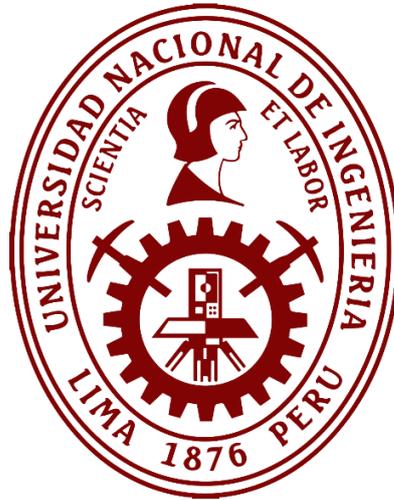


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

**“EVALUACIÓN TÉRMICA DE LAS MEJORAS SUCESIVAS DEL
AISLAMIENTO DE DOS MÓDULOS EXPERIMENTALES DE
VIVIENDA (MEVs) UBICADOS EN EL CENTRO POBLADO
DE IMATA (4519 MSNM), AREQUIPA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FÍSICO**

ELABORADA POR:

MARTÍN CONCEPCIÓN PONCE GONZALES

ASESORA:

DRA. MÓNICA MARCELA GÓMEZ LEÓN

LIMA – PERÚ

2022

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de tesis es el resultado de sacrificio, dedicación, esfuerzo, motivación, perseverancia y el apoyo de muchas personas que gracias a ellas no podría haberme instruido ni culminar este proyecto.

Mi agradecimiento más profundo a mi asesora, la Dra. Mónica Marcela Gómez León, por brindarme la oportunidad de realizar mi tesis, por su apoyo y empuje para culminar, por su paciencia y compartir su experiencia y sabiduría.

Al profesor Manfred Horn, por compartir sus conocimientos, experiencias, sabiduría y conceptos en Física.

A mi madre María, por brindarme todo su apoyo incondicional y su motivación para cumplir metas en la vida.

A mi abuelito Simeón, que siempre me apoyó y aconsejó para poder superarme en la vida.

A mi familia, en especial a mis tíos, Juan y su esposa Ana, que me ven como un hijo más en su familia y me siguen brindando su apoyo.

A mis amigos, en especial, a Juan y a mi compañero de estudios Pablo, que me brindaron su apoyo en el conocimiento de nuevos aprendizajes que me ayudó a seguir con mi tesis.

Al padre Franz por permitirme quedarme en el albergue, las personas que conocí y me brindaron su apoyo durante mi estancia en Imata para realizar mi trabajo de campo experimental.

A mi alma máter, la Universidad Nacional de Ingeniería, por el conocimiento brindado y las herramientas principales para lograr ser un profesional.

Finalmente, este trabajo ha contado con la financiación del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC), por medio del Convenio 024-2016-FONDECYT: “Desarrollo de materiales y dispositivos para la aplicación de estrategias renovables y medioambientales que permitan el suministro de energía y agua para una vivienda rural sostenible”, y el Contrato 04-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU: “Desarrollo de sistemas de calefacción solar para zonas Altoandinas como una opción energética sostenible para mejorar la calidad de vida de los pobladores”.

RESUMEN

La tesis comprende la evaluación de los datos experimentales, que se registraron por cada cambio en las modificaciones sucesivas de las envolventes de dos módulos experimentales de vivienda (MEV1 y MEV2), que se construyeron de acuerdo con la tipología de las viviendas del centro poblado de Imata (Arequipa). Dicha evaluación ha ido acompañada con la simulación del comportamiento térmico de los MEVs, para entender sus comportamientos energéticos, y cuantificar las pérdidas de energía al mejorar el aislamiento de las envolventes, así como determinar la ganancia solar pasiva de diferentes componentes bioclimáticos incorporados.

Los MEVs se encuentran ubicados en el centro poblado de Imata, a 4 519 msnm, distrito de San Antonio de Chuca, provincia de Caylloma, región Arequipa, considerada una de las zonas más frías de la región. Sin embargo, recibe una gran irradiancia solar que, en promedio es mayor a $6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$. En los MEVs se introdujeron diferentes modificaciones en las envolventes como, cambio en el techado, enlucido de yeso en las paredes, instalación de claraboyas, instalación de falso techo y construcción de invernadero adosado al módulo, entre otras modificaciones. Todos los cambios se desarrollaron de forma sucesiva y durante todo el proceso, se monitoreó el comportamiento de las temperaturas al interior de los MEVs, así como parámetros meteorológicos de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento y radiación solar. Por cada modificación realizada en las envolventes se simuló su comportamiento energético empleando los programas *SketchUp*, *OpenStudio* y *EnergyPlus*. Para el registro de datos climatológicos en Imata, se utilizó una estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 Plus, para la toma de datos al interior de los módulos se utilizaron sensores de temperatura Pt100, micro estaciones U12-012 y registradores de datos U12-006 de la marca Hobo. Para las simulaciones, las propiedades termofísicas de los materiales, se tomaron de la Norma Técnica Peruana EM.110.

Por medio del uso de las técnicas de aislamiento pasivo y captación solar, aplicados en los MEVs, se obtuvieron incrementos de temperatura en su interior, para el MEV1 fue de $6,8 \text{ }^\circ\text{C}$ y para el MEV2 fue de $11,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos incrementos de temperatura tuvieron como referencia la temperatura de la construcción inicial del módulo denominada vivienda típica, semejante a las viviendas del lugar. Se obtuvo que el invernadero adosado al MEV2, permitió alcanzar un incremento de temperatura de $5,2 \text{ }^\circ\text{C}$ con respecto al MEV1. Considerando una temperatura neutra para los pobladores de Imata de $15 \text{ }^\circ\text{C}$, la energía requerida para el MEV1 y el MEV2 sería de $14,2 \text{ kWh}\cdot\text{día}^{-1}$ y $10,2 \text{ kWh}\cdot\text{día}^{-1}$, respectivamente, valores que contrastan con el caso de la energía requerida para el módulo típico que sería de $38,7 \text{ kWh}\cdot\text{día}^{-1}$.

ABSTRACT

The thesis comprises the evaluation of the experimental data, which were recorded for each change in the successive modifications of the envelopes of two experimental housing modules (MEV1 and MEV2), which were built according to the typology of the Imata village (Arequipa). The evaluation has been performed as well as the thermal simulation of the MEVs, to understand their energy behavior, and quantify the energy gain due to the improvement of the envelope's insulation, also to calculate the passive solar gain of the different installed bioclimatic components.

The MEVs are located in Imata Village, at 4 519 masl, District of San Antonio de Chuca, Province of Caylloma, Arequipa Region. This village is considered one of the coldest in the region. However, it receives great solar irradiance that, on average, is greater than $6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$. In the MEVs, different modifications were made to the envelopes, such as the change in the roof, plastering addition on the walls, installation of skylights, installation of a false ceiling, and the construction of a greenhouse attached to the module, among other modifications. All the changes were made successively and through all the processes, the indoor temperatures of the MEVs were monitored, as well as meteorological parameters like temperature, humidity, wind speed and direction, and solar radiation. For each modification made to the envelopes, the temperature and their energy behavior were simulated using the SketchUp, OpenStudio, and EnergyPlus programs. The climatological data in Imata was registered with a Davis Vantage Pro 2 Plus meteorological station, while the data inside the modules were measured and registered with Pt100 temperature sensors, U12-012 Hobo micro stations, and U12-006 Hobo data loggers. For the simulations, the thermophysical properties of the materials were taken from the Peruvian Technical Standard EM.110.

Through envelope isolation and solar passive gain applied in the MEVs, the temperature increment in MEV1 was $6.8 \text{ }^\circ\text{C}$ and in MEV2 was $11.5 \text{ }^\circ\text{C}$ compared to the initial construction of the module called typical dwelling built according to the typology of the Imata village. It was determined that the greenhouse attached to MEV2, allowed to obtain a temperature increase of $5.2 \text{ }^\circ\text{C}$ with respect to MEV1. Considering $15 \text{ }^\circ\text{C}$ as a neutral temperature for the inhabitants of Imata, the energy required for MEV1 and MEV2 would be $14.2 \text{ kWh}\cdot\text{day}^{-1}$ and $10.2 \text{ kWh}\cdot\text{day}^{-1}$, respectively. Those values contrast with the case of the energy required for the typical module that would be $38.7 \text{ kWh}\cdot\text{day}^{-1}$.

PRÓLOGO

En la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) se han desarrollado proyectos de investigación en el ámbito bioclimático en las zonas Altoandinas desde hace más de 10 años, y como resultado (en términos de tesis de titulación y grados académicos) se han obtenido tres tesis de título profesional¹ y tres tesis para optar el grado de maestro en ciencias.² Adicionalmente, con el objetivo de entender los procesos de intercambio energético en las viviendas o módulos en estudio, se han desarrollado estudios de las propiedades térmicas de materiales usados en las viviendas, como resultado de ello se han sustentado cuatro tesis de título profesional.³

Esta tesis se encuentra enmarcada en el campo de investigación bioclimática orientada al aprovechamiento pasivo de la energía solar, dado que dicha energía es abundante en las localidades ubicadas por encima de los 3 500 msnm. Y su principal contribución es la de brindar elementos técnicos, indispensables, para el diseño e implementación de viviendas bioclimáticas y sostenibles, para los habitantes de las zonas rurales Altoandinas. Diseños de viviendas que puedan ser, acertadamente, implementadas por planes de masificación desarrollados por el Gobierno Peruano o por Organismos No Gubernamentales (ONGs).

Este trabajo ha contado con la financiación del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC), por medio del Convenio 024-2016-FONDECYT y el Contrato 04-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU: “Desarrollo de sistemas de calefacción solar para zonas Altoandinas como una opción energética sostenible para mejorar la calidad de vida de los pobladores.”

Parte de este trabajo también ha sido presentado en:

- *ISES Solar World Congress 2019* (ISES, *International Solar Energy Society*), desarrollado en Chile (04 al 07 noviembre): *Towards a sustainable bioclimatic approach for the Peruvian high Andean rural area: Evaluation of the thermal contribution of a greenhouse attached to a dwelling* (<http://proceedings.ises.org/paper/swc2019/swc2019-0037-MolinaFuertes.pdf>).
- Simposio Peruano de Energía Solar 2020 “Heinrich Berg”, organizado virtualmente por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (16 al 20 noviembre): Evaluación térmica de modificaciones en las envolventes de módulos experimentales ubicados en el centro poblado de Imata (4 519 msnm), Arequipa, (<http://xxviispesarequipa.perusolar.org/wp-content/uploads/2021/02/4-Martin-Ponce-resumen.pdf>).
- Revista TECNIA: Evaluación térmica de modificaciones en las envolventes de módulos experimentales ubicados en el centro poblado de Imata (4 519 msnm), Arequipa, (<http://www.revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/1106/1706>).

¹ Tesis de pregrado: Huaylla, Fredy (2010), Saavedra, Gonzalo (2014) y Molina, Juan (2018).

² Tesis de maestría: Espinoza, Rafael (2014), Molina, Jessica (2016) y Molina, Juan (2017).

³ Tesis de pregrado: Piñas, Mc Joshua (2018), Espinoza, Frank (2020), Cuenca, Martín (2020) y Mendoza, Marco (2021).

