.

Los flujos de calor que se muestran han sido descritos en la sección 5.1.1 tal como se muestra en la figura 10, con la que los flujos de calor en los nodos interiores son

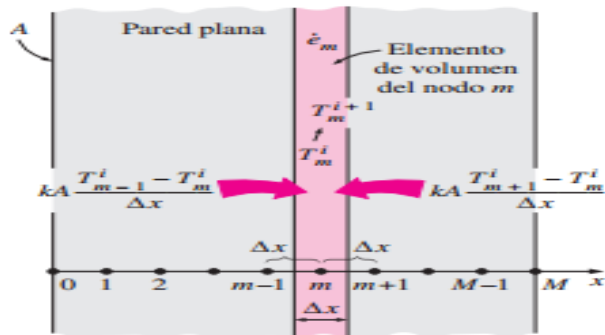
dados por la formulación de diferencias finitas de conducción de calor en régimen transitorio para nodos interiores.

Figura 10. Esquema de nodos para el techo



La formulación en diferencias finitas es realizada por el método explícito explicado en Cengel [6] como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Formulación explícita de conducción transitoria en placa plana



Fuente: CENGEL, YUNUS A. Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, cuarta edición, 2011, p.324.

El modelamiento para obtener la ecuación que servirá para predecir su temperatura en determinado tiempo futuro comienza con el balance realizado a cada nodo, los nodos superficiales (Roof y ceiling) poseen la mitad del espesor que los nodos internos ( $\Delta x/2$ ). Como se puede observar, las ecuaciones 20 a la 24 tienen un término con el superíndice ( $i+1$ ), al despejar este término en cada ecuación y conociendo todos los términos del lado izquierdo se pueden predecir las temperaturas requeridas.

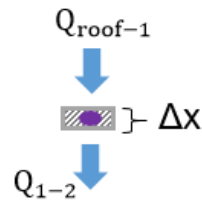
- Balance para nodo de frontera: Roof



$$SW_{down} - SW_{up} + LW_{down} - LW_{up} - Q_{conv} - Q_{latente} - Q_{roof-1} = \text{Croof} \cdot \rho \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{T_{roof}^{i+1} - T_{roof}^i}{\Delta t} \quad (20)$$

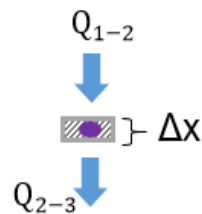
$Q_{roof-1}$ ,  $Q_{1-2}$ ,  $Q_{2-3}$ ,  $Q_{3-4}$  y  $Q_{4-ceil}$  Son calores de conducción a través del techo que se identifican al realizar balances energéticos en cada nodo perteneciente al modelo de estudio. Los siguientes son el resultado de la aplicación de la formulación explícita de conducción transitoria en los nodos restantes.

- Balance para nodo interior 1.



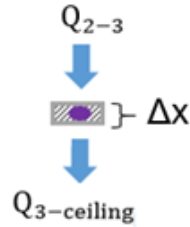
$$Q_{roof-1} - Q_{1-2} = \text{Croof} \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot \frac{T_1^{i+1} - T_1^i}{\Delta t} \quad (21)$$

- Balance para nodo interior 2.



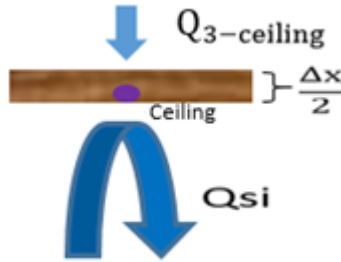
$$Q_{1-2} - Q_{2-3} = \text{Croof} \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot \frac{T_2^{i+1} - T_2^i}{\Delta t} \quad (22)$$

- Balance para nodo interior 3.



$$Q_{2-3} - Q_{3-ceiling} = \text{Croof} \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot \frac{T_3^{i+1} - T_3^i}{\Delta t} \quad (23)$$

- Balance para nodo de frontera: Ceiling.

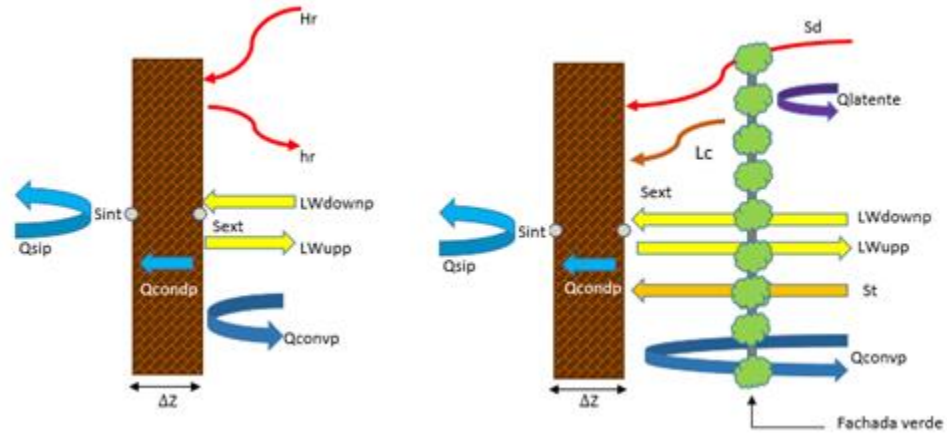


$$Q_{3-ceiling} - Q_{si} = \text{Croof} \cdot \rho \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{T_{ceiling}^{i+1} - T_{ceiling}^i}{\Delta t} \quad (24)$$

Ahora se realizan los balances de energía que requiere el método de diferencias finitas para las paredes del cerramiento, al igual que en el análisis del techo, las paredes se dividen en secciones  $\Delta z$ , resultando dos nodos para analizar (sin importar la configuración de pared a analizar) que representan la temperatura en la superficie.

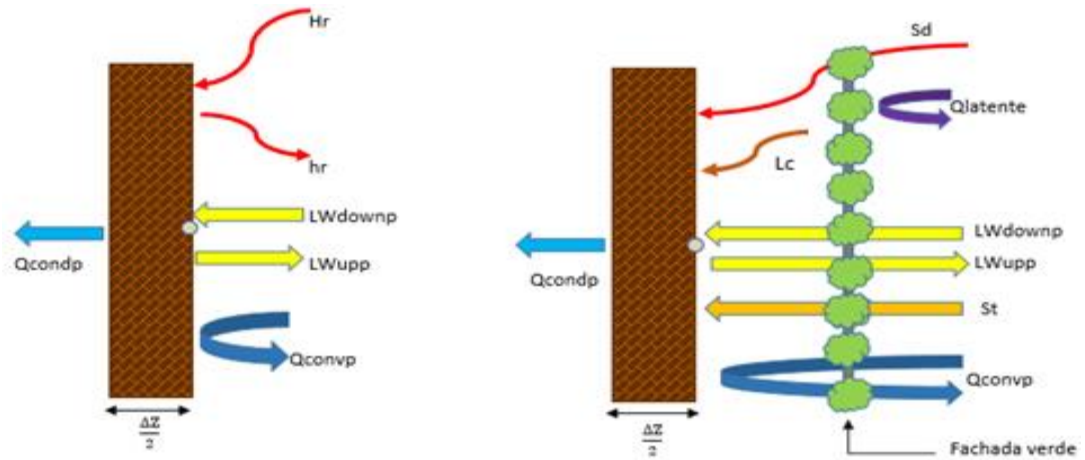
A los elementos de volumen de cada nodo superficial ( $S_{ext}$  y  $S_{int}$ ), se aplica un balance de energía por conducción en régimen transitorio para los dos tipos de paredes y con ello se podrá determinar las temperaturas futuras de las superficies interior y exterior de las paredes. A continuación, se presenta los balances para paredes con y sin vegetación en ella:

Figura 12. Esquema de nodos para las paredes



Se realiza el balance para la superficie exterior de la pared ( $S_{ext}$ ) con y sin vegetación en ella y se obtienen las ecuaciones con las que se determinará las temperaturas futuras de dichas superficies.

- Balance para nodo de frontera:  $S_{ext}$ . en paredes ordinarias y verdes.



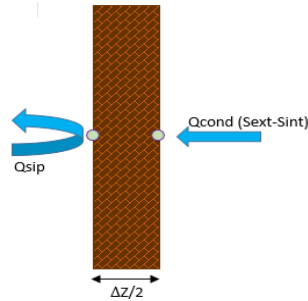
Para una pared ordinaria se tiene que:

$$LW_{downp} - LW_{upp} + Hr - hr - Q_{convp} - Q(S_{ext} - S_{int}) = C_p \cdot \rho_p \cdot \frac{\Delta z}{2} \cdot \frac{T_{Sext}^{i+1} - T_{Sext}^i}{\Delta t} \quad (25)$$

Mientras que para una pared verde se tiene:

$$[S_d + St + LW_{downp} + Lc - LW_{upp} - Q_{convp} - Q_{latente} - Q_{Cond}] = C_p \cdot \rho_p \cdot \frac{\Delta z}{2} \cdot \frac{T_{Sext}^{i+1} - T_{Sext}^i}{\Delta t} \quad (26)$$

- Balance para nodo de frontera:  $S_{int}$ . en paredes ordinarias y verdes.



Para paredes verdes y no verdes se tiene que el balance de energía para el nodo de la superficie interior está dado por la expresión:

$$Q_{condp} - Q_{sip} = C_P \cdot \rho_p \cdot \frac{\Delta z}{2} \cdot \frac{T_{S_{int}}^{i+1} - T_{S_{int}}^i}{\Delta t} \quad (27)$$

Por último, para terminar la formulación de diferencias finitas de conducción de calor en el recinto (véase en la sección 5.1.3), se realiza ahora el balance energético del aire interno en los habitáculos y se obtiene:

$$Q_{si} + Q_{sip1} + Q_{sip2} + Q_{sip3} + Q_{sip4} + Q_{inf} = \rho_{air} \cdot V_{air} \cdot C_{air} \cdot \frac{T_{airi}^{i+1} - T_{airi}^i}{\Delta t} \quad (28)$$

### 5.3 APLICACIÓN DE LOS MODELOS A CADA RECINTO

Se procede a especificar las propiedades físicas de cada recinto según sus materiales de construcción Como se puede apreciar en el anexo A. El estudio se centra en cuatro tipos de recinto en los cuales se ejecuta la modelización térmica en función de los parámetros de los mismos, tales como:

- Recinto con paredes de eterboard y placa de concreto y tejas de barro como techo.
- Recinto con paredes de eterboard y techo verde.
- Recinto con una fachada verde, paredes de eterboard y techo de concreto.
- Recinto con una fachada verde, paredes de eterboard y techo verde.

**5.3.1 Paredes de eterboard.** Los del eterboard se exponen en los anexos, los cuales son:

$$K_p = 0.4 \text{ [W/m}^2\text{k]}$$

$$C_P = 1.512 \text{ [kJ/kg.k]}$$

$$\rho_p = 1250 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_r = 0.14 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$r_p = 0.95$$

$$\varepsilon_p = 0.97$$

$$L = \Delta x = 0.006 \text{ [m]}$$

Los flujos de calor que intervienen en el balance de energía de la pared (figura 12), proveen las pautas para determinar las temperaturas futuras en el interior y exterior de la pared. Para esto es necesario de las ecuaciones 25 y 26 los términos con el superíndice (i+1). También se plantean las ecuaciones definidas en la sección 5.1.2 en función del tiempo para realizar el análisis de conducción transitoria:

- Nodo de superficie exterior ( $S_{ext}$ ).

$$T_{S_{ext}(i+1)} = \left( \left( \frac{LW_{downp} - LW_{upp} + H_R - h_r - Q_{convp} - Q_{condp}}{C_P \cdot \rho_p \cdot \frac{\Delta x}{2}} \right) \cdot \Delta t \right) + T_{S_{ext}(i)} \quad (29)$$

- Nodo de superficie interior ( $S_{int}$ ).

$$T_{S_{int}(i+1)} = (Q_{condp(i)} - Q_{sip(i)}) \cdot \left( \frac{\Delta t}{C_P \cdot \rho_p \cdot \frac{\Delta z}{2}} \right) + T_{S_{int}(i)} \quad (30)$$

$$LW_{downp(i)} = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{air(i)}^4$$

$$LW_{upp(i)} = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{S_{ext}(i)}^4$$

$$Q_{condp(i)} = K_p \cdot \frac{T_{S_{ext}(i)} - T_{S_{int}(i)}}{\Delta z}$$

$$Q_{convp(i)} = h^* (T_{S_{ext}(i)} - T_{air(i)})$$

$$Q_{sip(i)} = h_i \cdot (T_{S_{int}(i)} - T_{air(i)})$$

**5.3.2 Pared verde.** Se realizó un huerto en una pared vertical por lo cual se debe tener en cuenta los flujos de calor descritos en la sección 5.1.2 donde predomina el efecto donde la evapotranspiración de las plantas, y la proporción de energía que estas dejan pasar a la pared del recinto. Se plantean las ecuaciones definidas en la sección 5.1.2 en función del tiempo para realizar el análisis de conducción transitoria, los datos necesarios en el análisis de la pared verde se presentan a continuación:

$$\begin{array}{lll}
 K_p = 0.4 \text{ [W/m}^2\text{k]} & C_p = 1.512 \text{ [kJ/kg.k]} & \rho_p = 1250 \text{ [kg/m}^3\text{]} \\
 L = 0.006 \text{ [m]} & \rho_r = 0.14 & P = 90\% \\
 r_p = 0.95 & \varepsilon_p = 0.97 & \varepsilon_c = 0.8 \\
 r_c = 0.2 & \beta_p = 0.45 & T_{\text{canopy}} = 25 \text{ [}^\circ\text{C]} \\
 LAI = 0.323 \left[ \frac{m^2 - \text{Hojas}}{m^2 - \text{Pared}} \right] & & 
 \end{array}$$

- Nodo de superficie exterior ( $S_{\text{ext}}$ ).

$$T_{S_{\text{ext}}(i+1)} = \left( \left( \frac{S_d + S_t + LW_{\text{downp}} + L_c - LW_{\text{upp}} - Q_{\text{convp}} - Q_{\text{latente}} - Q_{\text{cond}}}{C_p \cdot \rho_p \cdot \frac{\Delta x}{2}} \right) \cdot \Delta t \right) + T_{S_{\text{ext}}(i)} \quad (31)$$

- Nodo de superficie interior ( $S_{\text{int}}$ ): es la misma relación vista en la ecuación 30.

$$\begin{array}{ll}
 LW_{\text{downp}}(i) = (1-P) \cdot \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{\text{air}(i)}^4 & LW_{\text{upp}}(i) = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{S_{\text{ext}}(i)}^4 \\
 Q_{\text{latente}}(i) = \frac{Q_{\text{convp}}(i)}{\beta_p} & Q_{\text{condp}}(i) = K_p \cdot \frac{T_{S_{\text{ext}}(i)} - T_{S_{\text{int}}(i)}}{\Delta z} \\
 Q_{\text{sip}}(i) = h_i \cdot (T_{S_{\text{int}}(i)} - T_{\text{air}(i)}) & L_c(i) = P \cdot \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{\text{canopy}}^4 \\
 S_d(i) = (1-P) \cdot (r_p \cdot H_R(i)) & S_t(i) = P \cdot (r_c \cdot H_R(i)) \cdot (1 - r_p)
 \end{array}$$

**5.3.3 Techo con placa de concreto.** Las parametrizaciones de los techos se encuentran en función de la composición de los nodos, es decir los espesores y materiales de estos. Para el techo con composición de concreto además se implementó la colocación de tejas de barro, ya que estas son un elemento común en la construcción de recintos. A cada nodo se le realiza un balance energético con el fin de realizar el análisis de conducción transitoria, los datos necesarios en el análisis de la pared verde se presentan a continuación:

$$K_{\text{concreto}} = 0.8 \text{ [W/m}^2\text{k]}$$

$$C_{P\text{concreto}} = 0.830 \text{ [kJ/kg.k]}$$

$$\rho_{\text{concreto}} = 1650 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$L = 4 \Delta x = 0.1 \text{ [m]}$$

$$\epsilon_{\text{concreto}} = 0.3$$

$$\epsilon_{\text{concreto}} = 0.93$$

$$SW_{\text{down}}(i) = \text{Radiación Directa} + \text{Difusa}$$

$$SW_{\text{up}}(i) = \epsilon_{\text{concreto}} \cdot SW_{\text{down}}(i)$$

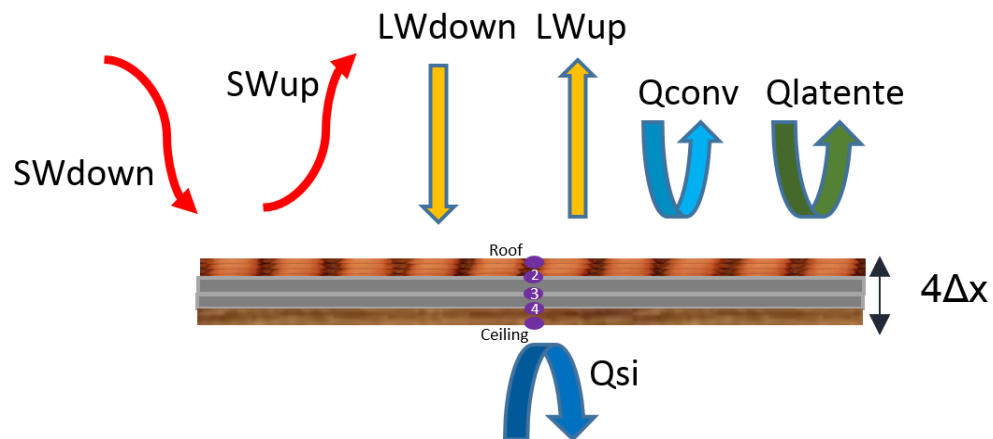
$$LW_{\text{down}}(i) = \epsilon_{\text{concreto}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{air}(i)}^4$$

$$LW_{\text{up}} = \epsilon_{\text{concreto}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{roof}(i)}^4$$

$$Q_{\text{convection}}(i) = h \cdot (T_{\text{roof}}(i) - T_{\text{air}}(i))$$

$$Q_{\text{si}}(i) = h \cdot (T_{\text{ceiling}}(i) - T_{\text{air}}(i))$$

Figura 13. Esquema de nodos del techo con placa de concreto



### Nodo Roof

$$T_{\text{roof}(i+1)} = \left( \frac{S_{\text{wd}(i)} - S_{\text{wup}(i)} + L_{\text{wd}(i)} - L_{\text{wup}(i)} - Q_{\text{cond}(i)} - Q_{\text{conv}(i)} - Q_{\text{latente}(i)}}{CP_{\text{conc.}\rho} \cdot \frac{\Delta x}{2}} \right) \Delta t + T_{\text{roof}(i)} \quad (32)$$

### Nodo 1

$$T1(i+1) = \left( k_{\text{concreto}} \cdot \Delta t \cdot \frac{(T_{\text{roof}(i)} - T1(i)) - (T1(i) - T2(i))}{CP_{\text{conc.}\rho} \cdot \Delta x^2} \right) + T1(i) \quad (33)$$

### Nodo 2

$$T2(i+1) = \left( k_{\text{concreto}} \cdot \Delta t \cdot \frac{(T1(i) - T2(i)) - (T2(i) - T3(i))}{CP_{\text{conc.}\rho} \cdot \Delta x} \right) + T2(i) \quad (34)$$

### Nodo 3

$$T3(i+1) = \left( k_{\text{concreto}} \cdot \Delta t \cdot \frac{(T2(i) - T3(i)) - (T3(i) - T4(i))}{CP_{\text{conc.}\rho} \cdot \Delta x} \right) + T2(i) \quad (35)$$

### Nodo 4

$$T4(i+1) = \left( k_{\text{concreto}} \cdot \Delta t \cdot \frac{(T3(i) - T4(i)) - (T4(i) - T5(i))}{CP_{\text{conc.}\rho} \cdot \Delta x} \right) + T4(i) \quad (36)$$

### Nodo Ceiling

$$T_{\text{cei}(i+1)} = \left( \left( \left( \frac{k_c}{\Delta x} \right) * (T4(i) - T_{\text{cei}(i)}) - Q_{\text{si}(i)} \right) \cdot \left( \frac{\Delta t}{CP_{\text{conc.}\rho} \cdot \Delta x} \right) \right) + T_{\text{cei}(i)} \quad (37)$$

**5.3.4 Techo con cubierta verde.** De igual forma que en el techo anterior se realiza un balance energético en cada nodo, con el fin de realizar el análisis de conducción transitoria. Los datos necesarios en el análisis de la pared verde se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} K_{\text{TV}} &= 0.122 \text{ [W/m}^2\text{k]} & C_{\text{PTV}} &= 0.920 \text{ [kJ/kg.k]} & \varepsilon_{\text{TV}} &= 0.96 \\ \rho_{\text{Tverde}} &= 1800 \text{ [kg/m}^3\text{]} & \beta &= 0.85 & \Gamma_{\text{TV}} &= 0.2 \\ L &= 5 \text{ } \Delta x = 0.1 \text{ [m]} \end{aligned}$$

Donde se relacionan con las ecuaciones:

$$SW_{down}(i) = \text{Radiación Directa} + \text{Difusa} \quad SW_{up}(i) = \tau_{TV} \cdot SW_{down}(i)$$

$$LW_{down}(i) = \varepsilon_{TV} \cdot \sigma \cdot T_{air(i)}^4 \quad LW_{up} = \varepsilon_{TV} \cdot \sigma \cdot T_{roof(i)}^4$$

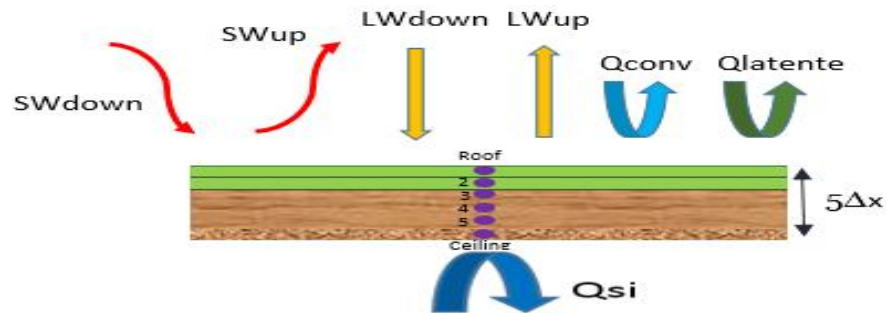
$$Q_{convection}(i) = h \cdot (T_{roof(i)} - T_{air(i)}) \quad Q_{si}(i) = h \cdot (T_{ceiling(i)} - T_{air(i)})$$

$$Q_{latente}(i) = \frac{Q_{convection}(i)}{\beta} \quad L = 5 \Delta x = 0.02 \text{ [m]}$$

$$Q_{condTV}(i) = K_{TV} \cdot \frac{T_{Sext(i)} - T_{Sint(i)}}{\Delta x}$$

Para el techo verde se presenta la distribución de nodos propuestos en la siguiente figura:

Figura 14. Esquema de nodos del techo con cubierta verde



### Nodo Roof

$$T_{roof(i+1)} = \frac{SW_{d(i)} - SW_{up(i)} + LW_{d(i)} - LW_{up(i)} - Q_{cond(i)} - Q_{conv(i)} - Q_{latente(i)}}{C_{PTV} \cdot \rho_{Tverde} \cdot \frac{\Delta x}{2}} \cdot \Delta t + T_{roof(i)} \quad (38)$$

### Nodo 2

$$T_{2(i+1)} = \left( k_{TV} \cdot \Delta t \cdot \frac{(T_{roof(i)} - T_{2(i)}) - (T_{2(i)} - T_{3(i)})}{C_{PTV} \cdot \rho_{Tverde} \cdot \Delta x^2} \right) + T_{2(i)} \quad (39)$$

### Nodo 3

$$T_{3(i+1)} = \left( k_{TV} \cdot \Delta t \cdot \frac{(T_{2(i)} - T_{3(i)}) - (T_{3(i)} - T_{4(i)})}{C_{PTV} \cdot \rho_{Tverde} \cdot \Delta x^2} \right) + T_{3(i)} \quad (40)$$

#### Nodo 4

$$T4(i + 1) = \left( k_{TV} \cdot \Delta t \cdot \frac{(T3(i) - T4(i)) - (T4(i) - T5(i))}{C_{PTV} \cdot \rho_{Tverde} \cdot \Delta x^2} \right) + T4(i) \quad (41)$$

#### Nodo 5

$$T5(i + 1) = \left( k_{TV} \cdot \Delta t \cdot \frac{(T4(i) - T5(i)) - (T5(i) - T_{ceil}(i))}{C_{PTV} \cdot \rho_{Tverde} \cdot \Delta x^2} \right) + T5(i) \quad (42)$$

#### Nodo Ceiling

$$T_{cei}(i + 1) = \left( \left( \frac{k_{TV}}{\Delta x} \right) * (T5(i) - T_{cei}(i)) - Q_{si}(i) \right) \cdot \left( \frac{\Delta t}{\frac{C_{PTV} \cdot \rho_{Tverde} * \Delta x}{2}} \right) + T_{cei}(i) \quad (43)$$

Por último, se realiza la predicción de temperatura del aire interior para todos los casos de recintos estudiados por medio de la siguiente ecuación, la cual se obtuvo al aplicar la formulación explícita de conducción transitoria del balance energético referente al aire interior de cada recinto (visto en la sección 5.2).

$$T_{air(i+1)} = [Q_{si}(i) + Q_{sip1}(i) + Q_{sip2}(i) + Q_{sip3}(i) + Q_{sip4}(i) + Q_{inf}(i)] \cdot \left( \frac{\Delta t}{C_{air} * \rho_{air} * V} \right) + T_{air(i)} \quad (44)$$

En el momento de fijar este intervalo temporal se debe tener en cuenta, que, si es superior a un determinado límite, se producirán oscilaciones crecientes en la solución. De modo que para reducir los errores se ha de cumplir para paredes y techos que:

$$Fo < \frac{1}{2}; \quad Fo \equiv \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \quad (45)$$

Siendo:

Fo: Número de Fourier

$\alpha$ : Difusividad térmica de la superficie.

$\Delta t$ : Intervalo temporal

$\Delta x$ : Distancia entre nodos de superficie.

Los resultados se consideran exactos con incrementos de espesor  $\Delta x$  y de intervalos  $\Delta t$  suficientemente pequeños, usualmente con valores típicos de capas de 5 [cm] en intervalos de 15 minutos. Para este caso fue seleccionado un intervalo de iteración de 1 segundo debido a los pequeños espesores presentados en los recintos.

## **6. MONTAJE EXPERIMENTAL**

El arreglo experimental consiste en la adecuación de dos construcciones bioclimáticas, de iguales configuraciones constructivas diferenciadas en que una cuenta con una placa de concreto y tejas de barro como techo, mientras en otra está instalada una cubierta verde. En conjunto se desarrollan e implementan los siguientes subsistemas:

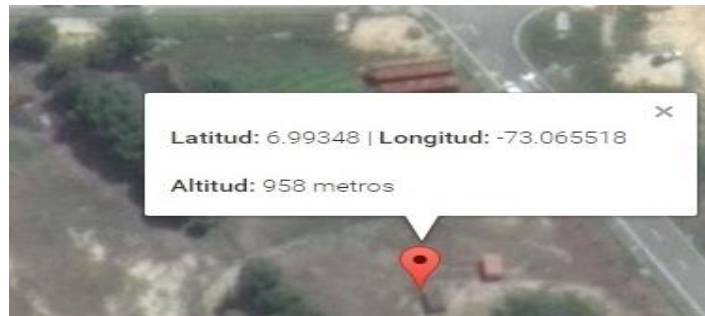
- Sistema de monitoreo con la sensórica y adquisición de datos respectiva, donde la disposición del conjunto de todo se denomina estación de investigación.
- Pared verde modular de fácil instalación.
- Suministro de agua y riego por goteo optimizado utilizando un generador de agua atmosférica para reponer pérdidas y regenerar gradualmente el agua.
- Suministro de energía eléctrica mediante la aplicación de energía solar fotovoltaica.

### **6.1 PROCESO DE ADECUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RECINTOS**

Se seleccionaron dos construcciones bioclimáticas previamente edificadas en el proyecto Análisis multidimensional de la influencia del techo en el comportamiento térmico del interior de recintos por Karen Ruiz [11] en la sede UIS Guatiguará.

Estas construcciones se consideraron idóneas para la realización del montaje experimental ya que fueron erigidas en un terreno sin acceso a agua de riego y no interconectada lo cual coincide las especificaciones planteadas en el presente proyecto. Los cerramientos fueron edificados con dimensiones de 4.88 [m] de ancho, 2.44 [m] de largo y 2.1 [m] de altura, la estructura de cada cerramiento está compuesta por vigas y columnas de madera, en donde se apoyan las paredes y techos.

Figura 15. Ubicación de las construcciones bajo estudio



Las paredes constan de placas de fibrocemento conocido como eterboard de 6 [mm] de espesor y los techos, los cuales están dispuestos con una inclinación de  $8^\circ$  cuentan con una placa de madera que sustenta los diferentes tipos de techos: un recinto tenía una placa estructural de concreto de 3 [cm] de espesor, y el otro tenía vestigios de un techo verde constituido con maní forrajero.

Debido a condiciones climáticas adversas y el poco mantenimiento que tuvieron dichos habitáculos, estos presentaban filtraciones de agua debido a una pobre aplicación de manto asfáltico, aberturas en la intersección entre el suelo y las paredes debido a la erosión del suelo, techo de concreto agrietado debido a una mala cimentación de la formaleta (cajón donde se mezcla el concreto y forma la placa) y el techo verde erosionado y solo cubierto algunas porciones por vegetación.

Figura 16. Estado inicial de techos de los recintos



Con el fin de garantizar uniformidad en los resultados del estudio, se requiere que ambas edificaciones sean lo más homogéneas posibles, por lo cual se realizaron las siguientes reformas:

Para el techo de concreto: Se rellenaron las grietas con una nueva mezcla de concreto, luego se procedió a aplicar un nuevo manto asfáltico en el que no se presentaran futuras filtraciones de agua y se procedió a colocar tejas para acercar el modelo más a la realidad.

Figura 17. Adecuación de techo de concreto



Para el techo verde: Se retiró la vegetación remanente en este techo y se colocó un nuevo manto asfáltico y la correspondiente emulsión asfáltica con el fin de impermeabilizarla al agua que pudiera pasar al interior del recinto. Luego se colocó tierra como sustrato y se instalaron tepes de césped japonés.

Se utilizó la especie *Zoysia* japónica que comúnmente se conoce como césped japonés, es un césped que puede tolerar un alta gamma de variaciones de temperatura y es altamente usado en climas templados. Se caracterizan por ser un pasto de hojas rígidas y la razón por la que fue seleccionado para integrar el techo verde, es que requiere poco mantenimiento y desarrolla una alta tolerancia a las condiciones de sequía.

Figura 18. Tepes de césped japonés



Figura 19. Adecuación de techo verde



Para las paredes se dispuso de más placas de eterboard con el fin de tapar las aberturas en ellas, de forma que en ambas construcciones se tuviera la mínima infiltración de aire y sea la misma cantidad en ellas.

Figura 20. Adecuación de paredes de eterboard



## 6.2 SISTEMA DE MONITOREO: ESTACIÓN DE INVESTIGACIÓN

El sistema de monitoreo se encarga de medir y registrar las temperaturas de, aire (interior y ambiente), radiación solar incidente, velocidad del viento, humedad relativa. Asimismo, mediante una cámara termográfica se miden temperaturas de superficies interior y exterior (para techos y paredes) de los recintos.

Para el monitoreo de la temperatura del aire interno se utilizaron termopares tipo K, los cuales “consisten en dos conductores metálicos diferentes, unidos en un extremo, denominado junta caliente suministrando una señal de tensión eléctrica que depende directamente de la temperatura”<sup>14</sup>, por lo cual son usados como sensor de temperaturas. Estos son ampliamente utilizados para medir temperaturas de hasta 1317 [°C] en servicio continuo.

Figura 21. Carrete de termopares tipo k con sus conectores hembra y macho



<sup>14</sup> Termokew, Fabricación de Termopares.

[sitio web]. Disponible en: <<http://www.termokew.mx/termopares.php>>[Citado el 2 de agosto de 2016]

Para la adquisición de datos de temperaturas del aire interno se utilizó el equipo Agilent 34972A, el cual es un sistema que cuenta con su propio software donde se encuentra caracterizados los termopares utilizados y por tanto este equipo realiza la exacta calibración entre la señal de tensión que registra el termopar y la temperatura a la que equivaldría.

Figura 22. Unidad de adquisición de datos Agilent 34972A



Para el monitoreo de la radiación solar incidente sobre los habitáculos, se utilizó un piranómetro Davis instruments 6450, que mide la radiación global, esto es, la suma de las componentes directa y la difusa de la radiación solar. El transductor del sensor convierte la radiación incidente en corriente eléctrica. De la salida de tensión eléctrica del sensor, la consola calcula y muestra la irradiación solar.

Figura 23. Sensor de radiación: piranómetro Davis 6450



Para la medición y adquisición de datos meteorológicos de las condiciones climáticas locales, tales como temperatura de aire ambiente, velocidad del viento, humedad relativa y presión atmosférica, se utilizó la estación meteorológica Vantage Vue. Esta unidad cuenta con un variado módulo de sensores integrados, resistentes a la corrosión y está fabricado para resistir condiciones climáticas adversas. La estación de sensores transmite datos de manera inalámbrica a la consola propia de la estación con un alcance de hasta 300 [m], los paquetes de datos Vantage Vue se envían cada 2.5 segundos a la consola.

Los valores de las variables previamente enunciadas se recolectaron para intervalos de cinco minutos a 2.1 [m] de altura en el recinto que cuenta con el techo verde, Arrojando 288 datos para cada variable por cada día de medición. La consola realiza un promedio de los datos obtenidos para el intervalo especificado.

Figura 24. Estación meteorológica Vantage Vue y su respectiva consola receptora de datos



Fuente: Catálogo de Davis Instruments

La medición de temperaturas de superficies iniciales (techos y paredes) se hizo por medio de la cámara termográfica FLIR serie E4 que calcula las temperaturas de superficies a determinada distancia, con gran exactitud y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar.

Esta cámara cuenta con su propio software que permite captar y guardar las imágenes de termografía con las temperaturas de la superficie captada por la cámara y el tiempo en el cual fue hecho el registro. En el anexo B se dan especificaciones adicionales del equipo. Estas temperaturas se recolectaron al iniciar y finalizar el estudio.

Figura 25. Cámara termográfica FLIR E4



Fuente: <https://www.thetapestore.co.uk/flir-e4-thermal-imaging-camera>

El estudio de la estación de investigación se efectuó primero durante ocho días previos a los días previstos a simular con el fin de caracterizar las variables climáticas del lugar en la ubicación de los recintos.

La toma de datos de radiación solar y temperatura del aire interior de los recintos se hizo cada 60 segundos durante las 6 horas de estudio, mientras que las otras variables como la temperatura del ambiente exterior y velocidad del viento se monitorearon cada 5 minutos. La experimentación se realizó en dos sesiones de pruebas en días que tuvieran similar variación de temperatura entre el interior de los recintos y el ambiente exterior.

### **6.3 PARED VERDE MODULAR DE FÁCIL INSTALACIÓN**

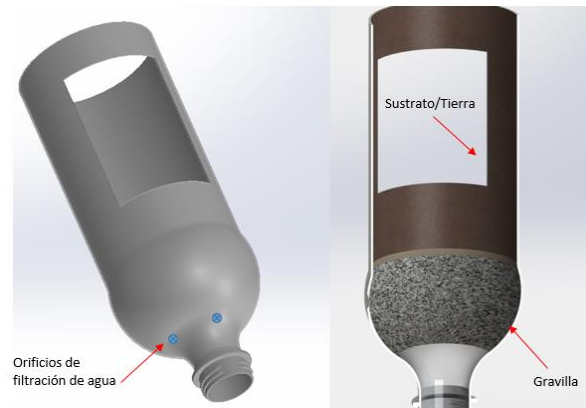
El presente proyecto plantea la utilización de una huerta vertical adaptada como pared verde. Después de evaluar diferentes alternativas de plantación de un cultivo en configuración vertical, se decidió construir un modelo de huerta vertical usando botellas PET como recipientes contenedores de las plantas.

Hacer huertos en botellas plásticas es una buena manera de reutilizarlas y reducir uno de los residuos más numerosos y que la naturaleza toma muchos años en reciclar. El objetivo es darles un buen uso a estos envases convirtiéndolos en macetas ecológicas para la siembra de plantas, que para estos envases suelen ser plantas aromáticas y hortalizas que demanden poco espacio y ejemplares de raíces poco profundas como las fresas, por ejemplo.

Ya que la implementación de este proyecto está prevista para zonas con limitado acceso a recursos hídricos se debe buscar la forma de aprovechar los pocos que pueda existir de la manera más eficiente, lo que significa necesariamente el uso de un ambiente controlado de cultivo. Usando como guía el proyecto presentado en el antecedente conocido como Windows Farms, que originalmente proponía un sistema de riego totalmente hidropónico se optó por diseñar una solución más relacionada con los cultivos tradicionales y adaptar ciertas características del sistema original.

Esta huerta vertical fue delineada de manera modular de forma que cada columna de vegetación fuera independiente, adaptando un sistema de riego por goteo optimizado que previene las pérdidas por fugas en el sistema y utiliza la gravedad como vector de distribución. Esto se realiza mediante la implementación de tubos de pvc para darle rigidez a la estructura y abriendo agujeros en el fondo de las botellas con el fin de permitir el paso de agua solo por los canales de la parte superior dispuesta en la botella y en el fondo de ella.

Figura 26. Esquema de maceta modular de la huerta vertical



En el fondo de la botella pet se encuentra dispuesta gravilla y tierra con el fin de proveer un filtro natural del agua de riego y evitar estancamientos de agua que pudieran dañar las plantas. Además, las botellas fueron embarnecidas con pintura con el fin de reducir radiación solar que pudiera incidir sobre las raíces de las lechugas lo cual es perjudicial para ellas.

Figura 27. Columnas modulares de la huerta vertical



Para esta huerta se utilizaron plantas de lechuga, cuyo nombre científico es *Lactuca sativa*. Es una planta herbácea propia de las regiones semi-templadas que se cultiva con fines alimentarios.

La lechuga es un cultivo ideal para huertos urbanos ya que es sencilla de cosechar, se puede realizar en cualquier momento del año, no requiere macetas de gran tamaño, no requiere muchos cuidados y cuando germina las hojas son densas y frondosas proporcionando sombra y protección de la superficie donde estén instaladas de los rayos del sol, además de aprovechar esta radiación solar al máximo para sus procesos biológicos.

Figura 28. Plántulas de lechuga



Estas macetas modulares fueron dispuestas en las fachadas sur de las construcciones bioclimáticas, pues en esta zona se recibe mayor cantidad de radiación solar y de manera directa (excepto en verano) al encontrarse estos recintos ubicados en el hemisferio norte. Para ello se disponen en las paredes en un soporte compuesto por tres marcos de pino y se colgaron estas columnas en una varilla de aluminio de 1 pulgada de diámetro, usando ganchos metálicos sobre la varilla.