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
PRÓLOGO.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Justificación.....	4
1.5 Metodología.....	4
1.6 Antecedentes	6
1.6.1 Internacionales.....	6
1.6.2 Nacionales	9
II. EL CLIMA Y EL BIENESTAR TÉRMICO	15
2.1 Clima en el Perú	15
2.2 Clima de la Región Altoandina	16
2.3 Bienestar térmico.....	18
2.3.1 Factores que influyen en el bienestar térmico	19
2.3.2 Modelos existentes de bienestar térmico	20
III. TÉCNICAS BIOCLIMÁTICAS EMPLEADAS EN ZONAS ALTOANDINAS.....	23
3.1 Piso	23
3.2 Muros.....	25
3.3 Techo	26
3.4 Puertas y ventanas	29
3.5 Invernadero adosado.....	30

IV.	CÁLCULO DE LA TEMPERTURA EN LA SIMULACIÓN.....	33
4.1	Transferencias de energía térmica.....	33
4.2	Programas de simulación empleados.....	34
4.3	Ecuaciones usadas por el programa <i>EnergyPlus</i>	35
V.	IMATA.....	43
5.1	Clima.....	45
5.2	Parámetros socioeconómicos de la población.....	52
5.3	Tipología de las viviendas.....	53
VI.	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONITOREO DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD DE LOS MEVs.....	56
6.1	Construcción y plan de mejoras sucesivas de las envolventes de los MEVs... ..	56
6.2	Diseño de los MEVs.....	60
6.3	Instrumentación de los MEVs.....	62
6.3.1	Equipos utilizados.....	63
6.3.2	Ubicación de los sensores.....	63
VII.	RESULTADOS DE LA MODIFICACIÓN Y SIMULACIÓN SECUENCIAL DE LOS CAMBIOS EN LAS ENVOLVENTES DE LOS MEVs.	68
7.1	Comportamiento térmico experimental y simulado para las envolventes.....	68
7.2	Análisis energético de las diferentes configuraciones en las envolventes de los MEVs.....	103
VIII.	CONCLUSIONES.....	105
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
	ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Zonificación climática del Perú según Rayter-Zúñiga [22].	15
Tabla 2. Factores y parámetros que determinan el bienestar térmico [34]......	19
Tabla 3. Valores de b y m para los modelos de bienestar térmico [36].....	22
Tabla 4. Tipología de las viviendas en el centro poblado de Imata [33].	54
Tabla 5. Cambios sucesivos en las envolventes de los MEV de acuerdo con las fechas indicadas.	56
Tabla 6. Detalle de las modificaciones secuenciales de las envolventes de los MEVs..	59
Tabla 7. Tabla de las interacciones entre el invernadero y el MEV2, mediante la configuración de ventana o puerta cerrada o abierta o solo uno de ellos abierto y la otra cerrada en el horario de 8:00 a 16:00 horas.	76
Tabla 8. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes.	96
Tabla 9. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes.	97
Tabla 10. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes, para los días del 2 al 4 de diciembre.	98
Tabla 11. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes, para los días del 5 al 6 de diciembre.	99
Tabla 12. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes, para los días del 7 al 9 de diciembre.	99
Tabla 13. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes, para los días del 10 al 12 de diciembre.	99
Tabla 14. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes, para los días del 2 al 4 de diciembre.	100
Tabla 15. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes, para los días del 5 al 6 de diciembre.	101
Tabla 16. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes, para los días del 7 al 9 de diciembre.	101
Tabla 17. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes, para los días del 10 al 12 de diciembre.	101
Tabla 18. Valores de la demanda energética de calefacción para los MEVs.	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema de las técnicas bioclimáticas aplicadas en la presente tesis en los MEVs, ubicados en el centro poblado de Imata.....	6
Fig. 2. Región norte de la Patagonia Andina, Argentina: (a) vista del interior del invernadero y (b) vivienda en estudio con el invernadero adosado con dirección hacia el norte [15].	7
Fig. 3. Tecnologías bioclimáticas implementadas: (a) muro Trombe orientado hacia el sur de la vivienda, ubicada en el estado de Himachal Pradesh, y (b) construcción del invernadero adosado a la vivienda con orientación hacia el sur, ubicada en el estado de Himachal Pradesh [4].	8
Fig. 4. Técnicas solares usadas: (a) invernadero adosado a la escuela, en Dang Xiong, (b) muro Trombe, en Wu Ma, (c) colectores solares instalados en el techo, en Dang Xiong, y (d) escuela ubicada en Yan Ba Jing incorporada un invernadero de dos pisos [4].	9
Fig. 5. Trabajos desarrollados en Raymina: (a) diseño de la vivienda modelada en <i>SketchUp</i> con las mejoras constructivas, ubicada en San Francisco de Raymina, (b) ventanas en el techo y hojas de triplay en el interior, (c) entablado de maderas en el piso para su aislamiento, (d) invernadero adosado a la vivienda, en San Francisco de Raymina, y (e) orificios en la pared que comunican el invernadero con el interior de la vivienda [16].	10
Fig. 6. Técnicas bioclimáticas presentadas en la vivienda realizado en <i>SketchUp</i> , ubicada en la provincia de Castrovirreyrna [17]......	11
Fig. 7. Técnicas bioclimáticas aplicadas y cocina mejorada: (a) invernadero adosado a la vivienda, ubicada en la comunidad de Santa Ana, (b) ducto solar con ventanas corredizas en el techo, (c) piso con madera machihembrada, y (d) cocina mejorada [17]......	12
Fig. 8. Antes y después de los cambios realizados en las viviendas: (a) vivienda ubicada en el centro poblado de San Felipe, antes de las mejoras, (b) invernadero adosado a la vivienda, (c) vista exterior de la vivienda después de las mejoras, y (d) vista en el interior de las claraboyas en el techo [18]......	13
Fig. 9. Albergue construido y vivienda mejorada en San Francisco de Raymina: (a) diseño en <i>SketchUp</i> de la vivienda, (b) vista interior de las claraboyas en el techo, (c) claraboyas en el techo, vista desde el exterior, (d) albergue construido, vista desde el exterior, (e) tejas sobre el ichu y plástico, que van por encima del techo, y (f) vista del invernadero adosado a la segunda vivienda [7]......	14
Fig. 10. Mapa de frecuencia de heladas, días de heladas por año [1]......	17
Fig. 11. Irradiación solar global horizontal estimada, promedio diario anual, para el Perú [27].	18
Fig. 12. Vista transversal de la aplicación del aislamiento térmico en el piso [18].	24
Fig. 13. Piso con cama de piedras y tablas de madera machihembrada [26].	24
Fig. 14. Piso instalado en el MEV en San Francisco de Raymina [8]......	24
Fig. 15. Tipos de muros construidos de adobe: (a) muro simple de adobe en Imata, Arequipa [33], (b) doble muro con espacio de aire separado entre ellos en Ilave, Puno [8], y (c) muro de adobe reforzado con sogas de nylon (driza), Orduña, Puno [44]......	25

Fig. 16. Aislamiento de muros en la comunidad de Orduña, Puno: (a) totora adosada sobre el muro de adobe para su aislamiento [43], (b) tensado de la sogá sobre la totora [43], y (c) embarrado de muros con mezcla de paja y barro [43].	26
Fig. 17. Muros construidos en viviendas Sumaq Wasi, Cusco: (a) construcción de una vivienda Sumaq Wasi con doble muro de ladrillo y aislante térmico en medio [45], y (b) poliestireno expandido entre los muros de ladrillo [45].	26
Fig. 18. Técnicas bioclimáticas en techos: (a) listones de madera con ichu y plásticos encima del techo [46], (b) teja colocada encima de la madera y el ichu colocado en el techo de la figura a [46], (c) colocación del colchón de totora sobre las vigas de madera [43], y (d) adición de una capa de tierra alivianada sobre el colchón de totora [47].	27
Fig. 19. Cielo raso y claraboyas en los techos: (a) cielo raso elaborado con tela arpillera debajo del techo con espacio para el ducto solar [48], (b) cielo raso elaborado con triplay como base y al medio con material de policarbonato alveolar traslúcida [49], (c) plástico transparente colocado en la claraboya [43] y (d) ventana corrediza colocada debajo de la claraboya para evitar las pérdidas de calor en la noche [48].	28
Fig. 20. Aislamiento de ventanas y uso de contraventanas: (a) sellado con barro sobre las rendijas entre el marco de la ventana y el muro de adobe [48], (b) contraventa abierta hacia el interior para que ingrese la ventilación hacia el interior del dormitorio [17]. ..	29
Fig. 21. Tipos de puertas de madera en viviendas Altoandinas: (a) puerta de madera sin oquedades [17], (b) sellado del marco de madera [16], y (c) esclusa conformada por dos puertas [6].	30
Fig. 22. Invernaderos adosados: (a) Institución educativa, ubicada en Tisco, Arequipa, (b) cultivos producidos dentro de un invernadero en Bolivia [53], (c) vivienda en San Francisco de Raymina, Ayacucho [16], (d) vivienda en San Juan de Yanacolpa, Huancavelica [48], (e) centro educativo en Tisco, Arequipa y (f) vivienda, con paredes enlucidas con yeso y techo de plástico transparente, ubicada en la localidad de San Felipe, Huancavelica [18].	32
Fig. 23. Esquema de volumen de control de balance de calor exterior [5].	39
Fig. 24. Gráfico de volumen de control de balance de calor interior [5].	40
Fig. 25. Ubicación del Centro Poblado de Imata: (a) en el mapa del Perú, departamento de Arequipa, y (b) en la provincia de Caylloma, en el distrito de San Antonio de Chuca [63]-[64].	43
Fig. 26. Panorama aéreo del centro poblado de Imata [64] y de los MEV: (a) vista aérea de Imata con las ubicaciones de instituciones con las que cuenta [64], (b) ubicación de los MEV, y (c) vista de los MEV, MEV1 sin invernadero (atrás), MEV2 con invernadero (adelante).	44
Fig. 27. Centro poblado de Imata para algunos días de invierno. Adaptado del diario La República [65].	45
Fig. 28. Temperatura media mensual (T_{m-m}) de Imata según datos del SENAMHI, 2018.	46
Fig. 29. Temperaturas medias diarias mensuales (T_{m-m}), temperatura promedio máximo ($T_{máx-m}$), temperatura promedio mínimo mensual ($T_{mín-m}$), temperatura promedio máxima extrema ($T_{máx-e}$) y temperatura promedio mínima extrema ($T_{mín-e}$) mensuales para el año 2018.	47