Figura 29. Adecuación de huerta vertical en fachadas



Estas columnas tienen en el recipiente inferior aberturas de forma que el agua filtrada resultante sea nuevamente aprovechada para el riego. Para ello se dispuso de canales donde esta agua fuera depositada en un tanque, también hecho con botella pet, donde su abertura de entrada cuenta con una malla que se encarga de filtrar posibles fugas de sustrato de las plantas que pudieran taponar el sistema de recirculación de agua.

Figura 30. Canales y tanque depósito de agua



Además, las columnas cuentan en su parte superior con un recipiente también hecho de botella pet, cuya función es recopilar el agua que sea suministrada por el sistema de reposición de agua y agua lluvia que se pudiera obtener, y distribuirla equitativamente a las 12 columnas dispuestas. Este tanque cuenta con aberturas a igual profundidad, con goteros a su salida, para garantizar un riego equitativo.

Figura 31. Tanque distribuidor de riego para la pared verde modular



## 6.4 SUMINISTRO DE AGUA Y RIEGO POR GOTEO OPTIMIZADO UTILIZANDO UN GENERADOR DE AGUA ATMOSFÉRICA PARA REPONER PÉRDIDAS Y REGENERAR GRADUALMENTE EL AGUA

Las condiciones presentadas en el planteamiento del problema, hacen indispensable un sistema de riego que tuviese un consumo mínimo de energía. Dada la disposición vertical de los cultivos se tenía un problema agregado de generar una cabeza de presión equivalente a elevar agua a una altura de alrededor de 2 [m] por lo que una bomba de agua convencional de acción centrífuga hubiese sido demasiado grande para ser una alternativa viable.

La solución implementada a dicho predicamento se encontró en un sistema conocido como “Air Lift”<sup>15</sup> o de elevación neumática, que aprovecha la presión suministrada por un compresor de aire para elevar el agua por paquetes. Utilizando el flujo natural de elevación de las burbujas de aire que se alternan con los paquetes de agua dentro de un ducto delgado, logrando así un flujo constante de líquido utilizando un máximo de consumo de 6 [W] instantáneos representados en el accionamiento del compresor.

Figura 32. Compresor de aire utilizado para el “Air Lift” EcoPlus 728360



---

<sup>15</sup> Air lift pumps

[sitio web]. Disponible en: < [https://en.wikipedia.org/wiki/Airlift\\_pump](https://en.wikipedia.org/wiki/Airlift_pump) >[Citado el 13 de septiembre de 2016]

El compresor de aire utilizado para el sistema de riego es: EcoPlus 728360. Este tipo de compresores se utilizan tradicionalmente en el aireamiento de acuarios, pero la experimentación por parte de los entusiastas de técnicas de auto cultivo por medio de la hidroponía y la acuaponía le han dado un lugar fundamental al compresor de aire como una alternativa mucho más viable que una bomba centrífuga convencional debido a su bajo consumo, a su elevada capacidad de elevación de líquido y a la capacidad de manejar material particulado esencial para el aprovechamiento de nutrientes por parte de las plantas.

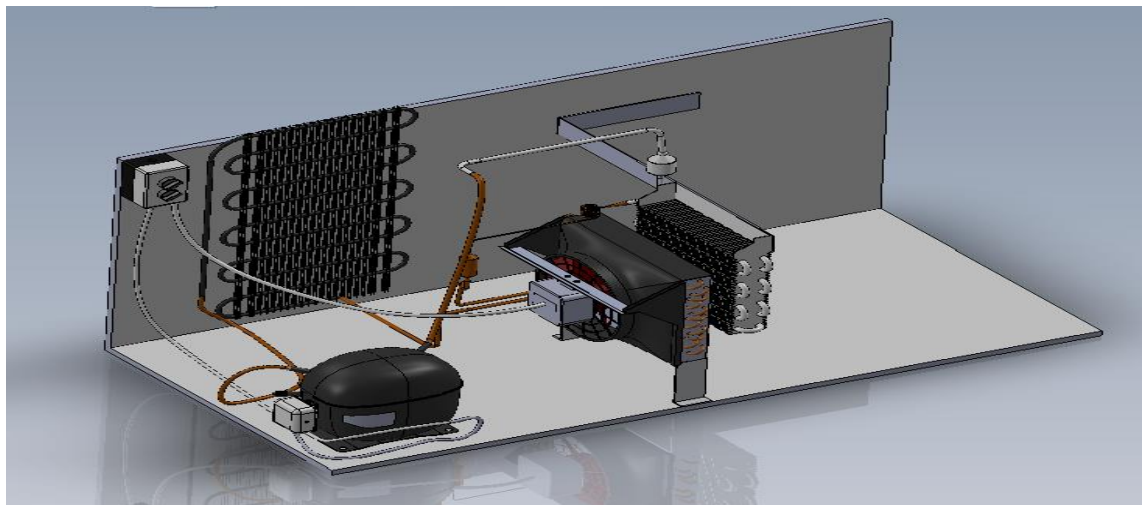
La elevada temperatura que se presenta en algunas zonas en las que se pretende tener impacto con el uso de este sistema en el futuro, hace que las pérdidas del sistema de recirculación por la evaporación con el ambiente, la absorción de humedad de las plantas y la posterior evapotranspiración se eleven considerablemente, por ello se justifica el uso de una fuente alternativa de reposición de agua que se valiera de un recurso energético disponible en el lugar y que además no comprometiera otras fuentes de agua que pudiesen existir previamente en el sitio. Para ello se decidió implementar un generador de agua atmosférica AWG que se respaldó por medio de energía solar fotovoltaica para su funcionamiento.

El sistema AWG representa una tecnología poco aprovechada debido a su costo relativamente elevado para una cantidad de agua obtenida, en comparación con la excavación de pozos que es actualmente la única alternativa que se utiliza en zonas no interconectadas y de difícil acceso a agua potable. Si se tienen en cuenta las posibles afectaciones del subsuelo que puedan tener los acuíferos subterráneos por la contaminación debida a la actividad humana, sumado a los estudios previos y el personal especializado que se requiere para estas operaciones, la obtención de agua atmosférica prevalece como una alternativa viable por su simplicidad siempre y cuando se cumplan los mínimos de humedad relativa requeridos y se cuente con una unidad robusta que requiera muy poco o ningún mantenimiento.

El prototipo utilizado como generador de agua atmosférica fue realizado según los cálculos y dimensiones especificados en el anexo C, para este diseño en particular se tuvo en cuenta que el ventilador del condensador fuese aprovechado también para el evaporador, esto con el fin de utilizar al máximo el flujo de aire de 400 [m<sup>3</sup>/hora] que ofrece según el fabricante.

Finalmente se hicieron los ajustes según las condiciones del lugar donde están ubicados los recintos, con el objetivo de lograr la mayor cantidad de agua posible con un consumo mínimo y evitar posibles averías por el sometimiento de los elementos del prototipo a presiones que no fuesen las propensas o una sobrecarga del compresor del refrigerante.

Figura 33. Sistema generador de agua atmosférica AWG



En las pruebas realizadas se obtuvo una cantidad aproximada de 600 [ml] de agua condensada por hora para una temperatura en el exterior de evaporador de 9 [°C] para ello se utilizó una presión de trabajo de 35 [PSI].

Figura 34. Temperatura de condensación al final del evaporador



**6.4.1 Sistema de control de riego automático y encendido del sistema de reposición de agua.** El uso de la tecnología ha trascendido todas las actividades humanas, permitiendo ser más competentes y eficientes en los procesos industriales y aportando una mejor calidad de vida en general para todos aquellos que se ven beneficiados por los más recientes avances técnicos.

En el campo de los microcontroladores se ha visto en los últimos años una diversificación y explosión en las aplicaciones de estos gracias al crecimiento de las comunidades de código abierto alrededor del mundo que se han visto potenciadas por herramientas como Arduino y Raspberry Pi, ubicando así la tecnología de los microcontroladores al alcance de cualquiera que pueda sacarles provecho, sin que se necesite un profundo conocimiento técnico para llevar a cabo aplicaciones sencillas y de bajo presupuesto.

- **Programación y funciones de la plataforma Arduino.**

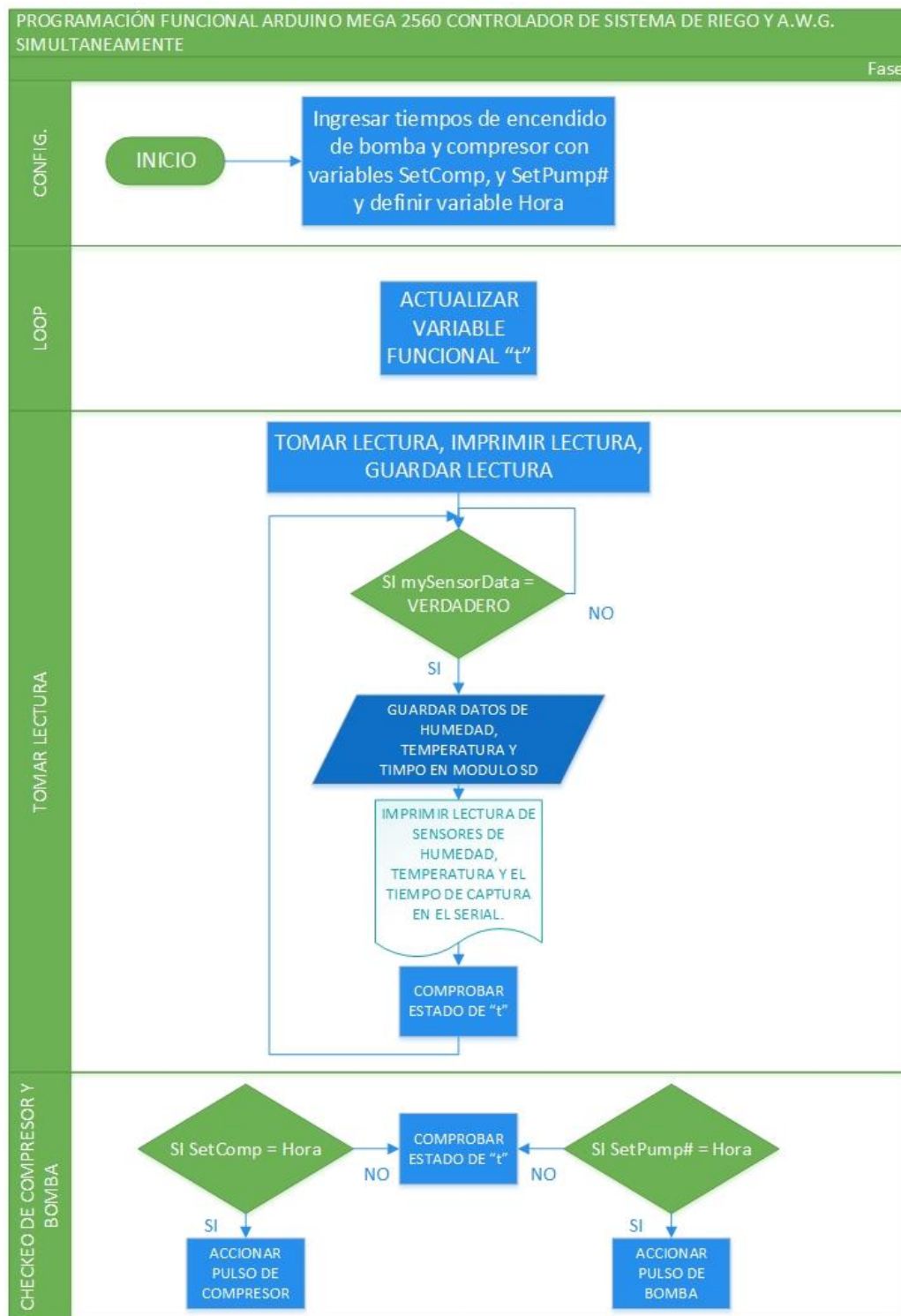
Para tener un control preciso sobre las distintas tareas que debía realizar que debía realizar el controlador, se implementó una la librería “Timer” escrita por Simon Monk<sup>16</sup> en el año 2013 que permite desarrollar labores simultaneas utilizando una programación funcional como se aprecia en el siguiente diagrama de flujo.

---

<sup>16</sup> Librería Timer para la plataforma Arduino. [En línea].2013.

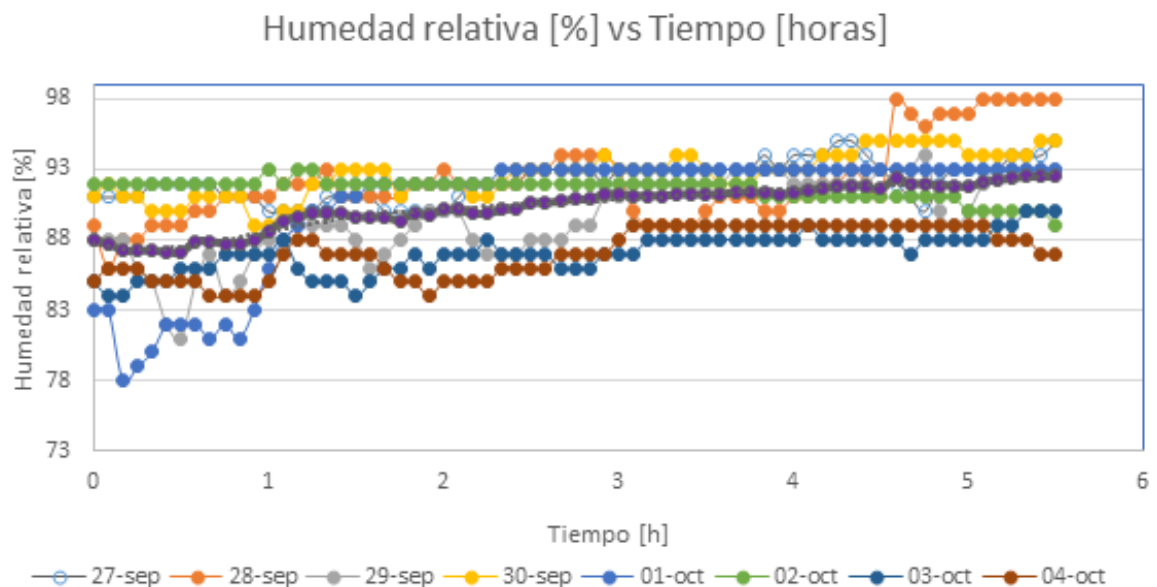
Disponible en: <<http://playground.arduino.cc/Code/Timer>>. [Citado el 13 de septiembre de 2016].

Figura 35. Diagrama de bloques para la programación del controlador



**6.4.1.1 Encendido y apagado del subsistema de AWG.** El subsistema de generación de agua atmosférica debe accionarse en los periodos del día en que su eficiencia sea la mayor posible, dado que la cantidad de agua que logra condensarse está relacionada directamente con la humedad relativa del aire exterior, se realizó la caracterización correspondiente de esta variable y se determinó que el momento de encendido óptimo debía ser entre las 12 a.m. y las 6 a.m. (La caracterización completa del día puede apreciarse en la sección 7.1.4).

Figura 36. Caracterización de la humedad relativa del lugar entre las 12 y las 6 de la mañana



Sumado a ello era necesario controlar la cantidad de energía consumida por el generador de agua e impedir que se sobrepasara el valor establecido de 550 [W-h] para así poder brindar energía a los otros subsistemas.

De esta forma se estableció que el generador debía encenderse en ciclos de 2 horas cada 24 horas desde las 4 a.m. hasta las 6 a.m. todos los días y así reponer alrededor de 1.2 [L] de agua que se sumarían a la cantidad de agua total utilizada por el sistema de riego. Sin embargo, debido a la imposibilidad de permanecer en

la sede UIS Guatiguará a estas horas de encendido y comprobar directamente la cantidad de agua condensada, se hicieron pruebas durante los horarios de ingreso normal y se obtuvieron valores de condensación alrededor de los 800 ml / hora.

**6.4.1.2 Activación del sistema de riego en horas preestablecidas.** Como se denotó anteriormente, este sistema debe activarse seis veces al día de forma automática. Existen en el mercado conectores con temporizador incorporado que se conectan a la red y permiten controlar de acuerdo a horas preestablecidas los tiempos de encendido y apagado de cualquier equipo que se desee.

Figura 37. Programador de riego comercial



Fuente: <https://es.wallapop.com/item/programador-de-riego-78869816>

Sin embargo, los costos de estos equipos suelen ser elevados y en el caso particular de las cotizaciones realizadas para este proyecto todos superaban los 50.000 pesos por unidad por lo que no resultaba viable teniendo en cuenta que se necesitarían dos unidades de estas para realizar el control.

El costo de la plataforma Arduino ya se encontraba asumido por ello resultó más viable involucrarse con la programación del microcontrolador y realizar estas dos actividades de tiempos desde esta plataforma permitiendo así un manejo más robusto y especializado de los subsistemas y mejorando la experiencia en programación de los autores.

Para el riego se decidió llevarlo a cabo seis veces al día durante 30 minutos en cada ciclo esto teniendo como base la información presentada en el canal TV AGRO sobre el cultivo en huertas a pequeña escala y cuya información se encuentra en sus redes de difusión online<sup>17</sup>.

Este consumo representaría un total de 21 [W-h/día], esto teniendo en cuenta que el compresor de aire elegido para el sistema de levantamiento neumático de agua del sistema de riego tiene un consumo instantáneo de máximo 6 [W].

**6.4.1.3 Adquisición de datos de humedad de la tierra de cultivo de las plantas de la huerta.** El desarrollo de módulos de diferentes fabricantes y la facilidad que tiene Arduino de conectarse a las distintas plataformas que existen en el mercado, permiten utilizar combinaciones de estos dispositivos para realizar infinidad de tareas.

Una de las aplicaciones que más ha tomado auge en los últimos años es la toma de datos en el lugar que ofrece una plataforma portátil como arduino y a una fracción del costo de los equipos multiplexores tradicionales, se tiene además la ventaja de realizar una toma de datos durante las 24 horas del día sin la necesidad de utilizar un equipo de cómputo tradicional.

Para este estudio en particular se utilizaron tres sensores YL-69 de fabricación china que tienen una resolución de 1024 bits para una toma de humedad de suelo bastante acertada.

---

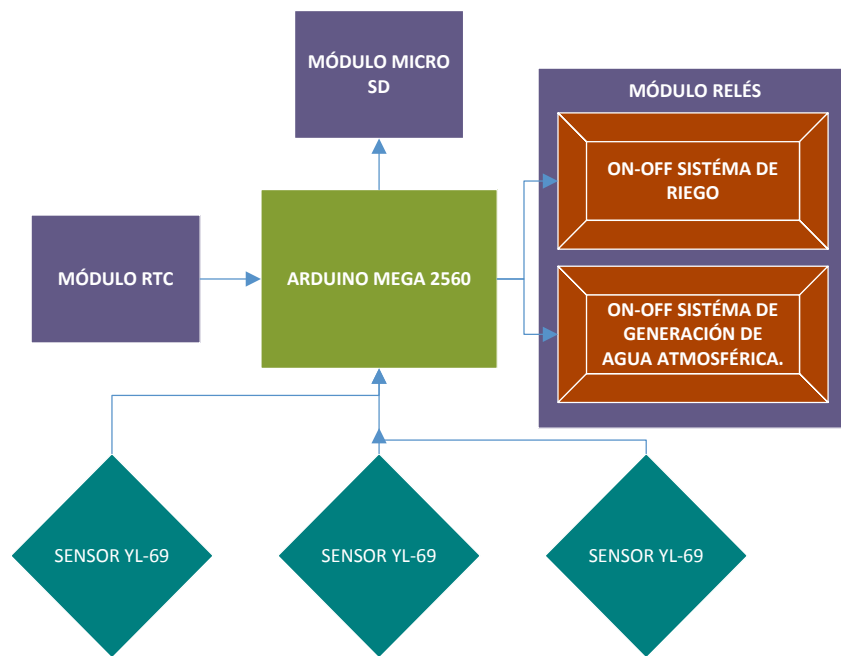
<sup>17</sup> Cómo cultivar Lechuga Hidropónica-TV AGRO [Video en línea]. Disponible en: < <https://www.youtube.com/watch?v=rMaRj-pVcso>>. [citado el 13 de Octubre de 2016].

Figura 38. Sensor de humedad YL-69



**6.4.2 Módulos de arduino utilizados para el desarrollo del proyecto.** Para la ejecución del controlador del sistema de riego automático fue necesario integrar los siguientes módulos a la plataforma arduino con el fin de lograr el producto deseado.

Figura 39. Esquema de adquisición de datos y control del sistema



**6.4.2.1 Módulo RTC Marca ELEGO.** Este dispositivo permite establecer un reloj en tiempo real independiente que brinda un dato de la hora instantánea. Este dato es fundamental para realizar un control preciso de los tiempos de riego y de la hora de encendido y apagado del generador de agua atmosférica, además provee un dato de tiempo para la toma de datos de humedad del medio de cultivo.

**6.4.2.2 Modulo SD Marca ELEGO.** Este módulo permite utilizar una tarjeta micro SD para guardar los datos a medida que se van tomando, puede usar una tarjeta de hasta 16 GB por lo que puede guardar una gran cantidad de información de forma segura.

**6.4.2.3 Plataforma de Arduino utilizada Marca ELEGO.** En un principio se intentó montar el circuito controlador y de toma de datos con un dispositivo Arduino Nano que cuenta con las mismas características del arduino UNO sin embargo debido a la complejidad del software desarrollado para realizar las tres actividades fue necesaria la implementación de un Arduino Mega 2560, el cual cuenta con mayor potencia de procesamiento y con mayor memoria de programa y memoria dinámica (Véase anexo E).

**6.4.2.4 Módulo de relés Marca ELEGO.** Para poder controlar el encendido y apagado del sistema de riego de la huerta fue necesaria la adaptación de un módulo de relés de estado sólido que tiene la posibilidad de manejar voltajes hasta los 250 [V]. En este caso en particular los voltajes manejados por los dispositivos a controlar eran de 115 [V].

El diagrama electrónico de conexiones entre los módulos y sensores del controlador de riego que se representa en la siguiente figura, puede apreciarse en el anexo G.

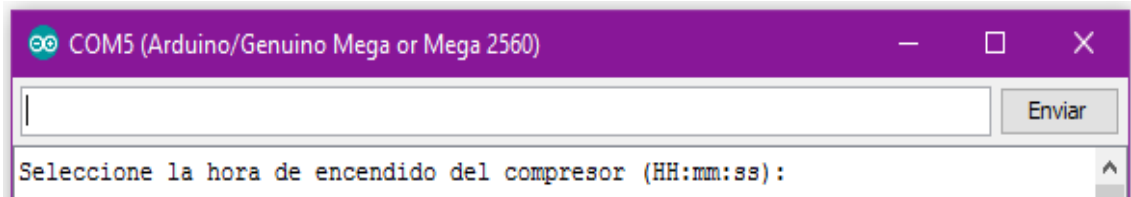
Figura 40. Hardware final del controlador de riego y encendido del AWG



**6.4.3 Configuración del sistema de riego y adquisición de datos.** Para tener un control intuitivo y sencillo sobre el tiempo de riego, la frecuencia de los intervalos de riego y la hora en la que se enciende y se apaga el sistema de generación de agua atmosférica, se incluyeron dentro de la programación del Arduino una serie de preguntas que permiten adquirir datos introducidos por el usuario utilizando el comando `Serial.readString()`, que permitió configurar el sistema con los siguientes pasos:

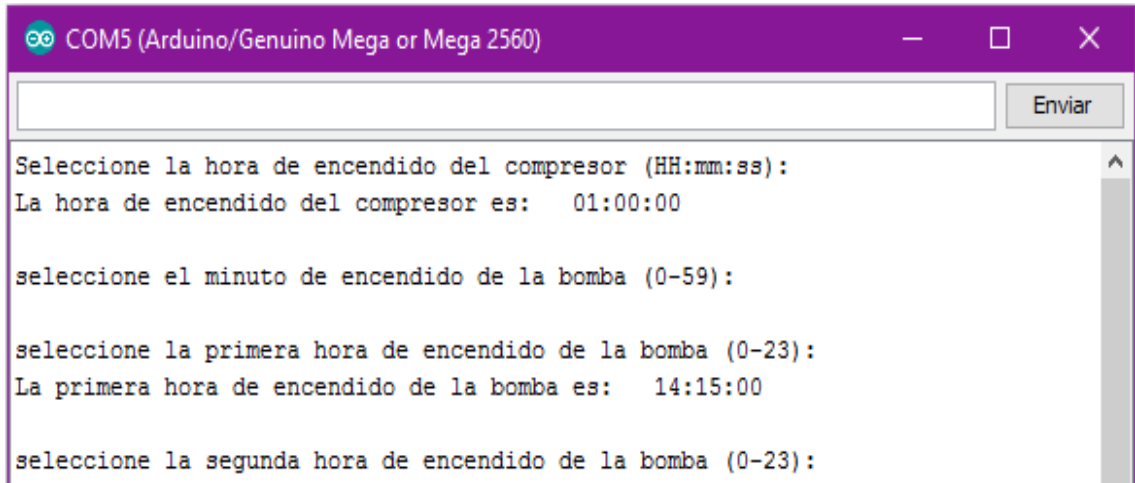
- Se ingresa la hora de encendido del compresor del sistema AWG en el formato HH:mm:ss.

Figura 41. Selección de la hora de encendido del compresor en interfaz arduino



- Se ingresa el minuto dentro de la hora estándar (0-59) de encendido de la bomba del sistema de riego (Air lift) y a continuación la hora estándar del primer encendido (0-23).

Figura 42. Selección de la hora de encendido de la bomba de aire para Air lift



- Finalmente se selecciona la duración de encendido en minutos de la bomba como del compresor del AWG

## 6.5 SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica se ha mostrado en los últimos años como la solución más viable para proveer energía a pequeña y mediana escala en zonas donde una interconexión a la red superaría por mucho los costos de una instalación fotovoltaica autónoma. Esto es debido principalmente a la gran reducción en costo que han experimentado los elementos necesarios para su puesta en marcha, siendo los paneles fotovoltaicos los que han mostrado la disminución de precio más representativa.

El dimensionamiento de la planta de generación fotovoltaica se realizó teniendo en cuenta el consumo combinado del sistema de generación atmosférica, el accionamiento del compresor del sistema de riego y el consumo mínimo de la estación de control.

Tomando como valor de medida el consumo máximo combinado, se estableció el tamaño mínimo que deberían tener los diferentes componentes, y se establecieron dos valores de criticidad.

**6.5.1 Criticidad por Amperaje.** El Amperaje máximo del sistema completo se calculó tomando como base el elemento que tuviese el pico de potencia más significativo, que para el sistema completo fue el compresor del sistema AWG.

El compresor usado de referencia: Embraco 3U50HLP tiene una potencia nominal 1/6 [hp] y maneja un arranque de bajo torque por lo tanto se podía hacer un dimensionamiento del amperaje máximo con el doble de la potencia de régimen del compresor según los datos aportados por el fabricante<sup>18</sup>.

Tabla 2. Consumos del sistema fotovoltaico

Dispositivo	Interface Arduino	A.W.G	Bomba	Total
Consumo en A-h	0,1	2,3	0,05	2,45

El compresor en régimen funciona con 1.8 Amperios y trabaja a 115 Voltios.

$$W_{comp} = 1,8[A] * 115[V]$$

Así se calculó una potencia de régimen de 207 [W] lo que significó tener un inversor que pudiese manejar al menos 414 [W] durante el breve lapso de tiempo que dura el arranque.

---

<sup>18</sup> Catálogo de compresor Embraco EM 3U50HLP. [Catálogo en línea]. Disponible en: < [http://www.embraco.com/catalog/pdfs/FT016392\\_4.pdf](http://www.embraco.com/catalog/pdfs/FT016392_4.pdf) >. [Citado el 30 de Agosto de 2016].

Figura 43. Compresor utilizado en el AWG: Embraco 3U50HLP



Teniendo en cuenta lo anterior se decidió utilizar un inversor Cobra de referencia CPI 480 Que tiene una capacidad de manejar 400 [W] de trabajo continuo por una hora y con la posibilidad de manejar una potencia pico de 800 [W] trabajando a una eficiencia del 88%.

Figura 44. Inversor de corriente Cobra CPI 480



**6.5.2 Criticidad por cantidad de energía consumida en un ciclo.** El rendimiento del sistema de generación de agua atmosférica en las pruebas realizadas se estableció alrededor de los 600 [ml/hora] tomando como base una reposición mínima de 1.2 [L] al día, se concluyó que sería necesario tener el sistema encendido por al menos 2 horas para llegar a esta tasa de reposición.

En la puesta a punto del sistema AWG se estableció una corriente de consumo promedio de 2.3 [A], por lo tanto, para hacer funcionar el sistema por dos horas y media a 115 [V] serían necesarios 530 [W-h].

Además, el consumo total diario del sistema de riego en conjunto con el sistema de control se estableció en 50 [W-h], por lo tanto, se necesitaría una batería que tuviese una capacidad de al menos el doble de esta demanda de energía de 580 [W-h] para poder descargarla hasta una profundidad del 50% y que los ciclos de carga y descargas no afectaran su funcionamiento en el futuro.

Para estos efectos se eligió una batería MTEK 121050 que cuenta con una capacidad total de 105 [A-h] y funciona a 12 [V] en promedio, por lo que tendría una capacidad total de 1260 [W-h] y una cantidad de energía utilizable al 50% de descarga de 630 [W-h], por lo que resultó ideal para esta aplicación.

Figura 45. Batería MTEK 121050



El panel se dimensionó teniendo en cuenta la cantidad de energía utilizable de la batería y la capacidad del mismo de cargarla en las 4.5 [horas] de sol disponibles en el lugar de estudio.

De esta forma se eligió un panel de la marca YINGLI Solar de 135 [W] de potencia nominales que serían apenas justos para cargar la batería con las necesidades antes mencionadas.

Figura 46. Panel solar YINGLI 135 [W]



El cálculo detallado del dimensionamiento fotovoltaico se muestra a continuación:

$$Pot_{picoT} = \frac{E_{consumo} \cdot 1.05}{H_{sol} \cdot (1 - 0.008 \cdot (T_p - 25)) \cdot 0.95} \quad (46)$$

$$E_{consumo} = E_{Avg} + 50 \quad (47)$$

$$E_{panel} = (Pot_{pico\_uniraria}) \cdot (Ft) \cdot Fuso \quad (48)$$

$$N_{paneles} = \frac{Pot_{picoT}}{E_{panel}} \quad (49)$$

Para el anterior planteamiento se estableció un factor de forma para el panel de 0.92 y un factor de uso de 0.95, esto fue establecido teniendo en cuenta aplicaciones previas de los componentes utilizados en este sistema fotovoltaico [12].

### **Cálculo de número de baterías**

La  $C_{Descarga}$  es la capacidad de descarga de la batería para un consumo dado teniendo en cuenta las eficiencias del inversor y del controlador de carga que se estableció en 90% y 85% respectivamente.

$$C_{\text{Descarga}} = \frac{E_{\text{consumo}}}{\eta_{\text{inv}} \cdot \eta_{\text{cont}} \cdot V_{\text{DC}}} \quad (50)$$

$$D_{\text{od}} = \frac{C_{\text{bat}} - E_{\text{bat}}}{C_{\text{bat}}} \quad (51)$$

$$N_{\text{baterías}} = \frac{C_{\text{Descarga}}}{E_{\text{bat}}} \quad (52)$$

Con los cálculos anteriores se estableció que el número de baterías era de 1.058 y el número de paneles era de 1.154 por lo que se asumió que el equipo fotovoltaico respondía de forma justa a los requerimientos y se aceptó como suficientemente bueno para hacer pruebas de campo.

Una vez especificados los subsistemas que conforman la pared se procedió a realizarlos en la fase de construcción y se obtuvieron los sistemas que se muestran a continuación, cuyo esquemáticos y códigos de programación se pueden consultar en el anexo F.

Figura 47. Esquemático de instalación solar fotovoltaica

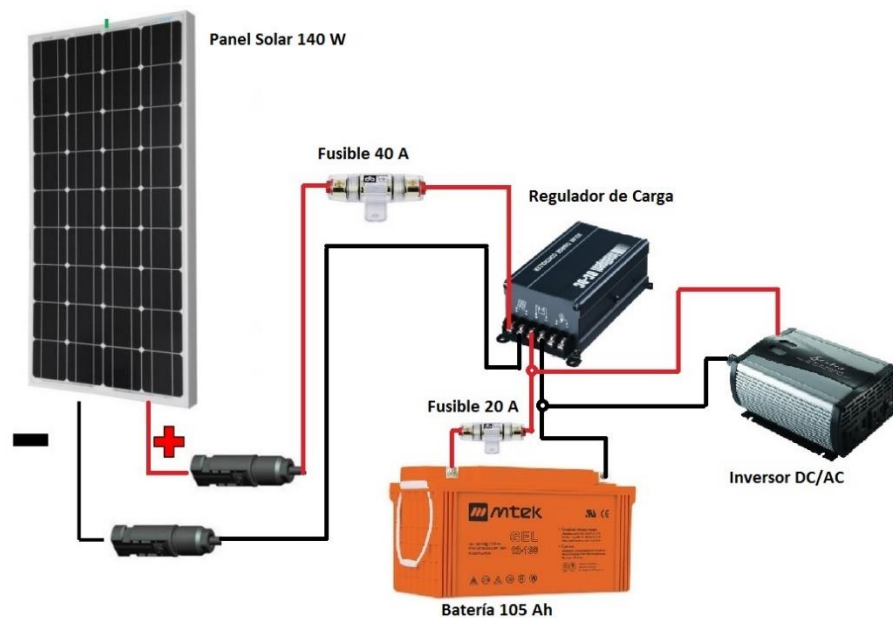


Figura 48. Huerta vertical en conjunto con sus subsistemas



## **7. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS**

El modelo es una aplicación del balance de energía a cada nodo de paredes y techos de un recinto, de modo que, si no se considera la acumulación, la energía que entra al sistema es igual a la energía que sale. El modelo toma como punto de partida el análisis numérico de la conducción aplicado a las diferentes condiciones de contorno para cada nodo y obtener la temperatura en el instante  $T_{i+1} = T_i + \Delta t$ , para lo que se tienen valores conocidos para el instante previo  $T_i$ . Dichas ecuaciones fueron presentadas en la sección 5.3.

La validación del modelo es el proceso de asegurar que la descripción conceptual y la solución del modelo se aplican correctamente. En este caso la validación cuantifica la incertidumbre de un modelo mediante la comparación de sus predicciones mediante diferencias finitas a la par con los datos del mundo real. Las variables predichas por el modelo matemático son las temperaturas superficiales internas y externas (de paredes y techos) y la temperatura del aire en el interior en los recintos.

### **7.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES**

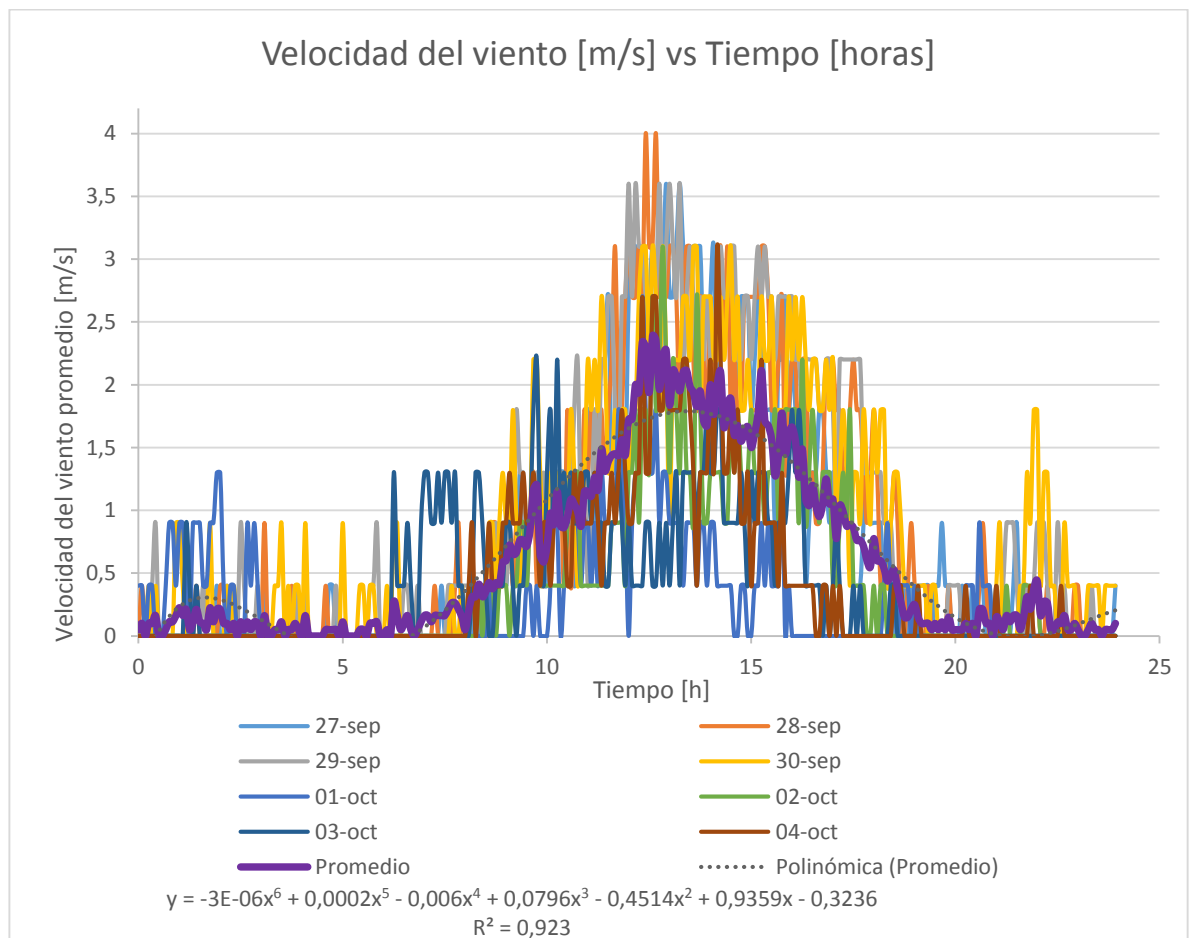
Un objetivo del presente proyecto era realizar una caracterización de las variables ambientales de la ubicación de los recintos bajo estudio, con énfasis en establecer valores de velocidad, temperatura del viento y horas de luz solar al día.

La caracterización consiste en obtener estos datos del registro de la estación meteorológica durante un periodo previo al inicio de las sesiones de toma de datos de los recintos usando el arreglo de la estación de investigación, con el fin de seleccionar cuáles serán los días de estudio, aquellos que presenten diferencias de temperaturas en el recinto semejantes y así obtener una simulación más uniforme.

Los datos recogidos son aquellos que se encuentran en el intervalo temporal que va desde el día 27 de septiembre de 2016 a las 00:00 horas, hasta el día 4 de octubre a las 23:59 horas. El intervalo de mediciones se realizó cada 5 minutos y las horas de medición están referidas a la hora local del lugar.