Fig. 30. Irradiación solar media diaria mensual ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$) para Imata, según archivo del programa Solcast [13] para el año 2018.	48
Fig. 31. Humedad relativa promedio diario mensual ($\text{HR}_{\text{m-m}}$), humedad relativa promedio diario mensual mínimo ($\text{HR}_{\text{mín-m}}$) y humedad relativa promedio diario mensual máximo ($\text{HR}_{\text{máx-m}}$), característicos para el centro poblado de Imata.	49
Fig. 32. Frecuencia y velocidad anual del viento para Imata, calculados con el programa del WRPLOT [66].	50
Fig. 33 Trayectoria solar sobre el cielo de Imata proyectados sobre los MEVs [67].	51
Fig. 34. Carta solar estereográfica para el centro poblado de Imata.	52
Fig. 35. Vista del centro poblado de Imata, imagen tomada desde el mirador.	54
Fig. 36. Viviendas con techos de planchas de calamina, Imata: (a) vivienda con techo de calamina y puerta de metal oxidada con marcos de metal, (b) ventanas de vidrio con marco de metal, puerta de metal, (c) piedras colocadas sobre el techo de calamina metálica de la vivienda, y (d) vivienda con techo de calamina metálica, ventana de vidrio simple.	55
Fig. 37. Diagrama de secuencia de las modificaciones realizadas en la envolvente del MEV.	57
Fig. 38. Modificaciones de las envolventes de los MEVs.	58
Fig. 39. Vista de las medidas del MEV, diseñados en <i>SketchUp</i>	60
Fig. 40. Cobertura del techo, viguetas y correas armadas en el MEV.	61
Fig. 41. Diferentes techados de los módulos: (izquierda) módulo típico, (derecha) módulo mejorado con falso techo.	61
Fig. 42. Invernadero adosado al MEV2: (a) invernadero diseñado en <i>SketchUp</i> e (b) invernadero en construcción.	62
Fig. 43. Estación Davis instalada en la azotea de la municipalidad de Imata.	63
Fig. 44. Partes de la estación Vantage Pro 2 Plus [69].	63
Fig. 45. Ubicación de sensores en el MEV: (a) vista exterior de sensores de temperatura empotrados en las paredes, (b) sensor ubicado en la pared de adobe, y (c) sensor empotrado en la pared de adobe.	64
Fig. 46. Vista interior de la ubicación de los ST. y micro estación ubicados en el interior del módulo típico.	65
Fig. 47. Vista interior de la ubicación de los ST. y micro estación ubicados en el interior del módulo mejorado.	65
Fig. 48. Secuencia de la forma en que los ST. fueron ubicados en la superficie de la pared.	66
Fig. 49. Sensores ubicados en las paredes y en el subsuelo de ambos módulos: (a) medida de la profundidad del hoyo en el subsuelo, (b) sensor dentro del hoyo, y (c) vista de los ST. ubicados en las paredes exteriores y en el subsuelo de ambos módulos.	66
Fig. 50. Vista de los sensores y micro estaciones ubicados en el interior del módulo e invernadero.	67

Fig. 51. Imagen del MEV1 típico y su comportamiento térmico: (izquierda) temperatura horaria en el interior del MEV1, T_{int} M1 (línea sólida azul), temperatura del aire exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 26 al 31 de julio, (derecha) MEV1 típico en su estado inicial.	69
Fig. 52. Imagen de los MEVs y su comportamiento térmico: (Izquierda) Temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 7 al 14 de agosto, y (derecha) cambio en el techado del MEV2 y su comportamiento térmico comparado con el MEV1.	70
Fig. 53. Cambio en el techado del MEV1, enlucido de yeso y su comportamiento térmico comparado con el MEV2: (izquierda) temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 23 al 31 de agosto, (derecha y abajo) MEV1 con techo de fibrocemento y claraboya, y (derecha y arriba) MEV2 sin enlucido de yeso.	71
Fig. 54. Inclusión del falso techo en MEV1 y MEV2, y su comportamiento térmico comparando ambos incrementos de temperatura después de los cambios realizados: (derecha y arriba) falso techo construido en el MEV1, (derecha y abajo) falso techo construido en el MEV2, (izquierda) temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 14 al 30 de setiembre.	72
Fig. 55. Falso techo de ambos módulos (MEV1 y MEV2) y su comportamiento térmico: (izquierda) temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 31 de octubre al 06 de noviembre, (derecha y abajo) poliestireno expandido sobre falso techo, (derecha y arriba) falso techo con divisiones de triplay y policarbonato.	73
Fig. 56. Interior del invernadero y comportamiento térmico del invernadero y de los módulos: (a) puerta y ventana que comunican el módulo y el invernadero, (b) ambiente interior del invernadero, y (c) temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura del invernadero T_{Invro} (línea sólida negra), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 02 al 12 de diciembre.	75
Fig. 57. MEV1 típico y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV1 en su estado inicial representado en <i>SketchUp</i> , y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 26 al 31 de julio.	77
Fig. 58. Imagen del MEV2 mejorado y su comportamiento térmico: (a) cambio en el techado con fibrocemento y claraboya para el MEV2, dibujado en <i>SketchUp</i> , y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 7 al 14 de agosto.	78
Fig. 59. MEV1 mejorado y su comportamiento térmico simulado: (a) techado con fibrocemento, claraboya y enlucido de yeso en las paredes de adobe del MEV1, dibujado en <i>SketchUp</i> , y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea azul sólida), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 23 al 31 de agosto.	79

Fig. 60. Imagen del MEV1 y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV1 en <i>SketchUp</i> , con falso techo y la separación del ático en 3 cámaras, y (b) temperatura horaria en el interior del MEV1, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 14 al 22 de setiembre.....	80
Fig. 61. Imagen del MEV2 y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en <i>SketchUp</i> , con falso techo y la separación del ático en 3 cámaras, y (b) temperatura horaria en el interior del MEV2, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 23 al 30 de setiembre.....	81
Fig. 62. Imagen del MEV1 y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV1 en <i>SketchUp</i> , con falso techo y poliestireno expandido sobre la base del falso techo, y (b) temperatura horaria en el interior del MEV1, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 31 de octubre al 03 de noviembre.....	82
Fig. 63. Imagen del MEV2 y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en <i>SketchUp</i> , con falso techo y poliestireno expandido sobre la base del falso techo, y (b) temperatura horaria en el interior del MEV2, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 03 al 05 de noviembre.....	83
Fig. 64. Representación del invernadero adosado al MEV, donde se señalan algunos de los materiales usados en la construcción, el ángulo de rotación del MEV y su dirección con respecto al norte geográfico.....	84
Fig. 65. Imagen del MEV2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en su estado final en <i>SketchUp</i> , con puerta y ventana cerrada, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, T_{Invro} (línea negra sólida), del 02 al 04 de diciembre.....	85
Fig. 66. Imagen del MEV2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en su estado final en <i>SketchUp</i> , con puerta y ventana abiertas, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, T_{Invro} (línea negra sólida), del 05 al 06 de diciembre.....	86
Fig. 67. Imagen del MEV2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en su estado final en <i>SketchUp</i> , con puerta abierta y ventana cerrada, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, T_{Invro} (línea negra sólida), del 07 al 09 de diciembre.....	87
Fig. 68. Imagen del MEV2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en su estado final dibujado en <i>SketchUp</i> , con puerta cerrada y ventana abierta, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, T_{Invro} (línea negra sólida), del 10 al 12 de diciembre.....	88

Fig. 69. Ubicación de los ST. y protección del sensor de la radiación solar.	89
Fig. 70. Comportamiento térmico de las cámaras en el ático del MEV1: temperatura en el interior de la cámara de policarbonato, T_{int} Cám. Polcbto. (línea sólida morada), temperatura en el interior de la cámara de triplay, T_{int} Cám. Triplay (línea sólida amarilla), temperatura en el interior del módulo 1, T_{int} M1 (línea sólida azul) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 10 al 18 de diciembre.	90
Fig. 71. Comportamiento térmico de las cámaras en el ático del MEV2: temperatura en el interior de la cámara de policarbonato, T_{int} Cám. Polcbto. (línea sólida morada), temperatura en el interior de la cámara de triplay, T_{int} Cám. Triplay (línea sólida amarilla), temperatura en el interior del invernadero, T_{int} Invro. (línea sólida negra), temperatura en el interior del módulo 2, T_{int} M2 (línea sólida anaranjada) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 10 al 18 de diciembre.	92
Fig. 72. (a) Hoyo cavado en el suelo en el exterior del MEV, (b) sensor de temperatura instalado en el subsuelo del piso en el interior del MEV, y (c) comportamiento térmico de las temperaturas en el subsuelo (a una profundidad de 65cm) de ambos módulos y fuera del módulo, temperatura en el subsuelo del interior del módulo 1, T_{int} Piso M1 (línea sólida marrón) temperatura en el subsuelo del interior del módulo 2, T_{int} Piso M2 (línea sólida rosada), temperatura en el subsuelo exterior al módulo, T_{int} Piso M1 (línea sólida celeste) y temperatura en el exterior (T_{ext}), desde el 08 de noviembre hasta el 20 de diciembre del 2018.	93
Fig. 73. Temperaturas superficiales en el interior y exterior de la pared del MEV1 orientada hacia el este: temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el Este, T_{ext} Par. E (línea sólida rosada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el Este, T_{int} Par. E (línea roja sólida) y temperatura exterior T_{ext} (línea verde sólida), del 26 al 31 de julio.	94
Fig. 74. Temperaturas superficiales en el exterior de las paredes del MEV1: temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este T_{ext} Par. E (línea sólida roja), temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el Sur T_{ext} Par. S (línea sólida morada) y temperatura exterior T_{ext} (línea verde sólida), del 26 al 31 de julio. ..	95
Fig. 75. Temperaturas superficiales en el interior de las paredes del MEV1: temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el norte T_{int} Par. N (línea sólida anaranjada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este T_{int} Par. E (línea sólida roja), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el sur T_{int} Par. S (línea sólida morada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el oeste T_{int} Par. N (línea sólida celeste) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 2 al 12 de diciembre.	96
Fig. 76. Temperaturas superficiales en el exterior de las paredes del MEV1: temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el norte T_{ext} Par. N (línea sólida anaranjada), temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el este T_{ext} Par. E (línea sólida roja), temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el sur T_{ext} Par. S (línea morada sólida), temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el oeste T_{ext} Par. N (línea sólida celeste) y temperatura exterior T_{ext} (línea verde sólida), del 2 al 12 de diciembre.	98
Fig. 77. Temperaturas superficiales en el interior de las paredes del MEV2: temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este, T_{int} Par. E (línea sólida roja), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el sur T_{int} Par. S (línea sólida morada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el oeste,	

$T_{\text{int Par. O}}$ (línea sólida celeste), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el norte, $T_{\text{int Par. N}}$ (línea marrón sólida) y temperatura exterior T_{ext} (línea verde sólida), del 2 al 12 de diciembre..... 100

Fig. 78. Temperaturas superficiales en el interior de las paredes del MEV2: temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este, $T_{\text{int Par. E}}$ (línea sólida roja), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el sur, $T_{\text{int Par. S}}$ (línea sólida morada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el oeste, $T_{\text{int Par. O}}$ (línea sólida celeste), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el norte, $T_{\text{int Par. N}}$ (línea sólida marrón) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 2 al 12 de diciembre. 102

LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

CARACTERES	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
ACH	Cambios de aire por hora	
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers</i>	
CONCYTEC	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación	
FONDECYT	Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica	
GERESA	Gerencia regional de salud Arequipa	
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil	
INEI	Instituto Nacional de Estadísticas e Informática	
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	
ISES	<i>International Solar Energy Society</i>	
MVCS	Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento	
MEV	Módulo experimental de vivienda	
MEV1	Módulo experimental de vivienda 1	
MEV2	Módulo experimental de vivienda 2	
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú	
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería	
A	Área	m ²
q	Calor convectivo	W
C _e	Calor específico	J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹
C _p	Calor específico del aire de la zona	J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹
C _T	Multiplicador de capacidad de calor sensible	
C _z	Capacitancia del aire	
Q̇ _i	Carga interna convectiva	W
ṁ _{sys}	Caudal másico del sistema	g·s ⁻¹
h _{c,ext}	Coefficiente de convección exterior	W·m ⁻² ·°C ⁻¹
Φ _j	Coefficiente de flujo FTC	
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección	W·m ⁻² ·°C ⁻¹
Y _j	Coefficiente FTC cruzado	
X _j	Coefficiente FTC exterior	
Z _j	Coefficiente FTC interior	
k	Conductividad térmica	W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W·m ⁻² ·K ⁻⁴
ρ	Densidad	kg·m ⁻³

ρ_{air}	Densidad del aire de la zona	$kg \cdot m^{-3}$
D_{vto}	Dirección del viento	°
ε	Emitancia de onda larga de la superficie	
EMEV1	Energía de demanda de calefacción del MEV1	$kWh \cdot día^{-1}$
EMEV2	Energía de demanda de calefacción del MEV2	$kWh \cdot día^{-1}$
\dot{Q}_{sys}	Energía del sistema	W
F_{sky}	Factor de visión de la superficie de la pared a la temperatura del cielo	
F_{gnd}	Factor de vista de la superficie de la pared a la temperatura de la superficie del suelo	
F_{air}	Factor de vista de la superficie de la pared a la temperatura del aire	
q''_{conv}	Flujo de calor convectivo al aire de la zona	$W \cdot m^{-2}$
$q''_{\alpha sol}$	Flujo de calor de radiación solar directa y difusa absorbida	$W \cdot m^{-2}$
q''	Flujo de calor por conducción en la cara interior	$W \cdot m^{-2}$
q''_x	Flujo de calor por conducción por unidad de área	$W \cdot m^{-2}$
q''_{ki}	Flujo de conducción a través de la pared	$W \cdot m^{-2}$
q''_{LWX}	Flujo de intercambio radiante de onda larga neta entre las superficies en una zona	$W \cdot m^{-2}$
q''_{air}	Flujo de radiación con el aire	$W \cdot m^{-2}$
q''_{sky}	Flujo de radiación con el cielo	$W \cdot m^{-2}$
q''_{gnd}	Flujo de radiación con el suelo	$W \cdot m^{-2}$
q''_{LWR}	Flujo de radiación de longitud de onda larga con el aire y los alrededores	$W \cdot m^{-2}$
q''_{LWS}	Flujo de radiación de onda larga de equipos de una zona o grupo de zonas	$W \cdot m^{-2}$
q''_{sol}	Flujo de radiación solar transmitido absorbido en la superficie	$W \cdot m^{-2}$
q''_{SW}	Flujo neto de radiación de onda corta a la superficie desde las luces	$W \cdot m^{-2}$
HR	Humedad relativa	(%)
HR_{m-m}	Humedad relativa media mensual	(%)
$HR_{máx-m}$	Humedad relativa promedio máximo mensual	(%)
$HR_{mín-m}$	Humedad relativa promedio mínimo mensual	(%)
I_{rs}	Irradiación solar	$kWh \cdot m^{-2}$
I_s	Irradiancia solar	$W \cdot m^{-2}$

[A]	Matriz de coeficientes	
m	Pendiente de la recta de regresión	
b	Punto donde la recta de regresión interseca al eje de las ordenadas	
ST	Sensor de temperatura	
Q_c	Tasa de transferencia de calor por convección exterior	W
T	Temperatura	°C
T_{gnd}	Temperatura de la superficie del suelo	°C
T_{surf}	Temperatura de la superficie	°C
T_z	Temperatura de la zona	°C
T_{air}	Temperatura del aire exterior	°C
T_{sky}	Temperatura del cielo	°C
T_{∞}	Temperatura del fluido o entorno	°C
T_{int} Cám. Polcbto.	Temperatura en el interior de la cámara de policarbonato	°C
T_{int} Cám. Triplay	Temperatura en el interior de la cámara de triplay	°C
T_{int} Invro.	Temperatura en el interior del invernadero	°C
T_{int} M1	Temperatura en el interior del módulo 1	°C
T_{int} M2	Temperatura en el interior del módulo 2	°C
T_{int} Piso M1	Temperatura en el subsuelo del piso del módulo 1	°C
T_{int} Piso M2	Temperatura en el subsuelo del piso del módulo 2	°C
T_{ext} Par. E	Temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el este	°C
T_{ext} Par. N	Temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el norte	°C
T_{ext} Par. O	Temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el oeste	°C
T_{ext} Par. S	Temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el sur	°C
T_{int} Par. E	Temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este	°C
T_{int} Par. N	Temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el norte	°C
T_{int} Par. O	Temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el oeste	°C

$T_{\text{int Par. S}}$	Temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el sur	$^{\circ}\text{C}$
T_{alr}	Temperatura en los alrededores	$^{\circ}\text{C}$
T_{ext}	Temperatura exterior	$^{\circ}\text{C}$
T_0	Temperatura exterior de la superficie	$^{\circ}\text{C}$
T_{em}	Temperatura exterior media	$^{\circ}\text{C}$
T_{int}	Temperatura interior	$^{\circ}\text{C}$
T_i	Temperatura interior de la superficie	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{m-m}}$	Temperatura media mensual	$^{\circ}\text{C}$
T_n	Temperatura neutra	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{máx-e}}$	Temperatura promedio máxima extrema mensual	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{máx-m}}$	Temperatura promedio máximo mensual	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{mín-e}}$	Temperatura promedio mínima extrema mensual	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{mín-m}}$	Temperatura promedio mínimo mensual	$^{\circ}\text{C}$
T_{sim}	Temperatura simulada	$^{\circ}\text{C}$
t	Tiempo	s
[u]	Vector de entradas	
[y]	Vector de salida	
[x]	Vector variable de estado	
V_{vto}	Velocidad del viento	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

I. INTRODUCCIÓN

En las zonas Altoandinas del Perú, en altitudes mayores a los 4 000 msnm, se tienen climas, con oscilaciones térmicas de más de 15 °C en promedio anual, se tiene registro de valores históricos de temperaturas menores a -20 °C [1]. Las condiciones mencionadas son más severas en invierno, y comprende los meses desde mayo hasta setiembre donde se dan descensos de temperaturas durante las noches, lo que se conoce como helada⁴ y que, generalmente se presenta en las zonas Altoandinas del sur del país. Se repite todos los años y trae como consecuencia perjuicios en el ámbito de la salud, ganadería, agricultura, educación y vida de las personas. Los pobladores más afectados son los niños menores de 5 años y adultos mayores de 65 años, siendo estos los más vulnerables; a su vez, los que padecen también son los que se encuentran en condiciones de pobreza o pobreza extrema. Frente a esto el Gobierno Peruano ha priorizado la inclusión y protección de las poblaciones más vulnerables, además de las atenciones en los lugares, en su Plan Multisectorial ante Heladas y Friaie 2021 [2]. Para poder mitigar los embates producidos por la naturaleza hacia las poblaciones, y frenar de alguna manera esta problemática. Desde hace algunos años (aprox. 12 años), tanto el Gobierno Peruano como la Academia (universidades nacionales y privadas) y Organizaciones No Gubernamentales (ONGs), vienen ejecutando proyectos que involucran la construcción y mejora de viviendas, con el objetivo de obtener una condición térmica habitable dentro de la vivienda. Para alcanzar estas condiciones se aplican estrategias (conceptos para alcanzar la temperatura neutra⁵) y técnicas bioclimáticas (ejecución de las estrategias bioclimáticas), destacando el aislamiento y la captación pasiva de la energía solar, ya que se cuenta con un potencial solar que, en promedio diario anual, es mayor a los 6 kWh·m⁻²·día⁻¹ [3]. Es importante destacar que muchos de los trabajos desarrollados carecen de elementos técnicos que sustenten los diseños para la construcción de viviendas propuestas. Entre estos elementos destacan: (a) la caracterización térmica de materiales, (b) la determinación de la temperatura neutra del poblador Altoandino y (c) el conocimiento del aporte térmico de cada uno de los componentes que constituyen el aislamiento de una envolvente. Este último elemento técnico podría cuantificarse si se programan modificaciones sucesivas en la envolvente, y se monitorea el comportamiento térmico del ambiente en estudio y, es justamente, ese el objetivo del presente trabajo: la evaluación, de forma experimental y mediante simulaciones, del comportamiento térmico de dos módulos experimentales de vivienda (MEV) que fueron construidos con las mismas características, tratando de emular la construcción típica de la zona.

En estudios realizados en otros países de latitudes diferentes como es el caso del desierto del Himalaya en la parte occidental de la India, en el distrito de Kargil (estado de Himachal Pradesh), a una altitud entre los 3 000 y 4 000 msnm, con latitud de 33,2 °

⁴ Helada. El SENAMHI señala que hay dos tipos, la meteorológica y agrometeorológica. Para la primera se produce cuando el valor de la temperatura ambiente baja a los 0 °C o menos, mientras que la agrometeorológica la define como un descenso de la temperatura ambiente a niveles críticos de los cultivos y esto produce la destrucción de los tejidos vegetales [1].

⁵ Temperatura neutra. Es la temperatura en la que el esfuerzo del cuerpo humano para alcanzar el confort térmico es mínimo [40]. Determinada como función de la temperatura media exterior de cada sitio o lugar en específico [36].

Norte. Se aplicaron tecnologías bioclimáticas en casas rurales como, el muro Trombe, el invernadero adosado y ventanas de doble vidrio, todas estas con orientación hacia el sur. También, se aplicó aislamiento tanto en el piso, paredes y el techo, empleando materiales como el aserrín o paja, demostrando así un incremento de 20 °C [4]. Otro estudio que destaca, es el desarrollado en escuelas en la región del Tíbet en China, en la localidad de Lhasa, ubicada a una altitud sobre los 4 000 msnm, con latitud 29,7° Norte. Se aplicaron cuatro técnicas solares pasivas y una activa, como son, el panel de aire de termosifonación, muro Trombe, invernadero adosado, circuito convectivo y un calentador de aire solar activo. Y junto con el aislamiento de las ventanas, paredes, techo y piso, se alcanzó un incremento de la temperatura, en el interior, de 10 °C [4].

En el Perú, como ya se mencionó, se han realizado estudios basados en la mejora del comportamiento térmico de viviendas en zonas Altoandinas, de acuerdo a las modificaciones en las envolventes considerando su mejora, mediante el aislamiento, y la captación solar de energía solar, algunos de estos estudios también han utilizado el programa de simulaciones térmicas *EnergyPlus* [5], previo al diseño del proyecto para hacer comparaciones después de terminado el proyecto. Entre los estudios mencionados destaca el caso de la Comunidad de San Francisco de Raymina a 3 700 msnm, Ayacucho, en la sierra sur, donde la UNI (por medio del CER-UNI) vienen interviniendo desde hace más de 13 años, dichos resultados se encuentran en diversas publicaciones entre las que destacan las tesis de pregrados y posgrados de Rafael Espinoza [6], Jessica Molina [7], Juan Molina [8].

El uso de materiales involucra un rol fundamental en el comportamiento energético de toda vivienda, para las zonas Altoandinas destaca el adobe, el cual es preparado localmente, y se caracteriza porque posee alta masa térmica y baja conductividad térmica [9]. Otro material es la paja que se usa en la preparación del adobe, la totora se usa para aislar los techos, así como también la paja, el yeso para enlucir las paredes de adobe para generar mayor aislamiento, algunos materiales industriales como la plancha de fibrocemento, el policarbonato o el plástico agrofílm usados en la construcción de invernaderos. Las planchas de calamina metálica también son muy usadas, pero es lamentable que la gran mayoría de los pobladores de zonas Altoandinas utilicen este material en los techos de las viviendas u otros como puertas con marcos de madera, ya que sus propiedades de buen conductor del calor no brindan protección térmica. Se debe mencionar que en el tiempo del incanato no se usaba este material ya que no había la necesidad porque los techos eran de paja o ichu, sin embargo, debido a su bajo costo, fácil acceso, transporte e instalación, su uso se ha ido masificando, creándose rápidamente un mercado, esto es porque existe la demanda de parte de los pobladores.