**7.1.1 Caracterización de la velocidad del viento.** La estación meteorológica registra la velocidad promedio del viento en el intervalo de cinco minutos durante los cinco días de caracterización. Los datos obtenidos durante las fechas previamente especificadas, se pueden apreciar en la siguiente gráfica:

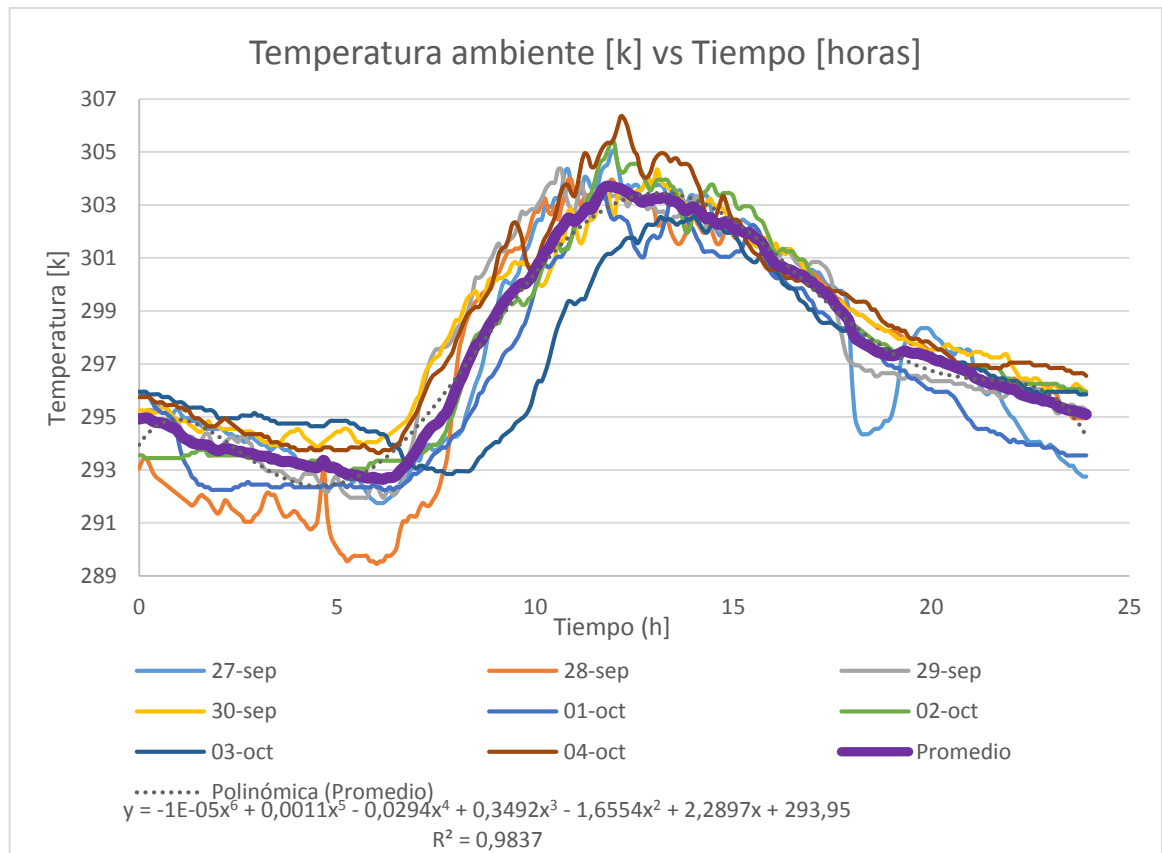
Figura 49. Caracterización de velocidad del viento promedio vs tiempo



Por medio de una regresión polinómica de grado seis, se obtiene una expresión que representa la velocidad del viento promedio en los días de pruebas de caracterización los cuales se realizan unos días previos a los escogidos para la simulación térmica de los recintos.

**7.1.2 Caracterización de la temperatura del aire ambiente.** La estación meteorológica registra la temperatura del viento que incide sobre los recintos en el intervalo de cinco minutos durante los cinco días de caracterización. Los datos obtenidos durante las fechas previamente especificadas, se pueden apreciar en la siguiente gráfica, con la respectiva regresión polinómica que muestra la temperatura exterior promedio para el intervalo temporal de esta caracterización de variables:

Figura 50. Caracterización de temperatura del aire exterior vs tiempo



**7.1.3 Caracterización de la radiación solar incidente y horas de luz solar al día.** El valle de Guatigará se encuentra ubicado a 17 kilómetros del campus principal de la Universidad Industrial de Santander, en el lugar de estudio se puede apreciar un clima caluroso, húmedo y con vientos moderados. Los datos de radiación se obtuvieron de las mediciones realizadas los días 18 y 19 de octubre con el pirómetro Davis 6450 utilizando una plataforma arduino nano para hacer la caracterización del sensor. Haciendo un promedio de las mediciones de los dos días se obtuvieron los siguientes valores de radiación:

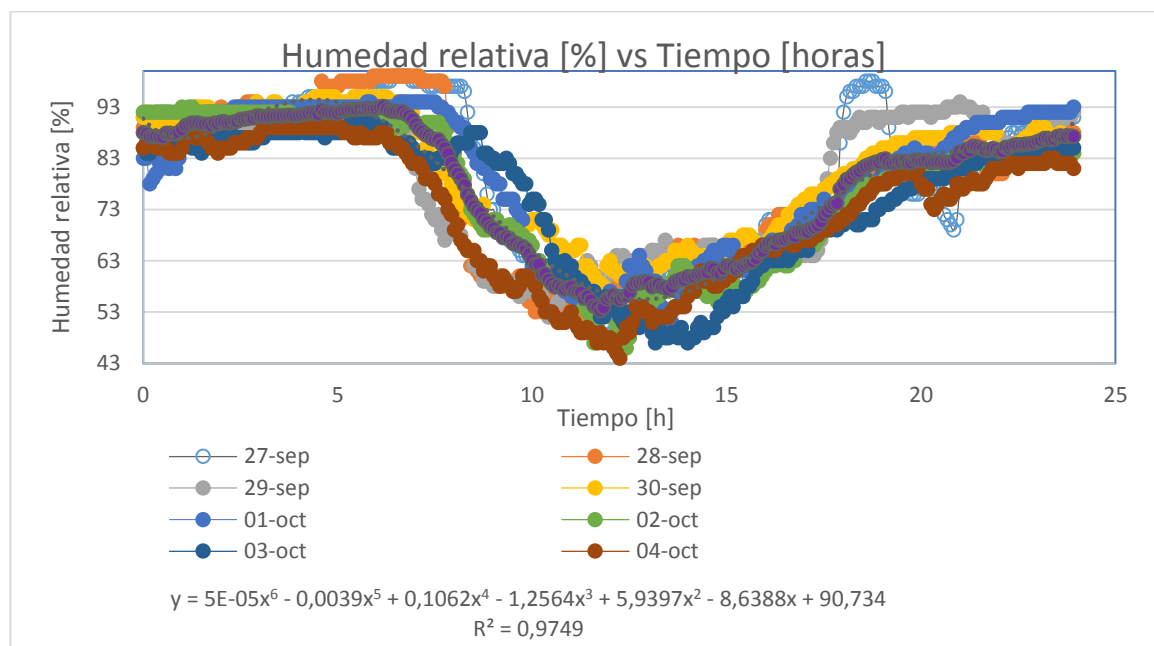
Tabla 3. Promedio de los valores de radiación medidas el 18 y 19 de octubre

HORA	Radiación total [W/m <sup>2</sup> k]	HORA	Radiación total [W/m <sup>2</sup> k]
12:00 a. m.	0,00	1:00 p. m.	830,4
1:00 a. m.	0,00	2:00 p. m.	593,01
2:00 a. m.	0,00	3:00 p. m.	496,93
3:00 a. m.	0,00	4:00 p. m.	185,8
4:00 a. m.	0,00	5:00 p. m.	41,34
5:00 a. m.	110,41	6:00 p. m.	13,51
6:00 a. m.	370,14	7:00 p. m.	0,00
7:00 a. m.	574,2	8:00 p. m.	0,00
8:00 a. m.	780,86	9:00 p. m.	0,00
9:00 a. m.	882,33	10:00 p. m.	0,00
10:00 a. m.	914,91	11:00 p. m.	0,00

De los valores expuestos se puede apreciar que la radiación empieza a ser significativa a partir de las 8:00 a.m. y tiene un declive abrupto a partir de las 3: p.m., es por ello que para la realización del estudio se escogió un periodo de tiempo que se encontrara dentro de este rango de horas, empezando a las 9:30 a.m. y finalizando a las 3:30 p.m.

**7.1.4 Caracterización de la humedad relativa del ambiente exterior.** La estación meteorológica registra humedad relativa en el lugar donde se encuentran ubicados los recintos en el intervalo de cinco minutos durante los cinco días de caracterización. Los datos obtenidos durante las fechas previamente especificadas, se pueden apreciar en la siguiente gráfica, con la respectiva regresión polinómica que muestra la humedad relativa ambiente promedio para el intervalo temporal de esta caracterización de variables:

Figura 51. Caracterización de humedad relativa del ambiente exterior vs tiempo



Teniendo en cuenta los estudios de radiación solar realizados por la UPME y las caracterizaciones con registros de datos tomados en el lugar de: temperatura del aire exterior, humedad relativa y velocidad del viento, se estableció que el periodo de estudio para tomar datos durante el día debía ser de las 9:30 a.m. hasta las 3:30 a.m. Esto teniendo en cuenta que debía registrarse una buena variación de las variables de temperatura interior y exterior y también por los horarios permitidos en la sede UIS Guatimar.

## 7.2 DATOS COLECTADOS EN EL ESTUDIO TÉRMICO

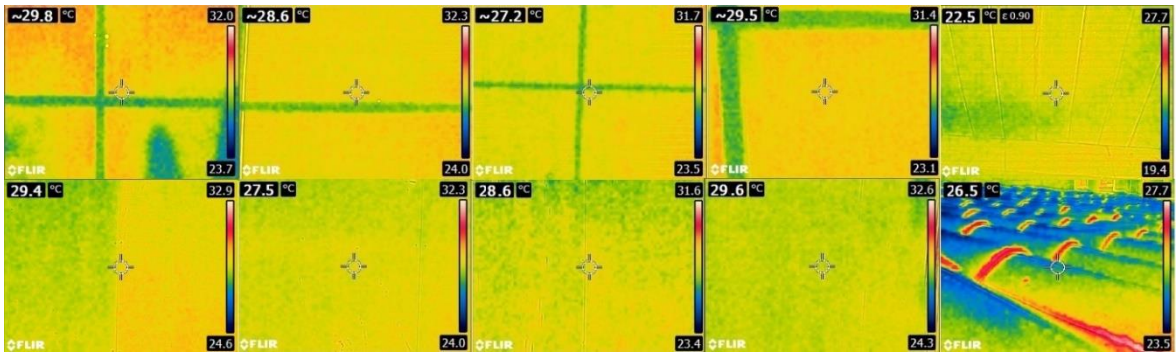
La temperatura del ambiente exterior, la radiación solar y las temperaturas iniciales de las superficies de los recintos (paredes y techo) son datos requeridos como entradas para inicializar el programa de simulación por diferencias finitas y efectuar las predicciones de temperatura del aire dentro de los recintos.

La captura de datos se realizó utilizando cinco termopares tipo K en cada recinto distribuidos en un patrón en cruz (Cuatro extremos, uno central) a lo largo de la dimensión más representativa de la casa prototipo, durante dos sesiones los días 18 y 19 de octubre de 2016, donde se recolectaron datos de las variables previamente establecidas para las siguientes configuraciones en cada uno de los días.

- Primera sesión: el 18 de octubre se tomaron datos del recinto con techo verde con la huerta vertical modular instalada en una de sus paredes, en conjunto con el recinto del techo de concreto y paredes de eterboard.
- Segunda sesión: el 19 de octubre se tomaron datos de los mismos recintos, solo que la huerta vertical modular instalada en el recinto con techo de concreto.

Las Imágenes de termografía capturadas en la estación experimental en las dos sesiones muestran las temperaturas superficiales de paredes y techos para la hora de inicio del estudio de los dos recintos. Gracias al software de la cámara FLIR E4, se obtienen valores promedios de estas temperaturas. A continuación, se muestra dichas temperaturas para cada recinto según la sesión de toma de datos.

Figura 52. Imágenes de termografía exterior e interior del recinto con techo de concreto

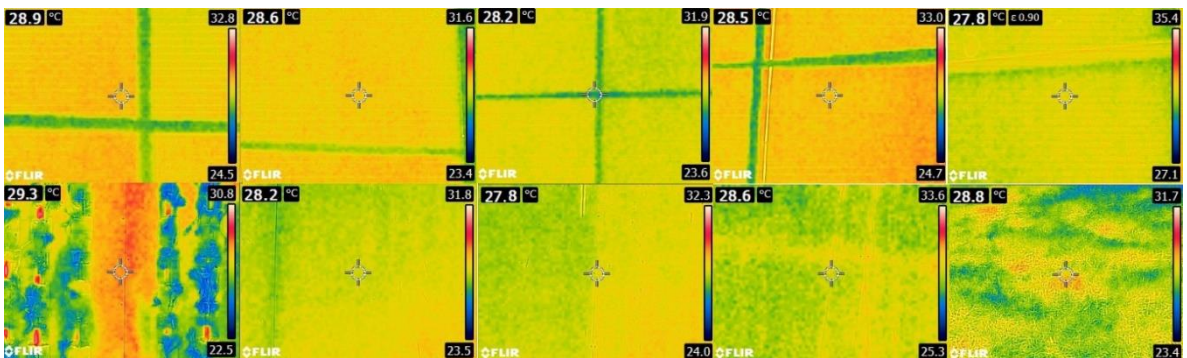


La siguiente tabla muestra las temperaturas superficiales internas y externas para dicho recinto a las 9:30 a.m. el cual es la hora de inicio de captura de datos.

Tabla 4. Temperaturas superficiales interiores recinto con techo de concreto

Superficie	Temperatura promedio [°C]
Pared sur interior	29,8
Pared oeste interior	28,6
Pared norte interior	27,2
Pared este interior	29,5
Techo interior	22,5
Pared sur exterior	29,4
Pared oeste exterior	27,5
Pared norte exterior	28,6
Pared este exterior	29,6
Techo exterior	26,5

Figura 53. Imágenes de termografía exterior e interior del recinto con techo verde y huerta vertical en una de sus paredes



La tabla 5 muestra las temperaturas superficiales internas y externas para el recinto con techo verde a hora de inicio de captura de datos.

Tabla 5. Temperaturas superficiales interiores recinto con techo verde

Superficie	Temperatura promedio [°C]
Pared sur interior	28,9
Pared oeste interior	28,6
Pared norte interior	28,2
Pared este interior	28,5
Techo interior	27,8
Pared sur exterior	29,3
Pared oeste exterior	28,2
Pared norte exterior	27,8
Pared este exterior	28,6
Techo exterior	28,8

A continuación, se muestran las imágenes termográficas tomadas en la segunda sesión de captura de datos el día 19 de octubre, donde se implementa la huerta vertical modular en el recinto con techo de concreto en conjunto se toman datos con el recinto de techo verde. De la toma de datos se tienen las tablas 6 y 7 que representan las temperaturas superficiales iniciales como se observa en las figuras 54 y 55.

Figura 54. Imágenes de termografía exterior e interior del recinto con techo de concreto y huerta vertical en una de sus paredes

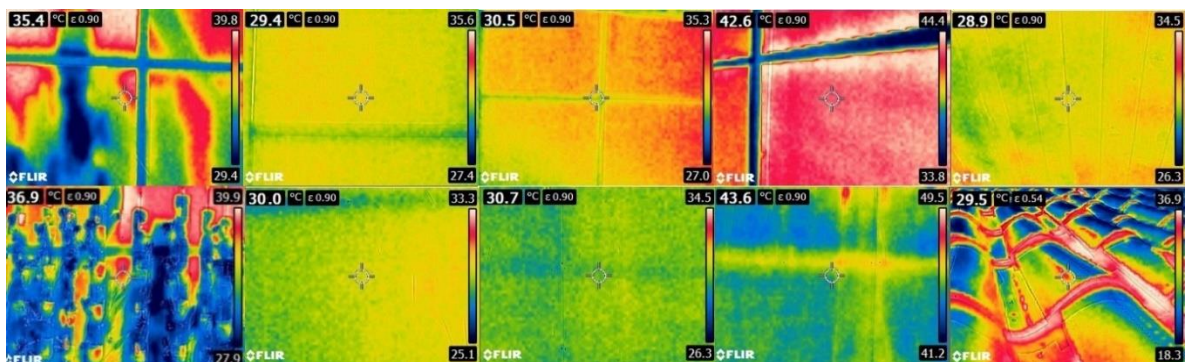


Tabla 6. Temperaturas superficiales iniciales recinto con techo de concreto e implementada una huerta vertical en una de sus paredes

Superficie	Temperatura promedio [°C]
Pared sur interior	35,4
Pared oeste interior	29,4
Pared norte interior	30,5
Pared este interior	42,6
Techo interior	28,9
Pared sur exterior	36,9
Pared oeste exterior	30
Pared norte exterior	30,7
Pared este exterior	43,6
Techo exterior	29,5

Figura 55. Imágenes de termografía exterior e interior del recinto con techo verde

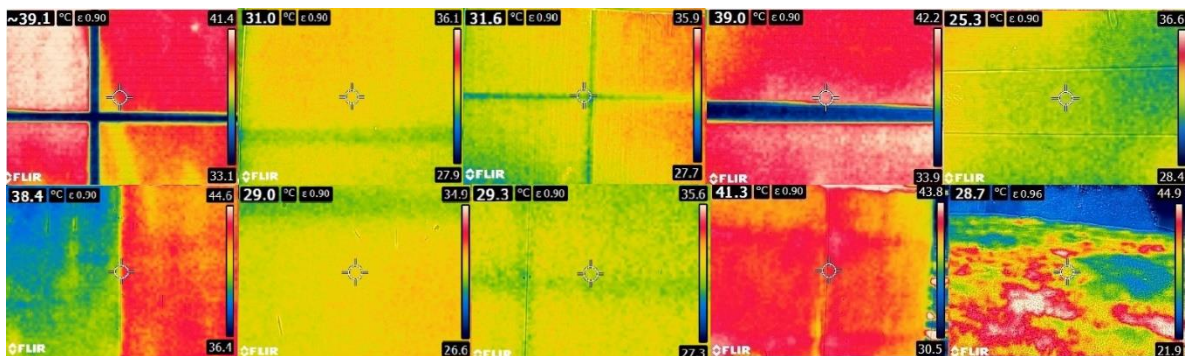


Tabla 7. Temperaturas superficiales iniciales recinto con techo verde

Superficie	Temperatura promedio [°C]
Pared sur interior	39,1
Pared oeste interior	31
Pared norte interior	31,6
Pared este interior	39
Techo interior	25,3
Pared sur exterior	38,4
Pared oeste exterior	29
Pared norte exterior	29,3
Pared este exterior	41,3
Techo exterior	28,7

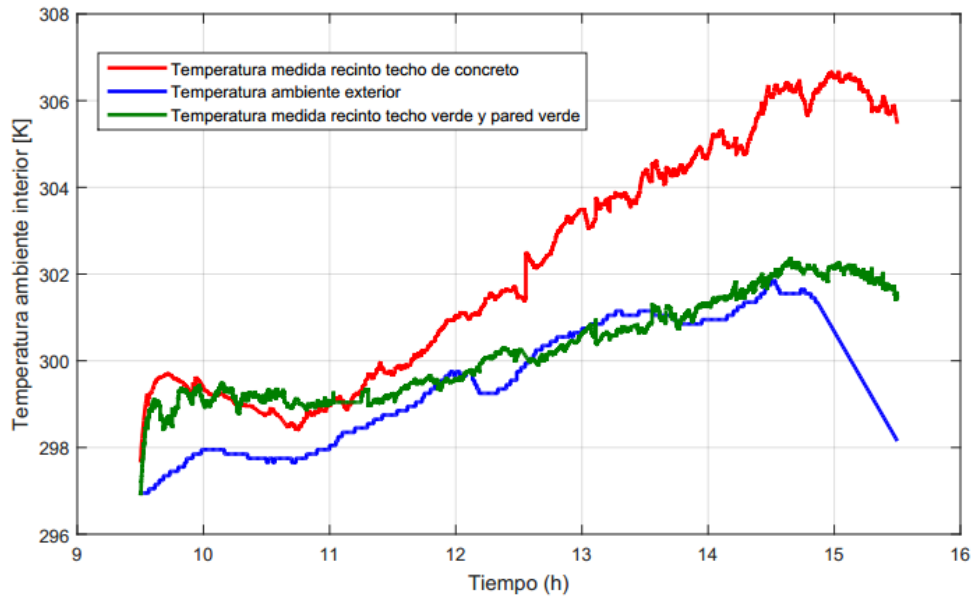
### 7.3 PREDICCIÓN DE TEMPERATURAS

En la ejecución de la simulación del comportamiento térmico de los recintos, se obtienen las temperaturas superficiales de los recintos (paredes y techos) y del aire interior a medida que transcurre el tiempo de estudio o simulación. Para esto, con ayuda del software MATLAB se realizaron iteraciones para las correlaciones descritas en la sección 5.3, empleando como datos de entrada los adquiridos que se expusieron en las secciones 7.1 y 7.2, donde son conocidas las temperaturas iniciales interior y exterior de paredes y techos, junto al comportamiento de las variables meteorológicas del sitio donde se encuentran ubicados los recintos.