El Perú cuenta con una norma técnica EM.110: “Confort térmico y lumínico con eficiencia energética” [10], la cual establece parámetros técnicos de diseño para el bienestar térmico, según criterios bioclimáticos para la construcción, se hace hincapié para que se respeten los valores de transmitancias térmicas máximas permitidas en pisos, techos y paredes, de no ser así el proyecto será invalidado. El presente trabajo, comprende una serie de modificaciones secuenciales de las envolventes de dos módulos experimentales de vivienda (MEVs), los cuales fueron construidos en el centro poblado de Imata, región Arequipa, a una altitud de 4500 msnm, con latitud de 13,7° Sur y longitud de 73,8° Oeste. Por cada modificación realizada en la envolvente, uno de los módulos se

mantenía igual y luego se comparaba con el otro módulo para evaluar la diferencia en su comportamiento térmico y el efecto debido a ese cambio en el interior del módulo. Los módulos tienen dimensiones de 3,8 m x 4,8 m cada uno, con altitud de 2,3 m, sobre este el ático de 0,8 m de altura y un techo a dos aguas. Uno de ellos lleva en su pared norte un invernadero adosado cuyas dimensiones son 2 m x 4,8 m como base y altitudes de 2,3 m y 1,6 m, con techo inclinado. Los datos del clima se registraron mediante una estación Davis Vantage Pro Plus, ubicada en la azotea de la municipalidad del sitio, para los datos de temperatura en los módulos se utilizaron los registradores de datos Hobo y los sensores de temperatura Pt100, así como micro estaciones Hobo para registrar la temperatura y humedad del aire interior del módulo. Para las simulaciones del comportamiento térmico de los módulos se empleó el software *EnergyPlus*, el cual a su vez trabaja con sus complementos como el *SketchUp* para crear la geometría y el *OpenStudio* para el ingreso de los datos como propiedades de los materiales, los materiales, los horarios, etc. Asimismo, modificando una plantilla del programa *Elements*, a partir del ingreso de variables meteorológicas registradas, se generó el archivo de clima EPW de entrada al *EnergyPlus*.

1.1 Planteamiento del problema

En el Perú desde hace más de 10 años se viene trabajando en el diseño y construcción de viviendas para zonas Altoandinas con el propósito que estas brinden condiciones mínimas de habitabilidad a sus usuarios. El trabajo desarrollado se ha centrado en dos aspectos fundamentales: (1) aislamiento y (2) aprovechamiento solar pasivo. Si bien es cierto que se han obtenido resultados positivos, hasta el momento no se ha alcanzado el diseño adecuado para que las viviendas, construidas por medio de los programas de masificación del Gobierno del Perú y ONGs, no solo brinde las condiciones térmicas saludables a sus habitantes, sino que también que sean viviendas bioclimáticas y sostenibles. El panorama es muy complejo, dado que entre los elementos técnicos indispensables y faltantes, hasta el momento en la realidad nacional, destacan: (a) la caracterización térmica de materiales, (b) la determinación de la temperatura neutra del poblador altoandino y (c) el conocimiento del aporte térmico, de cada uno de los componentes que constituye el aislamiento de una envolvente. Y es justo este último elemento el abordado en la presente tesis, para lo cual se han diseñado y construido dos módulos experimentales de vivienda (MEV), los cuales fueron construidos considerando la tipología típica local y luego fueron mejorándose sus envolventes, secuencialmente, para poder cuantificar térmicamente cuanto aportaba cada mejora.

1.2 Objetivos

En esta sección se presentará el objetivo general y los objetivos específicos de la presente tesis.

1.2.1 Objetivo general

Evaluar, experimental y por cálculos computacionales, el comportamiento térmico y energético de dos módulos experimentales de viviendas (MEVs) Altoandinos, ubicados en el centro poblado de Imata a 4 519 msnm (provincia de Caylloma, región Arequipa), según las modificaciones secuenciales en las envolventes, considerando el aislamiento y la captación pasiva de energía solar.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar la instrumentación para el registro de datos de temperaturas y humedad en los MEVs.
- Modificar sucesivamente las envolventes de los MEVs para mejorar el aislamiento en su interior y permitir la captación pasiva de energía solar.
- Analizar por medio de cálculos computacionales (usando el programa *EnergyPlus*) el comportamiento térmico de cada uno de los cambios sucesivos realizados en las envolventes de los MEVs.

1.3 Hipótesis

Es posible cuantificar el aporte térmico de cada una de las estrategias bioclimáticas más empleadas en zonas Altoandinas, en lo relacionado al aislamiento de la envolvente y la captación solar pasiva al interior de una vivienda, mediante la modificación sucesiva de dos módulos de vivienda construidos de manera idéntica.

1.4 Justificación

Por muchos años se vienen realizando diversos trabajos, proyectos pilotos o programas a nivel nacional tanto del Gobierno Peruano, así como de ONGs para alcanzar que los habitantes de zonas rurales Altoandinas cuenten con viviendas bioclimáticas y sostenibles. Para ello es indispensable el sustento teórico y experimental para desarrollar modificaciones, en las viviendas existentes, o proponer diseños, para las nuevas viviendas. En consecuencia, se requiere conocer la contribución térmica que aportan cada una de las componentes de las envolventes, así como la contribución de las estrategias pasivas de captación de energía solar para las regiones de zonas Altoandinas.

1.5 Metodología

Los módulos (MEV1 y MEV2) inicialmente fueron construidos con las mismas características en su envolvente, asemejándose a una vivienda de construcción típica actual de Imata, es decir, con paredes de adobe, techo de calamina metálica, ventana de un solo vidrio con marco de metal, y puerta de calamina metálica con marco de madera. El objetivo, durante la construcción de ambos MEVs fue que su comportamiento térmico sea el mismo, es decir que al interior de ellos la temperatura sea la misma durante todo el día. Y luego, a partir de este diseño inicial (denominado módulo típico), paulatinamente se realizaron cambios sucesivos en la envolvente de los MEVs, como el cambio en el techado (las planchas de calamina metálica se reemplazaron con planchas de fibrocemento), la adición del enlucido de yeso en las paredes, la construcción de claraboyas en el techo, el acoplamiento de un falso techo, la inclusión del poliestireno expandido (tecnopor) sobre la base del falso techo y la construcción de un invernadero adosado a la pared orientada hacia el norte del MEV. Por cada modificación realizada en la envolvente (llamada configuración) se determinó el comportamiento térmico y energético utilizando simulación dinámica. El registro de datos de temperatura del aire interior de los MEVs se realizó con micro estaciones de marca Hobo, ubicados

aproximadamente, en el centro geométrico del interior de cada módulo. El registro de las temperaturas en el subsuelo, las cámaras en el ático, la superficie de las paredes tanto exterior e interior se utilizando sensores de temperatura Pt100 conectados a registradores de datos o *data logger* de cuatro canales de la misma marca Hobo.

El procedimiento para la evaluación y análisis térmico de ambos módulos experimentales de vivienda (MEV1 y MEV2), referente a la parte energética, se inicia con el modelamiento en 3D de ambos módulos utilizando los programas *SketchUp* y *OpenStudio*, que son los complementos del programa de simulación *EnergyPlus* [5], creando las zonas térmicas y configurando las superficies de cada componente constructivo para finalmente crear el archivo de la arquitectura de los módulos con extensión *.idf* de entrada al programa *EnergyPlus*. Se utilizó para el campo de entrada de las variables el valor de las propiedades termo-físicas de los materiales utilizados durante las modificaciones sucesivas de las envolventes de los módulos, como el calor específico, la conductividad térmica y la densidad, así como, valores de las propiedades ópticas de los elementos. De igual forma, modificando una plantilla del programa *Elements* [11] a partir del ingreso de variables climatológicas registradas, se generó un archivo de clima con extensión *.EPW* de entrada al *EnergyPlus*, ambos archivos son la base para el inicio de la simulación dinámica utilizando *EnergyPlus* [12]. Los datos meteorológicos se registraron con una estación Davis Vantage Pro 2 Plus, instalada en la azotea de la municipalidad de San Antonio de Chuca. Adicionalmente para las fechas en la cual la estación no registró datos, se consideró los datos generados por el programa *Solcast* [13], y el registro de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [14]. Para los valores de las propiedades de los materiales, se tomaron de la Norma Técnica Peruana EM.110 “Confort térmico y lumínico con eficiencia energética” [10].

Se simularon las configuraciones de los MEVs, todas basadas en mejoras de aislamiento, captación de energía solar, y disminución de las infiltraciones, de acuerdo con las técnicas consideradas durante el proceso de cambios en la envolvente de los módulos. Los resultados tienen que ser contrastados con la parte experimental para posteriormente extrapolar los resultados a otras escalas de tiempo y análisis, e incluso realizar modificaciones respecto a la adición o cambio de algún componente constructivo.

En la figura 1 se muestra un cuadro de las técnicas bioclimáticas empleadas en la presente tesis en los MEVs, ubicados en Imata, a 4 519 msnm, Arequipa.

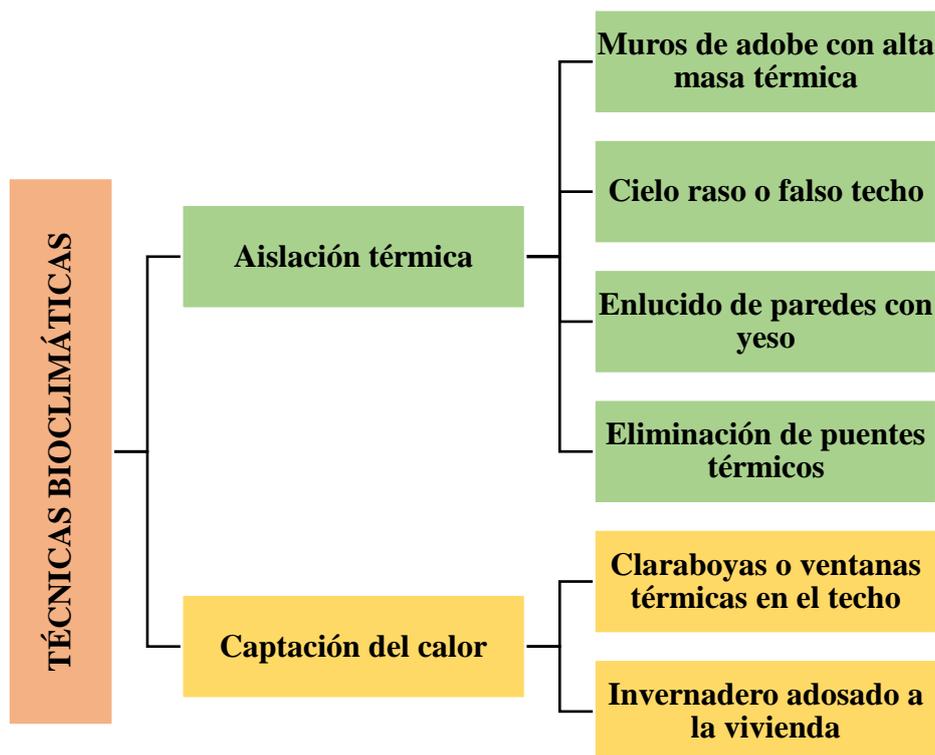


Fig. 1. Esquema de las técnicas bioclimáticas aplicadas en la presente tesis en los MEVs, ubicados en el centro poblado de Imata.

1.6 Antecedentes

Los antecedentes que se presentan a continuación están relacionados a las zonas con altitud sobre los 3500 msnm en el aspecto internacional y el Altoandino, para territorio nacional. Se han considerado casos desarrollados en zonas rurales y en los que se han empleado invernaderos adosados a las viviendas tanto en el aspecto internacional como nacional.

1.6.1 Internacionales

En este ámbito se tienen estudios realizados en diferentes lugares y diferentes latitudes, ya que las condiciones de clima que se presentan son diferentes, donde se puede apreciar el uso de técnicas bioclimáticas, y en su mayoría el uso de los invernaderos adosados a las viviendas en zonas rurales.

- **Estudio de la temperatura en un invernadero adosado con orientación norte en la Patagonia Andina** [15].

En la región norte de la Patagonia Andina, con las mediciones en un invernadero adosado a una vivienda en un clima muy frío entre los 3 000 y 5 000 msnm, con latitud de 41,2° Sur y longitud de 71,3° Oeste, con orientación norte, entre agosto de 2010 y abril del 2011, se midió las temperaturas en ambos lados de un muro, con el objetivo de verificar la transferencia de calor positiva hacia el ambiente interior, la envolvente del muro está compuesta por ladrillo cerámico de 0,18 m de espesor, enlucido en la cara externa, con una capa de 0,06 m de poliestireno expandido en la cara exterior y con revestimiento de capa de yeso. En la figura 2a se aprecia el interior del invernadero el cual tiene en su pared

del norte vidrio como material traslúcido, en su pared con dirección al oeste (al fondo) tiene material traslúcido de resina de poliéster, así como el techo del invernadero, a la izquierda se tiene el muro pintado de color verde el cual es parte de la fachada de la vivienda, en la figura 2b se tiene la vivienda de dos niveles, en el cual en su primer nivel se tiene el invernadero adosado en su pared norte. Se obtuvieron resultados para las condiciones climatológicas de la ciudad de Bariloche, las temperaturas promedio del invernadero adosado para las temporadas de invierno, primavera y otoño, no fueron favorables, ya que no hay aporte térmico, pero, en el verano si se obtuvieron aportes térmicos del invernadero hacia el interior de la vivienda.



Fig. 2. Región norte de la Patagonia Andina, Argentina: (a) vista del interior del invernadero y (b) vivienda en estudio con el invernadero adosado con dirección hacia el norte [15].

- **Mejora de los medios de vida de la población rural en invierno en el frío desierto del Himalaya de la India occidental** [4].

El proyecto denominado “mejora de los medios de vida invernales de la población rural en el frío desierto del Himalaya de la India occidental mediante la difusión de viviendas energéticamente eficientes” comprendió tres distritos de Leh, Kargil, Lahaul y Spiti de los estados de Jammu y Kashmir e Himachal Pradesh en India, estas zonas se encuentran a una altitud entre los 2 800 y 4 600 msnm, con una latitud de 33,2° Norte y longitud 75,3° Este, las temperaturas son severas en invierno, escasez de vegetación, los pobladores son en su mayoría rurales, aldeas aisladas con dependencia de la agricultura como su principal actividad, no tienen acceso a instalaciones energéticas y su insumo energético es la biomasa, las mujeres y niños deben recolectar leña por un par de meses en verano. Las casas típicas son deficientes térmicamente y la temperatura en el exterior descende por debajo de los -10°C en invierno. El proyecto tuvo desarrollo en el distrito de Leh, en el distrito de Kargil, estado de Himachal Pradesh, como objetivo principal difundir viviendas energéticamente eficientes, con integración de técnicas eficientes, habilitación de actividades para que generen ingresos gracias a estas casas cálidas. Las tecnologías que se utilizaron fueron tres: muro Trombe, invernadero adosado y la ganancia directa mediante una ventana de doble vidrio incorporada en el lado sur de la vivienda para calentar la habitación por radiación. Con orientaciones de ventanas, paredes e invernadero orientadas hacia el sur. Las paredes, el techo y el piso están aislados con paja o aserrín. En la figura 3a se observa la pared con dirección hacia el sur y pintada de negro y está cubierta con doble vidrio que sirve para la absorción de calor durante el día,

el calor se transfiere a la habitación durante la noche mediante los orificios que se encuentran en la parte inferior y superior de la pared, en la figura 3b se observa el invernadero adosado a la vivienda en el lado sur. Con la incorporación de las nuevas tecnologías se logró ahorrar dos toneladas de biomasa, el 95 % de los propietarios dejaron de recolectar arbustos, en cuanto a la temperatura en el interior de las viviendas es 20 °C más que la temperatura en el exterior y con frecuencia está por encima de los 5 °C. En cuanto a los social, los pobladores pueden realizar más actividades como la producción de artesanías, los niños dedican mayor tiempo para leer o estudiar con el ambiente cálido, el tiempo para las oraciones religiosas aumentó.



Fig. 3. Tecnologías bioclimáticas implementadas: (a) muro Trombe orientado hacia el sur de la vivienda, ubicada en el estado de Himachal Pradesh, y (b) construcción del invernadero adosado a la vivienda con orientación hacia el sur, ubicada en el estado de Himachal Pradesh [4].

- **Energía renovable en áreas rurales del Tíbet: eficiencia energética en las escuelas [4] .**

Las escuelas son muy frías en la Región Autónoma del Tíbet, desde el mes de octubre hasta abril. Lhasa, la capital se encuentra ubicada a una latitud de 29,7° Norte y longitud 91,1° Este, a una altitud entre 4 200 a 4 500 msnm. El estudio tiene como objetivo demostrar cuatro escuelas energéticamente eficientes, con cuatro medidas solares pasivas y una solar activa fueron implementadas, las cuales fueron: panel de aire de termosifonación (TAP), pared Trombe, invernadero, circuito convectivo y calentador de aire solar activo, con aislamiento en las ventanas, techo, paredes y piso. En la figura 4a se muestra el invernadero adosado a una escuela, en la figura 4b se observa el muro Trombe con el muro pintado de color negro, la figura 4c se puede observar el sistema activo, colectores solares, ubicado en el techo de una de las escuelas y en la figura 4d se tiene la escuela ubicada en Yan Ba Jing, en el cual se le ha incorporado un invernadero que cubre dos pisos pero sin tabique, el cual funciona como un circuito convectivo, ya que el aire caliente sube hasta el segundo piso, calienta las aulas superiores, se enfría, luego baja a las aulas del primer piso y vuelve a entrar en el invernadero. La ventana tuvo doble acristalamiento con aislamiento móvil en la noche, para el techo, se aisló con una capa de 10 cm de EPS (poliestireno expandido) sobre el falso techo, para las paredes, el aislamiento interior se hace mediante una capa de 5 cm de EPS fijo en el lado interior de la pared y cubierto con una madera, el aislamiento externo, se hace lo mismo con 5 cm de EPS fijado en el lado externo de la pared, pero se le coloca una placa impermeable. Los resultados muestran que las habitaciones son 10 °C más cálidas que las habitaciones

sin aislamiento. En todas las escuelas mejoradas los alumnos y maestros mencionaron que las aulas son más cálidas en invierno que años anteriores, no necesitan guantes dentro del aula para escribir, la escritura a mano de los alumnos mejoró, en otra escuela después de la renovación, ya no se requiere estiércol para calentar la estufa, antes de cada clase, ahorrando 15 minutos en la clase, la tos de los estudiantes se redujo. La distribución de costes medios de las medidas de eficiencia energética fue, ganancia solar: 50 %, aislamiento del techo: 15 %, aislamiento de la pared: 35 %. Los resultados de las medidas de eficiencia energética se pueden clasificar de la siguiente manera, aislamiento del techo, ganancia solar (invernadero, pared TAP / Trombe) y aislamiento de paredes. El invernadero es más eficiente que el TAP (1,5°C más cálido) pero es un 50 % más caro.



Fig. 4. Técnicas solares usadas: (a) invernadero adosado a la escuela, en Dang Xiong, (b) muro Trombe, en Wu Ma, (c) colectores solares instalados en el techo, en Dang Xiong, y (d) escuela ubicada en Yan Ba Jing incorporada un invernadero de dos pisos [4].

1.6.2 Nacionales

Para el caso nacional se muestran casos de estudio realizados en zonas rurales Altoandinas cuya altitud está sobre los 3 500 msnm, en el que se destacan las mejoras en el incremento de temperatura, uso de técnicas en la envolvente de la vivienda, así como el uso del programa *EnergyPlus* para el diseño, y el uso del invernadero adosado a la vivienda.

- **Evaluación Experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda Altoandina del Perú [16].**

El objetivo principal de esta tesis fue conseguir una propuesta técnica, para obtener un incremento de la temperatura en el interior de una vivienda rural, ubicada en San Francisco de Raymina, Ayacucho, a una altitud de 3 700 msnm, con latitud de 13,7° Sur

y longitud de $73,8^{\circ}$ Oeste, seleccionando una de las viviendas del pueblo. Para el diagnóstico térmico se registró los parámetros climatológicos correspondientes a la zona como temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y la irradiancia solar, de la misma forma se registraron datos de temperatura y humedad relativa del aire en el interior de las habitaciones de la vivienda, así como las temperaturas en las superficies de las paredes, ventanas, suelos y techos, durante el período comprendido desde el mes de junio del 2008 hasta abril del 2009. Después se simuló con el programa *EnergyPlus 3.0* las posibles propuestas de cambio en la construcción (figura 5a), para que de esta manera se pueda obtener un aumento de la temperatura en el interior de la vivienda aprovechando de manera óptima la energía del Sol. Las modificaciones como claraboyas en el techo, colocación de hojas de triplay en el interior del techo (figura 5b), entablado de madera en el piso (figura 5c), invernadero adosado a la vivienda (figura 5d) y los orificios para la comunicación entre el invernadero y la vivienda para el intercambio de calor (figura 5e), se realizaron desde el mes de mayo hasta el mes de agosto del 2009, y luego de esto se registraron los datos de temperatura, obteniendo un incremento de 6°C respecto de los mínimos de temperatura de aire que se registraron en el año 2008, es decir, temperaturas mínimas de 2°C se incrementaron hasta 8°C como mínimo para los mismos meses de medición.

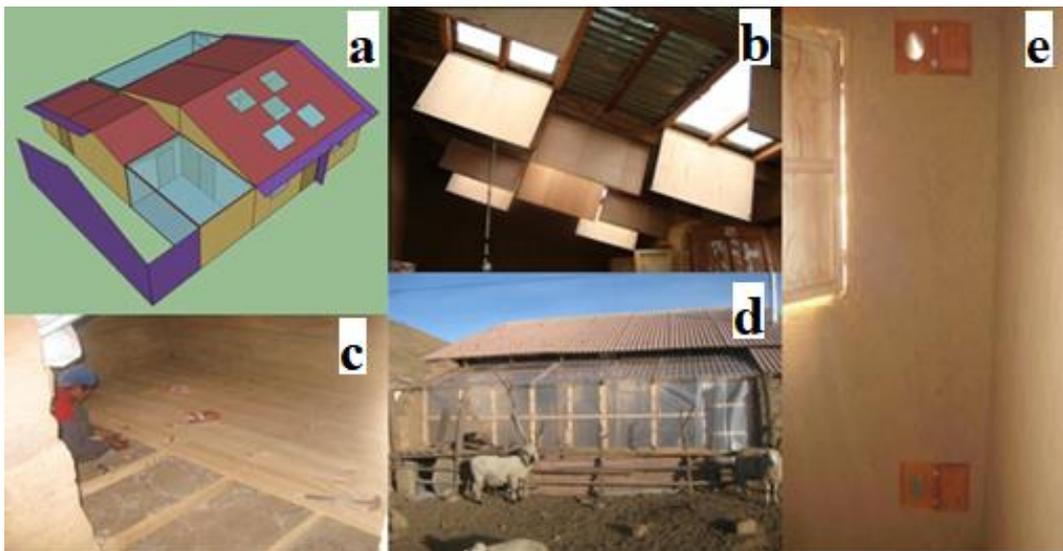


Fig. 5. Trabajos desarrollados en Raymina: (a) diseño de la vivienda modelada en *SketchUp* con las mejoras constructivas, ubicada en San Francisco de Raymina, (b) ventanas en el techo y hojas de triplay en el interior, (c) entablado de maderas en el piso para su aislamiento, (d) invernadero adosado a la vivienda, en San Francisco de Raymina, y (e) orificios en la pared que comunican el invernadero con el interior de la vivienda [16].