Se debe resaltar que se tuvo en cuenta la experiencia obtenida de proyectos anteriores para ajustar correctamente los factores críticos en la toma de datos, siendo fundamental la lectura de la velocidad del viento y las propiedades físicas de las paredes de los recintos, también se hizo un avance importante en el uso de la cámara termográfica pues se encontró que es indispensable ajustar la emisividad de las paredes y techos, y la temperatura aparente reflejada del ambiente para obtener datos más exactos. También se tuvo cuidado de hacer las tomas de datos en periodos donde la sombra de elementos externos como árboles y edificios aledaños no afectara los recintos de estudio.

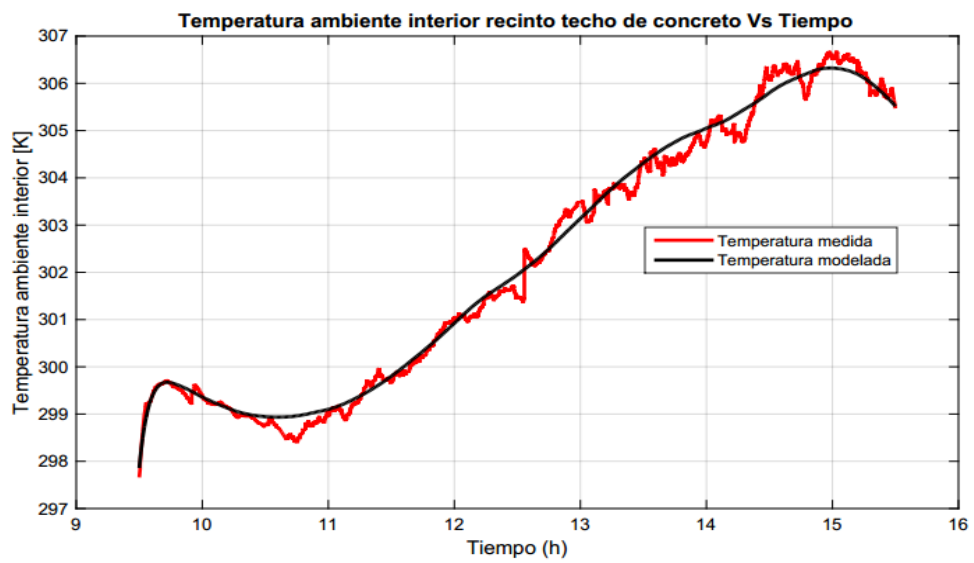
**7.3.1 Análisis de la primera sesión de pruebas.** A continuación, se presenta el comportamiento de las temperaturas medidas en el interior de los recintos estudiados en la primera sesión de pruebas, en conjunto con la temperatura del ambiente exterior. Un recinto cuenta con un techo verde con paredes de eterboard con la huerta vertical modular instalada en una de sus paredes, y el otro recinto cuenta con un techo de concreto y paredes de eterboard.

Figura 56. Temperatura del ambiente interior en los recintos estudiados durante la primera sesión de pruebas el día 18 de octubre de 2016



En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la temperatura interior medida en el recinto con techo de concreto y paredes hechas de eterboard junto a la obtenida por la simulación.

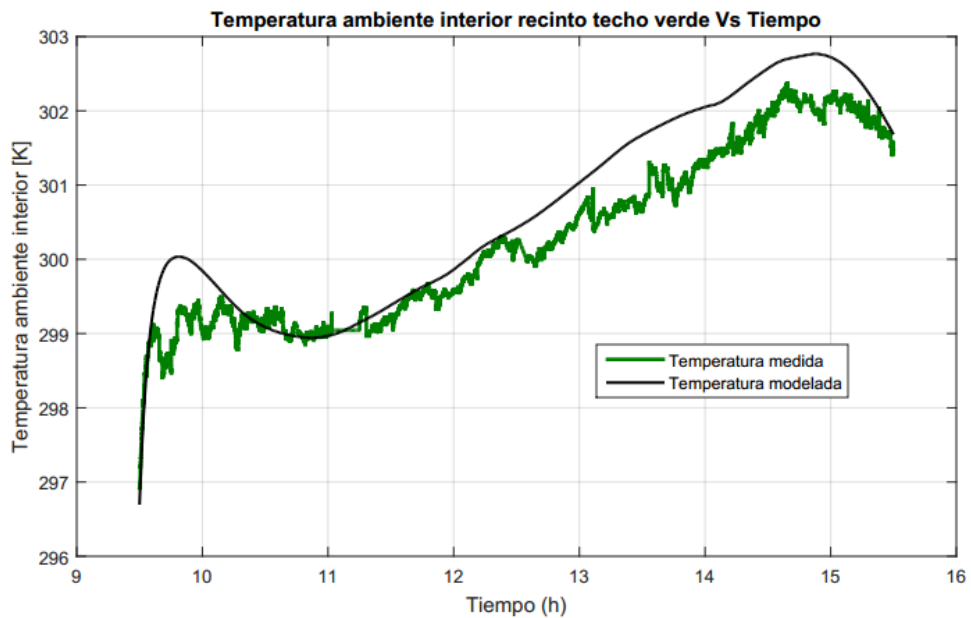
Figura 57. Temperatura del aire interior del recinto con techo de concreto (medida y modelada) vs el tiempo de la primera sesión de pruebas el 18 de octubre de 2016



De esta figura se puede observar que el comportamiento de la temperatura interior simulada en el recinto con techo de concreto y paredes hechas de eterboard difiere en un valor máximo de 0.65 [°C] respecto a la medida.

En la siguiente figura se muestra la temperatura interior medida en la primera sesión de pruebas y la obtenida en la simulación, en el recinto con techo verde, paredes hechas de eterboard y la huerta vertical modular instalada en su fachada sur.

Figura 58. Temperatura del aire interior del recinto con techo verde y huerta vertical (medida y modelada) vs el tiempo de la primera sesión de pruebas el 18 de octubre de 2016



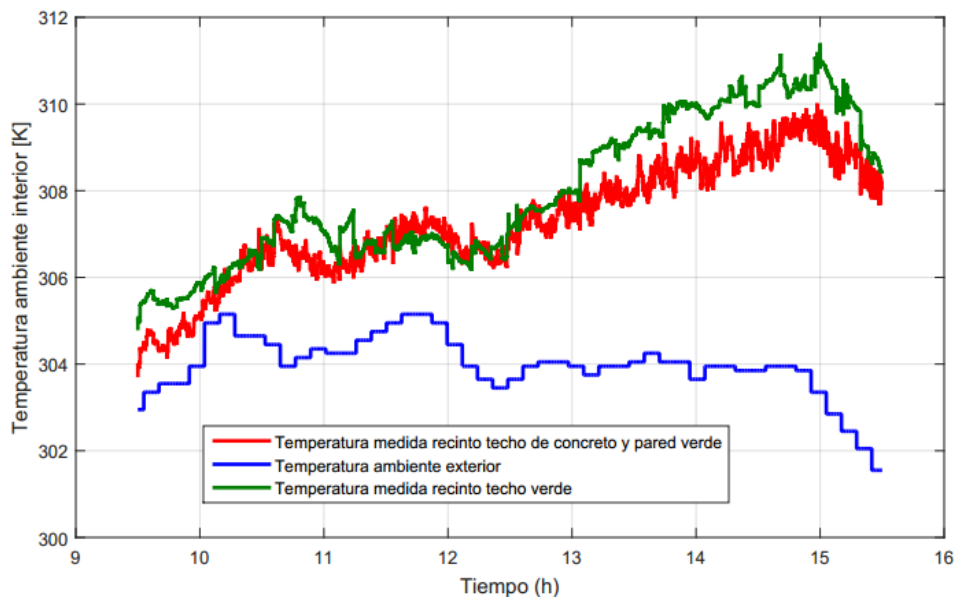
De esta figura se puede observar que el comportamiento de la temperatura interior simulada en el recinto con techo verde, paredes hechas de eterboard y huerta vertical difiere en un valor máximo de 1.6 [°C] respecto a la medida.

De la gráfica donde se muestra las temperaturas medidas en los distintos recintos, es posible observar que la temperatura en el interior del recinto con techo verde y huerta vertical es menor que en el recinto con techo de concreto mayoritariamente

después de las 11:15 a.m. Desde las 10:00 a.m. hasta las 11:14 a.m. se presentó en la prueba una mayor temperatura del ambiente interior del recinto con techo verde, comparada con la del recinto de concreto, esto es debido a que en este intervalo de tiempo no había radiación solar incidente considerable en los recintos y en dichas condiciones un techo verde no presenta un efecto de enfriamiento considerable.

**7.3.2 Análisis de la segunda sesión de pruebas.** A continuación, se presenta el comportamiento de las temperaturas medidas en el interior de los recintos estudiados en la segunda sesión de pruebas, en conjunto con la temperatura del ambiente exterior. Los recintos estudiados son: un recinto que cuenta con un techo de concreto donde se implementó la huerta vertical modular y otro recinto con un techo verde.

Figura 59. Temperatura del ambiente interior en los recintos estudiados durante la segunda sesión de pruebas el 19 de octubre de 2016

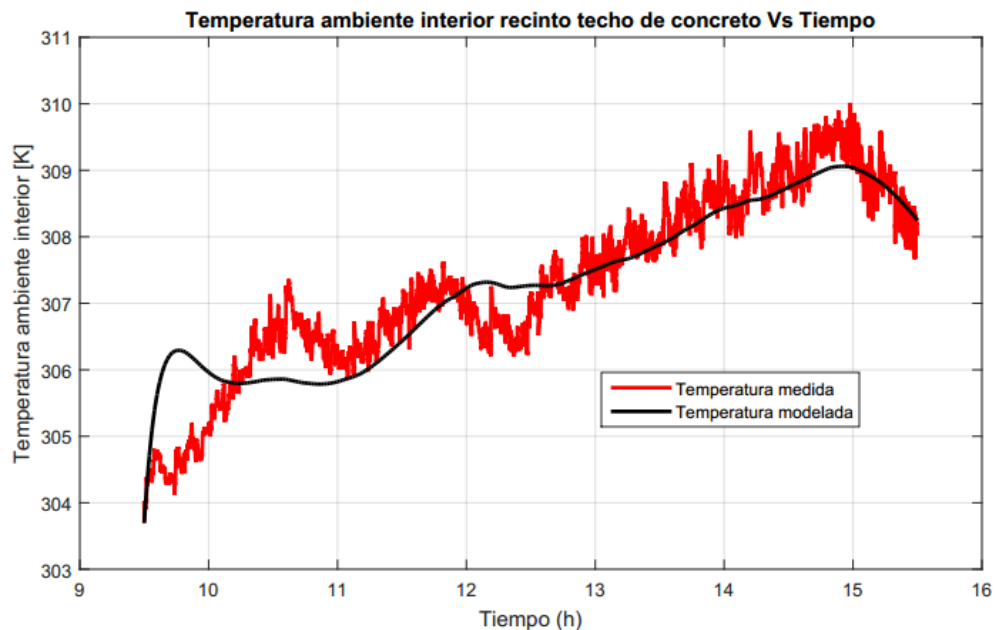


De esta gráfica es posible observar que la temperatura en el interior del recinto con techo de concreto y huerta vertical es menor que en el recinto con techo verde

mayoritariamente después de las 12:15 p.m. También es posible apreciar que la huerta vertical tiene un efecto pronunciado sobre la temperatura interior del recinto de techo de concreto, ya que durante la mayor parte del estudio esta fue menor que la presentada en el ambiente interior del recinto con techo verde.

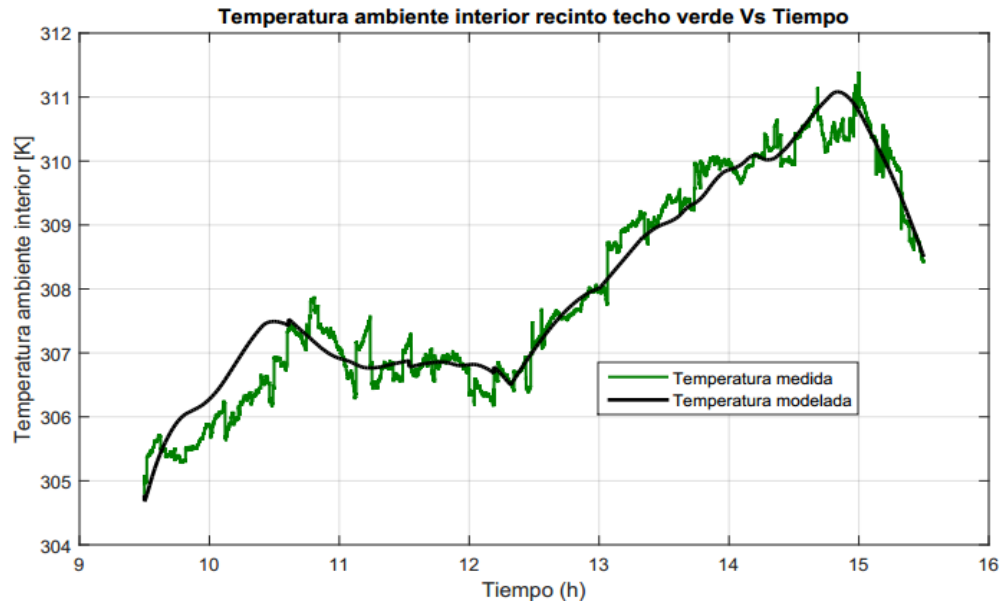
La siguiente figura muestra la temperatura interior medida en la segunda sesión de pruebas y la obtenida en la simulación, en el recinto con techo de concreto y paredes hechas de eterboard y la huerta vertical modular instalada en su fachada sur.

Figura 60. Temperatura del aire interior del recinto con techo de concreto y huerta vertical (medida y modelada) vs el tiempo de la segunda sesión de pruebas el 19 de octubre de 2016



De esta figura se puede observar que el comportamiento de la temperatura interior simulada en el recinto con techo de concreto y paredes hechas de eterboard difiere en un valor máximo de 2.1 [°C] respecto a la medida. En la siguiente figura se muestra la temperatura interior medida en la segunda sesión de pruebas y la obtenida en la simulación, en el recinto con techo verde y paredes hechas de eterboard.

Figura 61. Temperatura del aire interior del recinto con techo verde (medida y modelada) vs el tiempo de la segunda sesión de pruebas el 19 de octubre de 2016



De esta figura se puede observar que el comportamiento de la temperatura interior simulada en el recinto con techo verde y paredes hechas de eterboard difiere en un valor máximo de 1.34 [°C] respecto a la medida.

Del análisis gráfico de estas dos sesiones de pruebas es posible afirmar que, al implementar la huerta vertical adaptada como pared verde a un recinto con techo de concreto, se presenta una reducción de la temperatura del ambiente interior del recinto ligeramente mayor que la del recinto del techo verde. Esta reducción ronda el valor de 0.5 [°C] hacia el final de la segunda sesión de pruebas.

Cuando se implementó la pared verde en conjunto con el recinto del techo verde, la temperatura del ambiente interior de este recinto presentó una tendencia a igualar la temperatura del ambiente exterior, además de una reducción promedio de la temperatura del ambiente interior de 2 [°C] respecto al recinto con el techo de concreto únicamente, lo cual muestra que la influencia de una huerta vertical adaptada como pared verde es equiparable y quizás mayor que la influencia de un

techo verde ya el efecto de cubierta en la pared verde resulta más significativo que en el techo.

## 7.4 CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA EN LOS RECINTOS

El realizar la modelación de la pared verde en conjunto con un techo verde y compararlo con una placa de concreto fue ejecutado con el objetivo de calcular las pérdidas de calor en cada tipo de recinto y cuantificar el ahorro energético que implicaría en gastos de refrigeración convencional. Para esto, es necesario determinar la carga térmica adquirida en cada recinto durante las horas de estudio.

La determinación de la carga térmica para satisfacer las necesidades de refrigeración de los recintos, requiere la sumatoria de los flujos de calor que obtiene el aire durante las sesiones de toma de datos, se le suman los flujos de calor sensible desde las superficies interiores de los recintos y a esto se le sustrae el calor por infiltraciones:

$$QT=Q_{si}+Q_{sip1}+Q_{sip2}+Q_{sip3}+Q_{sip4}+Q_{inf} \quad (53)$$

Donde QT es el flujo de calor neto adquirido en el recinto. Para diferenciar entre cada tipo de recinto se propone la siguiente nomenclatura:

QT<sub>TC</sub>: Es el flujo de calor neto para el recinto con techo de concreto

QT<sub>TCV</sub>: Es el flujo de calor neto para el recinto con techo de concreto y huerta vertical

QT<sub>TV</sub>: Es el flujo de calor neto para el recinto con techo verde

QT<sub>TVV</sub>: Es el flujo de calor neto para el recinto con techo verde y huerta vertical

De las simulaciones obtenidas para las sesiones de estudio, se tiene que:

$$QT_{TC} = 11,3 \text{ [kW]} \quad QT_{TVV} = 7,3 \text{ [kW]}$$

$$QT_{TCV} = 6,7 \text{ [kW]} \quad QT_{TV} = 10,2 \text{ [kW]}$$

## 8. AHORRO ENERGÉTICO OBTENIDO EN COSTOS DE REFRIGERACIÓN CONVENCIONAL

El modo en que se transporta, extrae y consume energía afecta negativamente al ambiente. Si se tiene en cuenta que el gasto energético de acondicionamiento de aire, este ocupa un alto porcentaje en el consumo energético de un país, la actuación en la mejora energética de los equipos destinados al enfriamiento, tanto industrial como doméstico, puede tener un alto impacto en los índices de consumo.

Uno de los objetivos del presente estudio era cuantificar el ahorro energético que implicaría en gastos de refrigeración convencional si se aplicara los recintos bajo estudio. Para ello se determina el valor en pesos que tendría el consumo de un equipo de acondicionamiento de aire al retirar la carga térmica por metro cubico hallada en cada recinto, con el objetivo de poder escalar el modelo para recintos de diferentes proporciones en un futuro.