- **Proyecto Ccasamanta Qarkanakusum, Huancavelica** [17].

En el desarrollo del proyecto Ccasamanta Qarkanakusum, el cual tuvo la financiación del Departamento de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea, se procedió con las diferentes acciones para prevenir los efectos de las heladas, así como generar un mayor confort térmico en lugares con altitudes mayores a 3 500 msnm en Huancavelica en el año 2010, con una latitud de $13,3^{\circ}$ Sur y longitud $75,3^{\circ}$ Oeste. Los cambios en las mejoras constructivas se realizaron en viviendas construidas y nuevas, con mejoras en las cocinas mejoradas (figura 7d), ductos solares, cielos rasos, invernaderos adosados o

fitotoldos (figura 6 y 7) y pisos con aislamiento. Algunas viviendas se mejoraron en el piso con una cama de piedra y sobre esta una capa de aire y madera machihembrada para aislar el piso (figura 7c), para la captación de los rayos solares, se usaron planchas transparentes de policarbonato en el techo, y el uso de ventanas corredizas para abrirlas durante el día y cerrarlas en la noche (figura 7b), las ventanas con marco de madera y doble vidrio, puertas de madera, las construcciones de los invernaderos adosados a una de las paredes de la vivienda y con dirección hacia el norte, con estructura de madera y forrado con material de plástico agrofilm, con puerta y ventana para la ventilación (figura 7a), con dos funciones para el uso como la siembra de hortalizas así como otros alimentos y el calor generado y la distribución hacia el interior de la vivienda, después de realizar estos cambios en algunas viviendas se obtuvo en promedio una temperatura en el interior de la vivienda, para el mínimo de 5,7 °C, y con máximos en promedio diario de 16,2 °C, siendo la temperatura en el exterior en promedio -0,5 °C para los mínimos, con un incremento de 6 °C de temperatura entre el interior y el exterior.

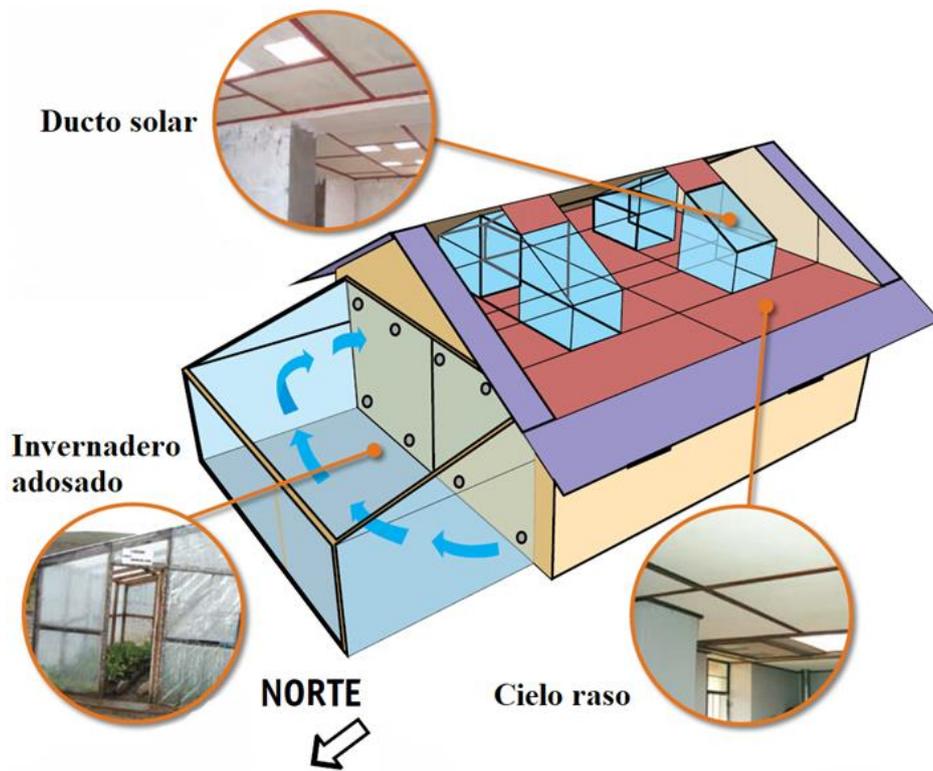


Fig. 6. Técnicas bioclimáticas presentadas en la vivienda realizado en *SketchUp*, ubicada en la provincia de Castrovirreyra [17].

Mejoras aplicadas en las viviendas de la comunidad de Santa Ana, en la provincia de Huaytara, en la región de Huancavelica, se presentan en la figura 7.

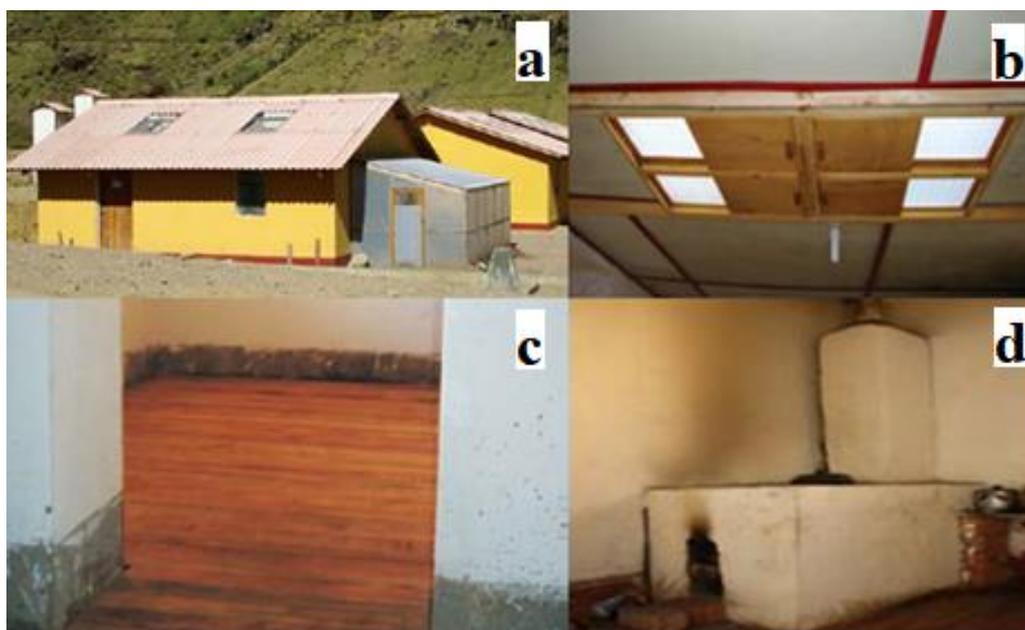


Fig. 7. Técnicas bioclimáticas aplicadas y cocina mejorada: (a) invernadero adosado a la vivienda, ubicada en la comunidad de Santa Ana, (b) ducto solar con ventanas corredizas en el techo, (c) piso con madera machihembrada, y (d) cocina mejorada [17].

- **Acondicionamiento térmico para edificaciones rurales Altoandinas en el centro poblado de San Felipe, Huancavelica, [18].**

Con el objetivo de afrontar el impacto de las heladas en la población, y mejorar las inadecuadas construcciones de las viviendas, falta de mantenimiento que luego produce las infiltraciones de aire del exterior hacia el interior de la vivienda, así como los puentes térmicos en ventanas, techos, puertas y pisos, el cual permite un descenso de la temperatura e inclusive llegando a temperaturas iguales a la exterior, se desarrolló un estudio piloto Acondicionamiento térmico para edificaciones rurales Altoandinas, teniendo como propósito el de elevar la temperatura en el interior de las viviendas. Esto se realizó en el departamento de Huancavelica, en los centros poblados de San Felipe (Pilpichaca – Huaytará) a una altitud de 4 480 msnm, con una latitud de 13,3° Sur y longitud 74,9° Oeste, con la ejecución de la Dirección Nacional de Construcción del MVCS en el año 2012. Antes de las mejoras constructivas de la vivienda (figura 8a) se tenía una temperatura promedio en el interior del ambiente de 4,6 °C con una temperatura promedio en el exterior de 2 °C, luego de las mejoras en el techo con la inclusión de planchas de fibrocemento y paja, para un mejor aislamiento térmico, en el piso se colocó una cama de piedra y madera machihembrada para un buen aislamiento higrotérmico, se mejoró las infiltraciones en los muros, se colocaron puertas de madera contra placadas, se incluyeron claraboyas en el techo con el uso de planchas de policarbonato traslúcido (figura 8d), y la construcción de un invernadero adosado (figura 8b), con lo cual se obtuvo una vivienda mejorada térmicamente (figura 8c), permitiendo así obtener una temperatura promedio en el interior de la vivienda de 7 °C siendo al temperatura promedio en el exterior de -1 °C, con lo cual se tiene una diferencia de 8 °C entre el interior y el exterior.



Fig. 8. Antes y después de los cambios realizados en las viviendas: (a) vivienda ubicada en el centro poblado de San Felipe, antes de las mejoras, (b) invernadero adosado a la vivienda, (c) vista exterior de la vivienda después de las mejoras, y (d) vista en el interior de las claraboyas en el techo [18].

- **Evaluación bioclimática de una vivienda rural Altoandina de la comunidad de San Francisco de Raymina de Ayacucho [7].**

En este trabajo se analizó dos viviendas, ubicadas en la comunidad de San Francisco de Raymina, a una altitud de 3 700 msnm, latitud de 13,7° Sur y longitud 73,8° Oeste, Ayacucho. La primera vivienda se trata de un albergue (figura 9d), en la figura 8a se muestra el diseño del albergue con el programa *SketchUp*, en el cual se le aplicaron diferentes técnicas bioclimáticas en su construcción, como invernadero adosado, claraboyas en el techo (figura 9b), tejas en el techo con aislamiento de ichu y plástico (figura 9e), cama de piedras y entablado de madera en el piso, cocina mejorada, también cuenta con una terma solar y un sistema fotovoltaico, se evaluó su comportamiento térmico y se comparó con lo obtenido con el programa de simulación térmica *EnergyPlus*. La segunda, es una vivienda tradicional que fue acondicionada térmicamente (figura 9c), cuenta con invernadero adosado (figura 9f), claraboyas en el techo (figura 9b), se analizó la temperatura en el interior de cada ambiente; además, se tomó en cuenta las opiniones de las personas que la habitan, en ambas viviendas se utilizaron sensores de temperatura marca HOBO, registradores de datos y micro estaciones ubicados de manera estratégica para la toma de datos de temperatura, humedad relativa y temperaturas superficiales, en cuanto a la toma de datos del clima se usó una estación meteorológica ubicada en la comunidad. Para la primera vivienda se obtuvo que el promedio de temperatura para el dormitorio norte, fue de 15,7 °C, mientras que, para el dormitorio sur con temperaturas menores a 11,2 °C, la sala con 14,3 °C y la cocina con 12,4 °C, el dormitorio norte y la sala están dentro de la zona de bienestar, sin embargo, el dormitorio sur y la cocina están por debajo. La técnica bioclimática que brinda un mayor aporte es la claraboya instalada en los techos del dormitorio norte y la sala. En la noche, la temperatura promedio horario del dormitorio orientado al norte es mayor a la temperatura en el exterior en 9 °C, en tanto

que, para el dormitorio orientado al sur su temperatura en el interior es mayor a la exterior en 7 °C. Para la segunda vivienda se obtuvo que la temperatura promedio en el interior del ambiente de la cocina es la mayor con 18,2 °C ya que cuenta con el fogón mejorada, las habitaciones del sur y norte registran en promedio una temperatura de 11,5 °C y 11,6 °C respectivamente, el interior de la sala presenta un promedio de temperatura de 13 °C. En la noche cuando se alcanzan las temperaturas mínimas, los dormitorios tienen un a temperatura promedio mayor en 8 °C con la temperatura en el exterior.