### 8.1 Costo de retirar la carga térmica de cada recinto bajo estudio

El desempeño de acondicionadores de aire y bombas de calor en recintos se expresa con frecuencia en términos del índice de eficiencia de la energía (EER, por sus siglas en inglés). Esta es una medida de la eficiencia energética instantánea y se define como “la relación de la tasa de remoción de calor del espacio enfriado por el equipo de enfriamiento con respecto a la tasa de consumo de electricidad en operación uniforme”<sup>19</sup>.

$$EER = \frac{\text{capacidad frigorífica[Btu]}}{\text{consumo de energía utilizado[Wh]}} \quad (54)$$

---

<sup>19</sup> CENGEL, YUNUS A, BOLES, Michael. Termodinámica. Un enfoque ingenieril. séptima edición. México D.F. Mc Graw Hill. 2012. p. 290.

El EER está relacionado con el coeficiente de desempeño (coefficient of performance COP) comúnmente usado en termodinámica. El coeficiente de desempeño (COP) es usado para determinar al nivel de potencia eléctrica ( $W_c$ ) que un sistema de climatización consume para transportar una potencia térmica ( $Q_T$ ) determinada, y se encuentra definida por la ecuación:

$$W_c = \frac{Q_T}{COP} \quad (55)$$

Si se considera que  $1\text{kWh}=3412\text{ Btu}$ , una unidad que elimina  $1\text{ kWh}$  del calor en el espacio frío por cada  $\text{kWh}$  de electricidad que consume ( $COP=1$ ), tendrá un EER de 3.412, por lo tanto, la relación entre el EER y COP es:

$$\frac{EER}{COP} = 3.1412 \quad (56)$$

Actualmente debido a las normativas internacionales que promueven el uso eficiente de la energía, la gran mayoría de equipos acondicionadores de aire en el mercado, tienen valores EER de 11.2 a 14.7 lo cual corresponde a valores de COP de 3.57 hasta 4.31. La potencia que consumiría una unidad de acondicionamiento térmico para retirar la carga térmica en los recintos se halla asumiendo un COP de 3.6.

Con el fin de cuantificar el ahorro energético obtenido en cada recinto al implementar una huerta vertical, se toma como calor base el calor total de cada recinto sin la pared verde y se le sustrae el calor cuando se le implementó la pared con el fin de obtener el calor que efectivamente una unidad de acondicionamiento de aire debería retirar durante el tiempo de las sesiones de pruebas (6 horas) y establecer el consumo de energía de esta unidad. Por tanto, se obtiene el calor total que debería disipar esta unidad es:

$Q_{TTC} = 4,6 \text{ [kW]}$  Calor a disipar en el recinto con techo de concreto

$Q_{TV} = 2,9 \text{ [kW]}$  Calor a disipar en el recinto con techo verde

Usando los datos suministrados del catálogo<sup>20</sup> para aire acondicionado DAITSU AIR ASD18UI-DN el cual es de bajo costo económico propicio para la zona donde se podría implementar y con un COP de 3.6 se tiene que:

$W_{TTC} = 1,28 \text{ [kW]}$

$W_{TV} = 0,81 \text{ [kW]}$

Cabe resaltar que los datos mostrados en el catálogo, fueron establecidos por el fabricante al dividir la producción de energía de refrigeración durante su uso anual normal entre la entrada de energía eléctrica total en vatios-horas durante el mismo periodo. Y como se puede observar estos valores se encuentran en el margen de funcionamiento normal del equipo por tanto este aire acondicionado es idóneo para las condiciones planteadas de operación.

El costo energético se estima a continuación, al realizar el cálculo cuantitativo del valor en pesos de la potencia que consumiría esta unidad acondicionadora de aire al retirar el flujo de calor excedente en los recintos.

$$\text{Costo}(\$) = 200 \left( \frac{\$}{\text{KWh}} \right) \cdot W_c(\text{KW}) * t(\text{h}) \quad (57)$$

Teniendo en cuenta que en zonas rurales se considera como estrato 1 o 2, el cobro del [KWh] oscila entre 182,3 y 227,9 pesos, según la comisión de regulación de energía y gas (CREG), se selecciona un valor base de 200 pesos, y el tiempo t de experimentación fue de seis horas durante las sesiones de pruebas, el precio en pesos de la potencia que consume la unidad de acondicionamiento de aire

---

<sup>20</sup> Especificaciones de Aire acondicionado DAITSU ASD18UI-DN. [Catálogo en línea]. Disponible en: <[http://www.daitsu.com/daitsu\\_split\\_pared\\_inverter\\_clasea-ASD18UI-EK](http://www.daitsu.com/daitsu_split_pared_inverter_clasea-ASD18UI-EK)>. [Citado el 3 de diciembre de 2016].

seleccionada en el recinto con techo de concreto y tejas (Costo TTC (\$)), y el recinto con techo verde (Costo TTV (\$)) es:

Costo TTC (\$) = 1536 pesos

Costo TTV (\$) = 972 pesos

Figura 62. Tarifa de energía eléctrica regulada en Colombia para los estratos 1 al 6 en Colombia.

SECTOR RESIDENCIAL NIVEL DE TENSIÓN 1				
ESTRATO (E)	RANGO DE CONSUMO (kWh-mes)	PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh)	PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh)	PROPIEDAD COMPARTIDA (*) (\$/kWh)
E1	0-CS(+)	189,3104	175,2684	182,2894
	Más de CS	437,0180	402,6667	419,8424
E2	0-CS(+)	236,6381	219,0855	227,8618
	Más de CS	437,0180	402,6667	419,8424
E3	0-CS(+)	371,4653	342,2667	356,8660
	Más de CS	437,0180	402,6667	419,8424
E4	Todo consumo	437,0180	402,6667	419,8424
E5	Todo consumo	524,4216	483,2000	503,8109
E6	Todo consumo	524,4216	483,2000	503,8109

ÁREAS COMUNES NIVEL DE TENSIÓN 1		
MODALIDAD (Todo consumo)	PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh)	PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh)
E1	437,0180	402,6667
E2	437,0180	402,6667
E3	437,0180	402,6667
E4	437,0180	402,6667
E5 y E6, Industrial y Comercial	524,4216	483,2000
Exenta de contribución	437,0180	402,6667

(+) CS: Consumo de Subsistencia

Fuente: comisión de regulación de energía y gas (CREG) mayo de 2016.

## 9. CONCLUSIONES

- Se realizó la adecuación de dos recintos construidos con características geométricas similares diferenciándose en la constitución de su techo (uno con techo estándar de placa de concreto con tejas y otro con una cubierta verde) ubicados en la sede UIS Guatiguará que se encontraban en una zona de clima cálido donde se pudieron evaluar las condiciones de poco acceso agua de riego y carencia de conexión a la red eléctrica.
- Se implementó un sistema de monitoreo encargado de medir y registrar las temperaturas de superficies interior y exterior (para techos y paredes) de los recintos, aire (interior y ambiente), radiación solar incidente, velocidad del viento y humedad relativa, requeridos para el estudio y validar los modelos matemáticos.
- Se realizó la modelación térmica para cada recinto con un total de cuatro modelos matemáticos aplicados a las diferentes configuraciones de techos y paredes, en conjunto con el comportamiento térmico del aire en el ambiente interior y externo de los recintos, los cuales fueron validados por medio de la experimentación ejecutada, como lo muestran los resultados obtenidos (temperaturas modeladas) en las figuras 57, 58, 60 y 61, estos presentan concordancia con los datos medidos.
- Se ejecutó el diseño y construcción de una huerta vertical adaptada como pared verde integrando subsistemas de riego por goteo optimizado, obtención de agua mediante un sistema de generación atmosférica de agua (AWG), control mediante una interfaz electrónica en arduino, alimentada por un sistema fotovoltaico, cumpliendo las especificaciones planteadas en el plan del presente proyecto.
- Se realizó una caracterización de las variables ambientales en la zona donde se implementó el prototipo, tales como velocidad del viento, temperatura del ambiente exterior, humedad relativa y horas de luz solar al día.

- Se aprecia una sensible reducción en el calor ganado desde el exterior hacia cada uno de los recintos, cuando se implementó la huerta vertical en ellos. Para la primera sesión de pruebas esta reducción fue de 35,4 % para la configuración del techo verde y la pared verde respecto al calor sensible hallado para el recinto con techo de concreto, y para la segunda sesión de pruebas, se presentó una reducción de 34,3 % para el techo de concreto y la pared verde respecto al recinto con techo verde.
- Se encontró que al utilizar la pared verde en conjunto con un techo de concreto y tejas, se aprecia una reducción de 1 [°C] a pesar de que se hace la comparación de temperaturas con respecto al recinto que ya tenía un techo verde acoplado.
- La mayor reducción de temperatura del ambiente interior promedio se encontró al utilizar la pared verde en conjunto con el techo verde, para este caso la reducción con respecto a la casa de techo de concreto y tejas fue de 4 [°C].
- Se hicieron los ajustes necesarios para realizar una correcta toma de datos, y se obtuvo una validación entre los datos experimentales de temperaturas interiores y los valores modelados con una diferencia neta máxima de 2.1 [°C], y una diferencia promedio de 1.4 [°C], lo que da un error máximo de 2.7% por lo cual se considera el modelo no difiere significativamente del comportamiento real y así se asume como válido.
- Se realizaron los ajustes necesarios al modelo de balance térmico para fachadas verdes propuesto por Tilley<sup>21</sup>, ya que se encontró que las correlaciones expuestas eran erróneas, aunque el planteamiento del balance de energía de los flujos de calor que intervienen en una fachada verde eran consistentes.

---

<sup>21</sup> TILLEY, David; PRICE, Jeff; MATT, Serena; MARROW, Brodie. Muros vegetales: propiedades térmicas y de crecimiento de las estructuras con fachadas verdes. Reporte de investigación, Universidad de Maryland, College park, 2012.

## 10. RECOMENDACIONES

Dadas las dimensiones de las casas prototipo, se debe considerar una toma de datos extensa y con alta resolución para que el criterio de estabilidad por el método de las diferencias finitas sea consistente con la realidad. Por lo cual es necesario implementar un equipo de mayor frecuencia de muestreo de datos meteorológicos para obtener una simulación más cercana a lo real.

La implementación de las cubiertas verdes en este estudio demostró tener un efecto significativo en la reducción de la ganancia térmica de los recintos estudiados, es por ello que se debe continuar la investigación, haciendo uso de otro tipo de métodos de diseño pasivo con el fin de obtener recintos que logren un acondicionamiento de su ambiente interior generando de forma natural protección solar y ventilación adecuada en climas cálidos como el estudiado en este proyecto, para verificar su efectividad en las condiciones planteadas localmente y que beneficios pueden traer estos cambios cuando se implementan en conjunto.

La implementación de un generador de agua atmosférica (A.W.G) para esta aplicación en particular debe replantearse, pues a pesar de haber obtenido una cantidad de agua suficiente para suplir las pérdidas de un sistema de riego pequeño con recirculación, el consumo energético del sistema y el mantenimiento del mismo hacen que resulte poco práctico llevar su aplicación a zonas apartadas sin acceso a agua potable para una vivienda, siendo una mejor solución la implementación de un sistema más robusto y de mayor capacidad para suministrar agua a varias viviendas a la vez.

El coeficiente de Bowen es de suma importancia para el desarrollo de cualquier estudio que involucre la disipación o el intercambio de calor latente por medio de la evapotranspiración. La cuantificación del calor latente perdido o ganado en la arquitectura verde requiere de mayores estudios, mucho más detallados.

## REFERENCIAS

- [1] VIRGOLINI, Agustín, Arquitectura bioclimática. [En línea]. 2015. Disponible en :<<https://www.planetaconstructor.com/noticias/arquitectura-bioclimatica>>. [Citado el 1 de Agosto de 2016]
- [2] CANALES GÁLVEZ, Michel Ignacio, Efectos del uso de techos y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de los edificios. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2014. 95 p.
- [3] NAVARRO PORTILLA, Juan, Los jardines verticales en la edificación. Tesis de maestría en edificación. Valencia, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, 2013, 77 p.
- [4] BASTERRECHEA, Martín. Ten una ventana hidropónica: Windows Farms. [En línea]. 2014 Disponible en: <<http://www.hidroponiacasera.net/windowfarms/>>. [Citado el 12 de Agosto de 2016].
- [5] PARRADO CONTRERAS, Héctor; DÍAZ RIVERO, Juan. Diseño y construcción de un prototipo de generación atmosférica de agua (AWG) accionado mediante energía eólica. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas, 2015.191 p.
- [6] CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones. 4 ed. México, DF: McGraw-Hill, 2011. p. 17-35, 295-308.
- [7] YOGESH, Jaluria y TORRANCE, Kenneth. Computational Heat Transfer. 2nd edition. Waltham Abbey, UK: CRC Press. 2003. 560 p.

[8] GAFFIN, Stuart; ROSENZWEIG, Cynthia; PARSHALL, Lily; BEATTIE, David; BERGHAGE, Robert; O'KEEFEE, Greg; BRAMAN, Dan. Techos verdes en la región metropolitana de Nueva York. Reporte de investigación. Universidad de Columbia, 2006.

[9] DUFFIE, John A, y BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes, 2nd edition. New York: Willey, 1980. 887p.

[10] TILLEY, David; PRICE, Jeff; MATT, Serena; MARROW, Brodie. Muros vegetales: propiedades térmicas y de crecimiento de las estructuras con fachadas verdes. Reporte de investigación, Universidad de Maryland, College park, 2012. 163 p.

[11] RUIZ BERNAL, Karen Alexandra. Análisis multidimensional de la influencia del techo en el comportamiento térmico del interior de recintos. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas, 2015. 171 p.

[12] CONTRERAS, Sergio; REY, Daniela. Diseño y construcción de un prototipo de un colector solar híbrido (Térmico y Fotovoltaico). Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas, 2014. 288 p.

## BIBLIOGRAFÍA

- BASTERRECHEA, Martín. Ten una ventana hidropónica: Windows Farms. [En línea]. 2014 Disponible en: <<http://www.hidroponiacasera.net/windowfarms/>>. [Citado el 12 de Agosto de 2016].
- CANALES GÁLVEZ, Michel Ignacio, Efectos del uso de techos y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de los edificios. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2014. 95 p.
- CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones. 4 ed. México, DF: McGraw-Hill, 2011. p. 17-35, 295-308.
- CONTRERAS, Sergio; REY, Daniela. Diseño y construcción de un prototipo de un colector solar híbrido (Térmico y Fotovoltaico). Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas, 2014. 288 p.
- DUFFIE, John A, y BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes, 2nd edition. New York: Willey, 1980. 887p.
- GAFFIN, Stuart; ROSENZWEIG, Cynthia; PARSHALL, Lily; BEATTIE, David; BERGHAGE, Robert; O'KEEFEE, Greg; BRAMAN, Dan. Techos verdes en la región metropolitana de Nueva York. Reporte de investigación. Universidad de Columbia, 2006.
- NAVARRO PORTILLA, Juan, Los jardines verticales en la edificación. Tesis de maestría en edificación. Valencia, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, 2013, 77 p.

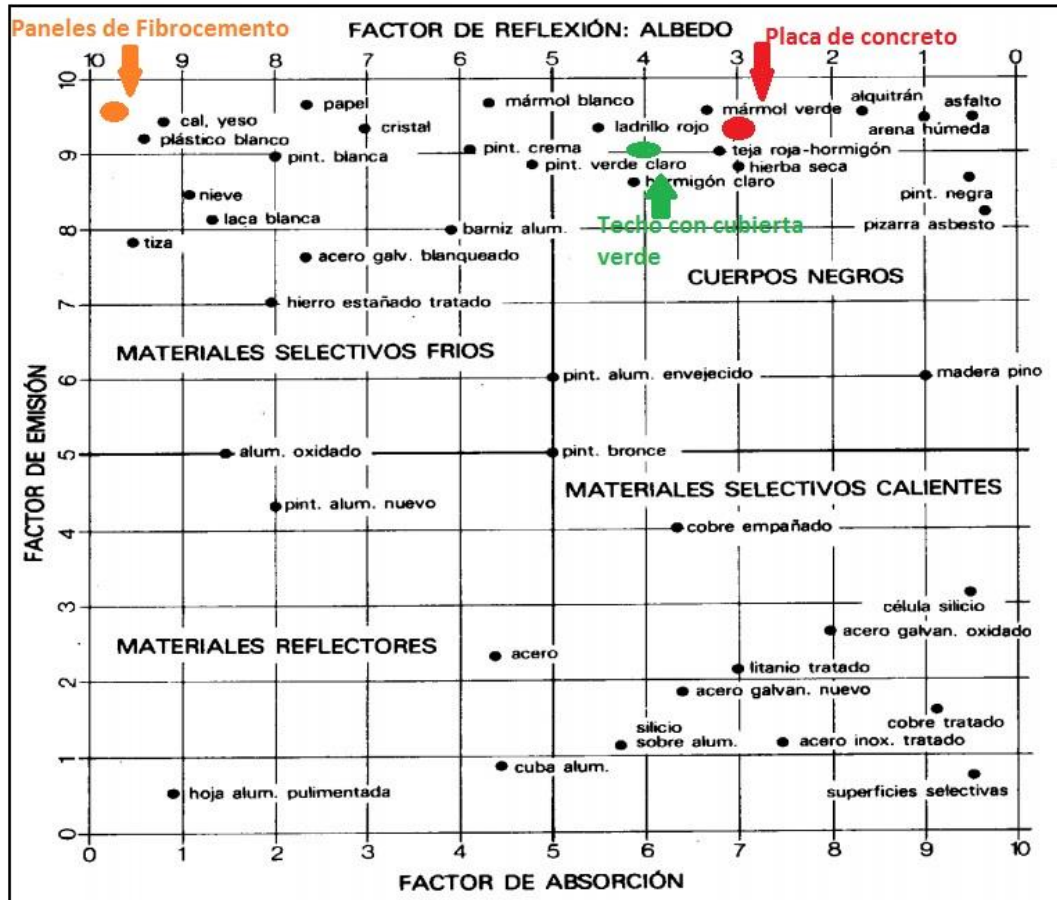
- PARRADO CONTRERAS, Héctor; DÍAZ RIVERO, Juan. Diseño y construcción de un prototipo de generación atmosférica de agua (AWG) accionado mediante energía eólica. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas, 2015.191 p
- RUIZ BERNAL, Karen Alexandra. Análisis multidimensional de la influencia del techo en el comportamiento térmico del interior de recintos. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas, 2015. 171 p.
- TILLEY, David; PRICE, Jeff; MATT, Serena; MARROW, Brodie. Muros vegetales: propiedades térmicas y de crecimiento de las estructuras con fachadas verdes. Reporte de investigación, Universidad de Maryland, College park, 2012.163 p.
- YOGESH, Jaluria y TORRANCE, Kenneth. Computational Heat Transfer. 2nd edition. Waltham Abbey, UK: CRC Press. 2003. 560 p.
- VIRGOLINI, Agustín, Arquitectura bioclimática. [En línea]. 2015. Disponible en: <<https://www.planetaconstructor.com/noticias/arquitectura-bioclimatica>>. Citado el 1 de Agosto de 2016]

## ANEXOS

### ANEXO A: DATOS DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LOS RECINTOS.

#### PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE MATERIALES Y COMPONENTES CONSTRUCTIVOS

Denominación	Conductividad W/m°C	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Calor específico J/kg°C	Cap. Calorífica KJ/m <sup>3</sup> °C	Difusividad 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
<b>PANELES COMUNES</b>					
Panel de fibrocemento	0.12	1161	1512	1058	0.11
Panel de asbesto cemento	0.36	700	1050	735	0.49
Panel de cartón yeso	0.16	950	840	798	0.20
Panel de cartón yeso con perlita	0.18	800	817	654	0.28
Panel de fibra de vidrio	0.035	25	1000	25	1.40
Panel de corcho	0.042	120	1500	180	0.23



Fuente: Techos verdes en la región metropolitana de Nueva York. Reporte de investigación [8]

## ANEXO B: DATASHEET DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA FLIR SERIE E4. FLIR E4



### Imaging and optical data

IR resolution	80 × 60 pixels
MSX resolution	320 × 240 pixels
Thermal sensitivity/NETD	<0.15°C (0.27°F) / <150 mK
Field of view (FOV)	45° × 34°
Minimum focus distance	0.5 m (1.6 ft.)
Spatial resolution (IFOV)	10.3 mrad
Image frequency	9 Hz
Focus	Focus free

### Measurement

Object temperature range	-20°C to +250°C (-4°F to +482°F)
Accuracy	±2°C (±3.6°F) or ±2% of reading, for ambient temperature 10°C to 35°C (+50°F to 95°F) and object temperature above +0°C (+32°F)

### Measurement analysis

Spotmeter	Center spot
Emissivity correction	Variable from 0.1 to 1.0
Emissivity table	Emissivity table of predefined materials
Reflected apparent temperature correction	Automatic, based on input of reflected temperature

### Environmental data

Operating temperature range	-15°C to +50°C (+5°F to +122°F)
Storage temperature range	-40°C to +70°C (-40°F to +158°F)
Humidity (operating and storage)	IEC 60068-2-30/24 h 95% relative humidity

## ANEXO C: DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA. (A.W.G).

### DATOS FÍSICOS CONSTRUCTIVOS

$$A_o = 2 \cdot \pi \cdot R_{ext} \cdot Long$$

$$A_r = 2 \cdot \pi \cdot R_{int} \cdot Long$$

$$R_{ext} = \frac{7,9375}{2 \cdot 1000}$$

$$e = \frac{0,762}{1000}$$

$$R_{int} = R_{ext} - e$$

$$K_m = 209,3$$

$$Long = 4,2$$

$$D_i = \frac{6,4135}{1000}$$

$$D_{ext} = \frac{7,9375}{1000}$$

### DATOS GEOMÉTRICOS

$$St = 0,0254$$

$$Sl = St$$

$$Sd = St$$

$$Ad = Sd - D_{ext}$$

$$At = St - D_{ext}$$

### DATOS AIRE DE ENTRADA

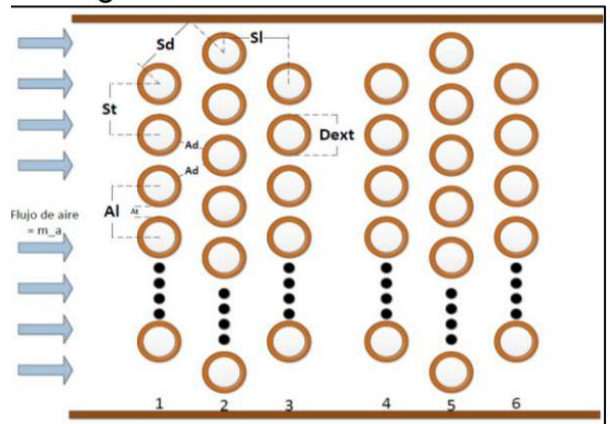
$$m_r = 0,006865$$

$$m_a = \frac{Q \cdot \rho_{aire}}{3600}$$

$$Q = 400 \text{ [m}^3/\text{hora]}$$

$$\rho_{aire} = \rho (AIRH20 ; T = T_m ; B = T_{bh_{a1}} ; P = P_1)$$

### Características Banco de Tubos.



$$T_m = \frac{T_{a1} - T_{bh_{a2}}}{2}$$

$$T_{bh_{a2}} = 22 \text{ Paso 1}$$

$$P_1 = 90,6$$

$$T_{a1} = 26$$

$$T_{a2} = 16$$

$$r_{h_{a1}} = 0,8$$

$$r_{h_{a2}} = 1 \text{ Vinculado al paso 2}$$

$$T_{bh_{a1}} = WB (AIRH20 ; T = T_{a1} ; R = r_{h_{a1}} ; P = P_1)$$

### CÁLCULO DE RESISTENCIAS

#### RESISTENCIA DEL MATERIAL HUMEDO

$$R_{mw} = \frac{e}{K_m \cdot A_r}$$

## RESISTENCIA DEL REFRIGERANTE

$$R_r = \frac{1}{h_r \cdot A_r}$$

$$h_r = \frac{0,023 \cdot R_{er}^{0,8} \cdot P_{rg}^{0,4} \cdot K_g}{D_i}$$

$$P_{rg} = Pr (R134a ; T = Tr1 ; x = 1)$$

$$K_g = k (R134a ; T = Tr1 ; x = 1)$$

$$R_{er} = \frac{Gr \cdot D_i}{\nu_r}$$

$$Gr = \frac{m_r \cdot 4}{\rho_{hor} \cdot \pi \cdot D_i^2}$$

$$\rho_{hor} = \rho (R134a ; T = Tr1 ; x = 1)$$

$$\nu_r = \text{KinematicViscosity} (R134a ; T = Tr1 ; x = 1)$$

$$R_{aw} = \frac{1}{h_o \cdot A_{total} \cdot \eta_{sup}}$$

$$Nusdf = \frac{haseco \cdot D_{ext}}{K_{aire}}$$

$$K_{aire} = k (Air_{ha} ; T = T_m ; P = P1)$$

$$ReD = \frac{\rho_{aire} \cdot V_{max} \cdot D_{ext}}{\nu_{air}}$$

$$\nu_{air} = \text{Visc} (AIRH2O ; T = T_m ; B = T_{bh_{a1}} ; P = P1)$$

$$V_{max} = \left[ \frac{St}{St - D_{ext}} \right] \cdot V$$

$$V = \frac{Q}{A_{proy} \cdot 3600}$$

$$A_{proy} = 0,036$$

$$Nusdf = C \cdot ReD^m \cdot Pr^n \cdot \left[ \frac{Pr}{Pr_s} \right]^{0,25}$$

$$Pr = Pr (Air_{ha} ; T = T_m ; P = P1)$$

$$Pr_s = Pr (Air_{ha} ; T = T_{sm} ; P = P1)$$

$$C = 0,27$$

$$m = 0,63$$

$$n = 0,36$$

$$haseco = h_o$$

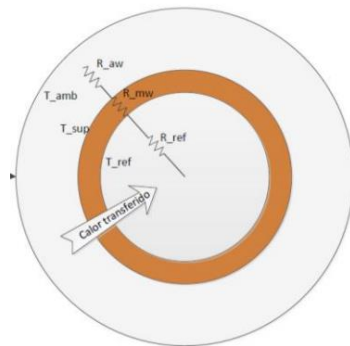
$$T_{sm} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{2}$$

$$Q_{total} = m_a \cdot (h_{a1} - h_{a2}) \quad \text{PASO 3}$$

$$Tr1 = 1 \quad \text{PASO 4}$$

$$Tr2 = Tr1$$

Calculo de resistencias.



## RESISTENCIA DEL AIRE HUMEDO

$$T_{sb} = DP (AIRH2O ; T = T_{a1} ; R = rh_{a1} ; P = P1)$$

$$h_{ab} = h (AIRH2O ; T = T_{sb} ; R = 1 ; P = P1)$$

## DEL ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE ALETEADA

$$\eta_{aleta} = 0,95$$

$$\eta_{sup} = 0,9587$$

$$A_{total} = 0,5043$$

**PASO 2: CALCULAMOS ENTALPIA ha2**

$$h_{a1} = h ( \text{AIRH2O} ; T = Ta1 ; R = rh_{a1} ; P = P1 )$$

$$h_{a2} = h ( \text{AIRH2O} ; T = Tbh_{a2} ; R = rh_{a2} ; P = P1 )$$

$$C_{eva} = \frac{R_{mw} + R_r}{C_{pair} \cdot R_{aw}} \quad \text{PASO 5}$$

$$C_{pair} = C_p ( \text{Air}_{ha} ; T = Tm ; P = P1 )$$

$$C_{323} = \frac{T_{s1} - T_{r1}}{h_{a2} - h_{s1}} \quad \text{PASO 6}$$

$$C_{324} = \frac{T_{s2} - T_{r2}}{h_{a1} - h_{s2}} \quad \text{PASO 7}$$

**TEMPERATURAS DE SUPERFICIE**

$$T_{s1} = 13,7$$

$$h_{s1} = h ( \text{AIRH2O} ; T = T_{s1} ; R = 1 ; P = P1 )$$

$$T_{s2} = 14,5$$

$$h_{s2} = h ( \text{AIRH2O} ; T = T_{s2} ; R = 1 ; P = P1 )$$

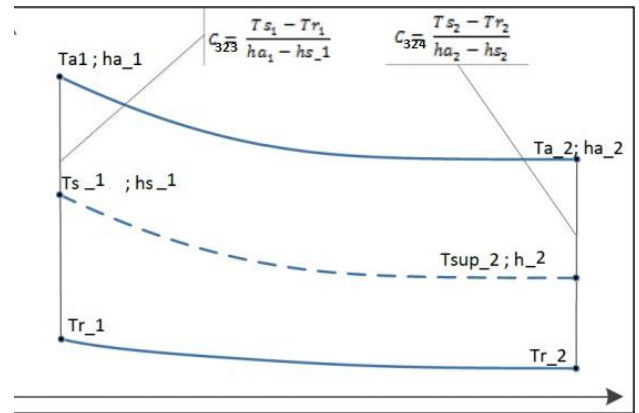
$$Q_{totalLMHD} = \frac{h_o \cdot A_o}{C_{pair}} \cdot LMHD \quad \text{PASO 8}$$

$$a = | h_{a1} - h_{s2} |$$

$$b = | h_{a2} - h_{s1} |$$

$$LMHD = \frac{a - b}{\ln \left[ \frac{a}{b} \right]}$$

Los pasos 5, 6 y 7 consisten en hacer variar la temperatura Ts2 hasta que Ceva sea aproximadamente igual a C323 y luego de que se cumpla, se hacer variar la temperatura Ts1 hasta que Ceva sea aproximadamente igual a C324.



$$\frac{1}{UA} = R_{mw} + R_r + R_{aw}$$

$$NTU = \frac{UA}{m_a \cdot C_{pair}}$$

$$ef = 1 - \exp(-NTU) \quad \text{PASO 9}$$

$$ef = \frac{h_{a1} - h_{a2}}{h_{a1} - h_{sts}} \quad \text{PASO 10}$$

$$h_{sts} = h ( \text{AIRH2O} ; T = T_s ; R = 1 ; P = P1 )$$

$$ef = \frac{T_{a1} - T_{a2r}}{T_{a1} - T_s} \quad \text{PASO 11}$$

$$w1 = \omega ( \text{AIRH2O} ; T = Ta1 ; B = Tbh_{a1} ; P = P1 )$$

$$w2 = \omega ( \text{AIRH2O} ; T = Ta2 ; B = Tbh_{a2} ; P = P1 )$$

$$Q_s = m_a \cdot C_{pair} \cdot ( Ta1 - Ta2 )$$

$$Q_l = m_a \cdot [ | w1 - w2 | ] \cdot h_{fg}$$

$$Q_{total} = Q_s + Q_l$$

$$Q_l = \text{MAGUA} \cdot h_{fg}$$

$$\text{Agua} = \text{MAGUA} \cdot 3600$$

## Resultados:

- **Chequeo de Constantes:**

$$C_{324} = 0,0001197 \quad C_{323} = 0,0001136$$

$$C_{eva} = 0,0001156$$

- **Chequeo de Calores: (Máxima aproximación Posible)**

$$Q_{total} = 627,4 \quad Q_{totalLMHD} = 489,9$$

- **Cantidad de agua condensada en [kg], en una Hora (según cálculos) para una humedad relativa estable del 80 %.**

$$Agua = 1,003$$

El anterior procedimiento del diseño y simulación de un sistema de generación de agua atmosférica A.W.G. siguió la metodología y los términos expuestos en el proyecto Diseño y construcción de un prototipo de generación atmosférica de agua (AWG) accionado mediante energía eólica, Realizado por PARRADO CONTRERAS, Héctor; DÍAZ RIVERO, Juan. En el año 2015 en el cual se expone el análisis termodinámico y de transferencia de calor para las unidades evaporadoras y deshumidificadoras. Páginas 85-128

**ANEXO D: DATOS METEOROLÓGICOS PROMEDIO DE LA UBICACIÓN DE  
LOS RECINTOS.**

	Temperatura ambiente [k]	Velocidad del viento [m/s]	Radiación total [W/m <sup>2</sup> k]
12:00 a. m.	294,79	0,08	0,00
1:00 a. m.	294,03	0,15	0,00
2:00 a. m.	293,71	0,09	0,00
3:00 a. m.	293,41	0,05	0,00
4:00 a. m.	293,17	0,03	0,00
5:00 a. m.	292,82	0,04	110,41
6:00 a. m.	292,92	0,08	370,14
7:00 a. m.	294,68	0,18	574,2
8:00 a. m.	297,42	0,35	780,86
9:00 a. m.	299,67	0,78	882,33
10:00 a. m.	301,63	0,96	914,91
11:00 a. m.	303,08	1,35	930,54
12:00 p. m.	303,38	2,10	785,17
1:00 p. m.	303,09	1,94	830,4
2:00 p. m.	302,50	1,78	593,01
3:00 p. m.	301,77	1,63	496,93
4:00 p. m.	300,52	1,22	185,8
5:00 p. m.	299,42	0,83	41,34
6:00 p. m.	297,66	0,43	13,51
7:00 p. m.	297,38	0,11	0,00
8:00 p. m.	296,97	0,09	0,00
9:00 p. m.	296,31	0,17	0,00
10:00 p. m.	295,79	0,15	0,00
11:00 p. m.	295,30	0,05	0,00

## ANEXO E: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE TARJETA ARDUINO MEGA 2560.

### Technical specs

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

## ANEXO F: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN EN ARDUINO PARA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

- Configuración de variables de entrada y librerías.

```
#include "Timer.h"
#include <Wire.h>
#include "Wire.h"
#include<SPI.h> //Load SPI Library
#include <DS3231.h>
#include <SD.h> //Load SD card library
DS3231 clock;
RTCDateTime dt;
String SetPump1;
String SetPump2;
String SetPump3;
String SetPump4;
String SetPump5;
String SetPump6;
String horaPump1;
String horaPump2;
String horaPump3;
String horaPump4;
String horaPump5;
String horaPump6;
String minutoPump;
String SetComp;
String Hora;
String Temp;
String serialTimePump;
String serialTimeComp;
int humIn1 = A0;
int humIn2 = A1;
int humIn3 = A2;
Timer t;

int chipSelect = 4;
File mySensorData;
int Pump = 2;
int Comp=3;
int TimePump;
int TimeComp;
```

- **Función de configuración para los tiempos de encendido y apagado del Compresor del AWG y la Bomba del sistema de riego.**

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  clock.begin();
  SD.begin(4);
  clock.setDateTime(__DATE__, __TIME__);
  pinMode (10, OUTPUT);
  pinMode (Pump, OUTPUT);
  pinMode (Comp, OUTPUT);
  pinMode (humIn1, INPUT);
  pinMode (humIn2, INPUT);
  pinMode (humIn3, INPUT);

  Serial.println("Seleccione la hora de encendido del compresor (HH:mm:ss): ");
  while(Serial.available()==0){}
  SetComp = Serial.readString();
  Serial.println("La hora de encendido del compresor es:  "+SetComp);
  Serial.println("");

  Serial.println("seleccione el minuto de encendido de la bomba (0-59): ");
  while(Serial.available()==0){}
  minutoPump= Serial.readString();
  Serial.println("");

  Serial.println("seleccione la primera hora de encendido de la bomba (0-23): ");
  while(Serial.available()==0){}
  horaPump1 = Serial.readString();
  SetPump1 = horaPump1+" "+minutoPump+":00";
  Serial.println("La primera hora de encendido de la bomba es:  "+SetPump1);

  Serial.println("seleccione la segunda hora de encendido de la bomba (0-23): ");
  while(Serial.available()==0){}
  horaPump2 = Serial.readString();
  SetPump2 = horaPump2+" "+minutoPump+":15";
  Serial.println("La segunda hora de encendido de la bomba es:  "+SetPump2);
  Serial.println("");

  Serial.println("seleccione la tercera hora de encendido de la bomba (0-23): ");
  while(Serial.available()==0){}
  horaPump3 = Serial.readString();
  SetPump3 = horaPump3+" "+minutoPump+":27";
  Serial.println("La tercera hora de encendido de la bomba es:  "+SetPump3);
  Serial.println("");
}

```

```

Serial.println("seleccione la cuarta hora de encendido de la bomba (0-23): ");
while(Serial.available()==0){}
horaPump4 = Serial.readString();
SetPump4 = horaPump4+": "+minutoPump+":35";
Serial.println("La cuarta hora de encendido de la bomba es: "+SetPump4);
Serial.println("");

Serial.println("seleccione la quinta hora de encendido de la bomba (0-23): ");
while(Serial.available()==0){}
horaPump5 = Serial.readString();
SetPump5 = horaPump5+": "+minutoPump+":48";
Serial.println("La quinta hora de encendido de la bomba es: "+SetPump5);
Serial.println("");

Serial.println("seleccione la sexta hora de encendido de la bomba (0-23): ");
while(Serial.available()==0){}
horaPump6 = Serial.readString();
SetPump6 = horaPump6+": "+minutoPump+":59";
Serial.println("La sexta hora de encendido de la bomba es: "+SetPump6);
Serial.println("");

Serial.println ("Seleccione la duracion de encendido de la bomba en minutos");
while(Serial.available()==0){}
TimePump = Serial.parseInt();
serialTimePump = String(TimePump);
Serial.println("La bomba se encendera durante: "+serialTimePump+" minutos");
Serial.println("");

Serial.println ("Seleccione la duracion de encendido del compresor en minutos");
while(Serial.available()==0){}
TimeComp = Serial.parseInt();
serialTimeComp = String(TimeComp);
Serial.println("El compresor se encendera durante: "+serialTimeComp+" minutos");
Serial.println("");

t.every(1000, takeReading);
t.every(1000, takeDateTime);
t.every(1000, checkComp);
t.every(1000, checkPump);
}

```

- Programación Funcional de cada una de las tareas asignadas a la variable t. (Actualizar t, Tomar y guardar una lectura de los sensores, Tomar la hora de la lectura, y verificar condiciones de encendido y apagado del compresor y de la bomba.)

```

void loop()
{
  t.update();
}

void takeReading()
{
  mySensorData= SD.open("humDATA.txt", FILE_WRITE);
  if (mySensorData) {
    Serial.print(analogRead(humIn1));
    Serial.print(",");
    Serial.print(analogRead(humIn2));
    Serial.print(",");
    Serial.print(analogRead(humIn3));
    Serial.print(",");
    Serial.print(Temp);
    Serial.print(",");

    mySensorData.print(analogRead(humIn1));
    mySensorData.print(",");
    mySensorData.print(analogRead(humIn2));
    mySensorData.print(",");
    mySensorData.print(analogRead(humIn3));
    mySensorData.print(",");
    mySensorData.print(Temp);
    mySensorData.print(",");
    mySensorData.println(Hora);
    mySensorData.close();

  }

void takeDateTime()
{
  dt = clock.getDateTime();
  Hora=clock.dateFormat("H:i:s",dt);
  Temp= clock.readTemperature();
  Serial.println (Hora);
}

```

```
void checkComp() {  
  
    if (SetComp == Hora) {  
        t.pulse(Comp, TimeComp*1000, LOW);  
    }  
}  
  
void checkPump() {  
    if (Hora==SetPump1 || Hora == SetPump2 || Hora==SetPump3 || Hora==SetPump4 || Hora==SetPump5 || Hora==SetPump6) {  
        t.pulse(Pump, TimePump*1000, LOW);  
    }  
}
```

## ANEXO G: ESQUÉMA ELECTRÓNICO DE LA UNIDAD DE CONTROL DE RIEGO BASADA EN ARDUINO 2560