Fig. 9. Albergue construido y vivienda mejorada en San Francisco de Raymina: (a) diseño en *SketchUp* de la vivienda, (b) vista interior de las claraboyas en el techo, (c) claraboyas en el techo, vista desde el exterior, (d) albergue construido, vista desde el exterior, (e) tejas sobre el ichu y plástico, que van por encima del techo, y (f) vista del invernadero adosado a la segunda vivienda [7].

- **Simulación del desempeño térmico en viviendas altoandinas sostenibles con climatización pasiva en la provincia de El Collao [19].**

El objetivo principal fue determinar el comportamiento térmico apoyado en el método de balance de energía y conseguir que la temperatura en el interior de la vivienda sea cálido y sostenible, ubicada en la provincia de El Collao, Ilave, en la región Puno, con latitud de 16,1° Sur sobre los 3 868 msnm, la cual fue evaluada en los días de invierno, con una temperatura promedio mínima de 7.7 °C en el interior de la vivienda y con temperatura en el exterior de – 3,9 °C a las 4:00 horas, después de la construcción de la nueva vivienda con el uso de materiales que tienen propiedades termofísicas aceptables, buen aislamiento térmico en la envolvente como doble pared de adobe, para el cielo raso paja carrizo – yeso, en el piso, tierra apisonada con cama de piedra-plástico-paja y totora, y apoyados en el uso del software de simulación energética *EnergyPlus*, se obtuvieron promedios de temperaturas mínimas y máximas de 11 °C y 17,7 °C en el interior de la vivienda simulada, para una temperatura promedio mínima en el exterior de 2,2 °C.

II. EL CLIMA Y EL BIENESTAR TÉRMICO

En este capítulo se presentan las características principales del clima del Perú, así como algunas clasificaciones. También, se presenta el clima de la región Altoandina, específicamente, mediante el uso de mapas de las heladas y del gran potencial solar con el que se cuenta en el Altiplano. En el tema relacionado al bienestar térmico se presentan el concepto, los factores y modelos existentes.

2.1 Clima en el Perú

El Perú se encuentra ubicado en la región central y occidental del continente de América del Sur. En su límite con el océano Pacífico tiene el dominio sobre 200 millas de ancho, el cual convertido en kilómetros tiene un valor de 370,4 km, colinda por el sur con Chile, por el suroeste con Bolivia, por el este con Brasil y por el norte con Ecuador y Colombia. El Perú está considerado como la “síntesis climática mundial”, ya que posee la mayor variedad de climas (28 de los 32 climas que existen en el mundo), según la clasificación climática de Thornthwaite [20], el cual toma en cuenta valores de temperatura del aire y precipitación para su clasificación climática, además el Perú está considerado como uno de los doce países megadiversos a nivel mundial, de acuerdo con la declaración de Cancún en el 2002. El método de Köppen aborda el estudio de la fisiología vegetal, consideró que las plantas son indicadores de diversos elementos climáticos, por ello, en su clasificación climática mundial usó diferentes letras para caracterizar cada uno de los climas, en algunas indican el comportamiento de las precipitaciones y temperaturas [21]. La clasificación hecha por Rayter-Zúñiga está basada en la propuesta por Köppen, en la cual también se incluyen otros factores como la radiación, arquitectura tradicional, inversión térmica, altitud, entre otros. De acuerdo con lo mencionado se consideró 9 zonas climáticas para el Perú [21] que se presenta en la tabla 2.

Tabla 1. Zonificación climática del Perú según Rayter-Zúñiga [22].

Zona climática	Definición Climática	Porcentaje territorial (%)	Altitud (msnm)
Zona 1	Desértico costero	2,8	0 – 2000
Zona 2	Desértico	6,7	400 – 2000
Zona 3	Interandino bajo	3,9	2000 – 3000
Zona 4	Mesoandino	14,6	3000 – 4000
Zona 5	Altoandino	9	4000 – 4800
Zona 6	Nevado	1,4	> 4800
Zona 7	Ceja de montaña	9,7	1000 – 3000
Zona 8	Subtropical húmedo	12,2	400 – 2000
Zona 9	Tropical húmedo	39,7	80 - 1000

En el mes de diciembre del 2020, el SENAMHI elaboró un estudio, “Climas del Perú: Mapa de Clasificación Climática” que brinda información climatológica que servirá para la toma de decisiones en los temas relacionados a lo ambiental, social y territorial del país [23].

El Mapa de Clasificación Climática del Perú presenta 38 climas a nivel nacional, tomando las características de factores climatológicos como la temperatura, precipitación y evapotranspiración en cada departamento, esto es debido a que los puntos de observación son mayores en comparación con la versión anterior, se contó con una mayor implementación de técnicas de interpolación sofisticadas contando con expertos en áreas de geografía, ecología, hidrología, clima, forestal, ordenamiento territorial, y otros más, que juntamente permitieron una mayor aproximación mayor de los tipos de clima del Perú [23].

En la Norma Técnica Peruana EM.110, se mencionan las zonas bioclimáticas, y está referido a la clasificación del clima que determina los factores ambientales de las extensas áreas geográficas, necesarios para aplicar estrategias de diseño bioclimático de una edificación y obtener confort térmico y lumínico con una mayor eficiencia energética [10], y se presentan en la tabla 2 a continuación:

Factores que determinan el clima del Perú

Los factores están muy ligados a la situación del país en la zona intertropical (baja latitud, cerca de la zona ecuatorial), hay menor albedo la concentración de calor es más intensa y esto genera que sea muy caliente, la radiación solar es muy intensa, las modificaciones altitudinales que introduce la cordillera de los Andes, la Corriente Peruana o de Humboldt, cuyas aguas recorren las costas del país.

La Corriente Peruana o de Humboldt, es causada por un viento frío, seco, denso llamado Anticiclón del Pacífico Sur, que siempre se mueven en sentido antihorario, esta a su vez es causada por el efecto Coriolis.

2.2 Clima de la Región Altoandina

La región de los Andes, representa un porcentaje de 35,5% del territorio peruano, su altitud comprende desde los 1200 m hasta los 6 768 msnm, que es su pico más alto en el nevado del Huascarán [24].

La región Altoandina se encuentra ubicada en la Cordillera de los Andes. Dicha Cordillera viene a ser la zona que tiene mayor variedad de climas, mayor diversidad climática, lo que genera mayor diversidad es la altitud, es decir se presenta el factor, el cual consiste en lo siguiente, a menor altitud la temperatura, humedad y presión atmosférica son mayores y a medida que aumenta la altitud existe menor temperatura, humedad y presión atmosférica, estas variaciones de los elementos del clima, hace que la región andina tenga varios tipos de climas.

A partir de los 3 000 msnm, ya empieza un clima templado frío, con presencia de heladas, las precipitaciones estacionarias que son a partir de diciembre hasta marzo, hay un fuerte contraste térmico, es decir, en pleno día se puede estar a 15 °C expuestos al Sol y situándose en la sombra se puede estar hasta 10 °C. Desde junio hasta setiembre, durante el día el calor es fuerte debido a radiación solar, se puede llegar hasta 17 °C, pero en la noche sobre todo en la madrugada, con valores de temperatura de hasta -15 °C.

La temperatura empieza a disminuir, entre los 3 000 y 4 000 msnm, el clima es frío o boreal, también llamado climas del valle mesoandino, temperatura promedio es de 12 °C, en estas zonas ya se encuentran las heladas, ambiente seco, saludable, con precipitaciones

veraniegas, la humedad disminuye. Entre los 4 000 a 5 000, el clima es frígido, presencia de nieve, la masa de hielo no es continua, zonas secas, sobre los 5 000 el clima es gélido, la insolación es alta, es el ambiente más seco, heladas intensas.

Heladas: Es el descenso de temperatura ambiental que ocurre a ciertas altitudes, inclusive puede descender sobre los 0 °C, ocurre sobre los 3 200 msnm, en la zona Altoandina del Perú, en las épocas de invierno, producido por la falta de humedad y nubosidad, ya que a mayor altura hay mayor insolación, la radiación solar es más intensa, el ambiente es más seco, la humedad es mínima, se encuentra los contrastes térmicos [25]. Es lamentable que en nuestro país las heladas afectan todos los años a los pobladores de las zonas Altoandinas especialmente a los niños y adultos mayores. En la figura 10 se muestra en el mapa la frecuencia de los días de heladas anualmente, pudiéndose observar que en el sur es más recurrente, y que afecta principalmente los departamentos como Arequipa, Puno, Cusco, Apurímac, Huancavelica, Ayacucho, Pasco y Junín.

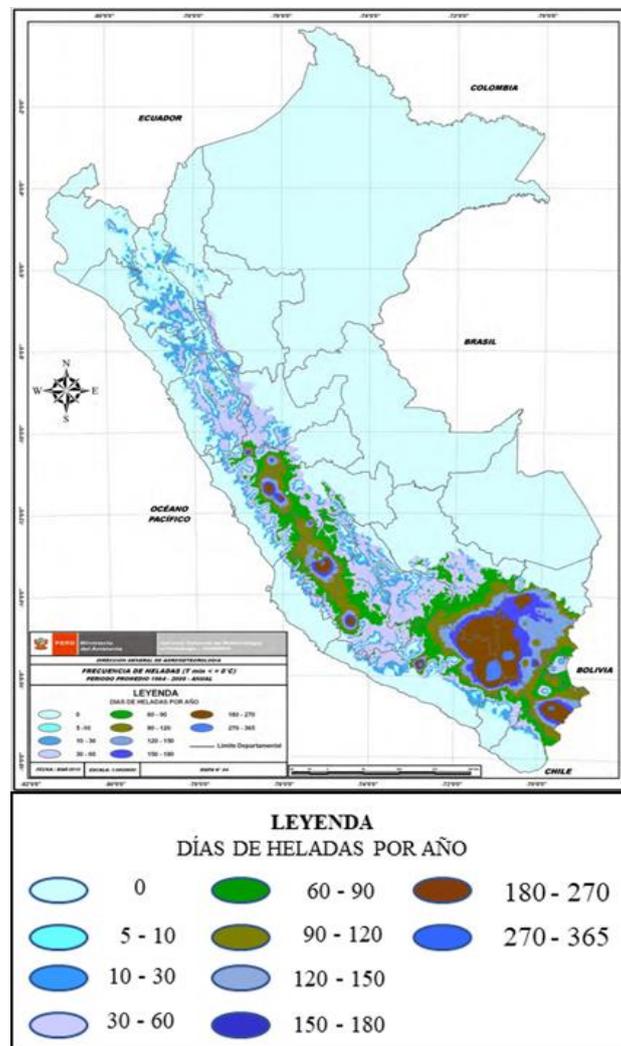


Fig. 10. Mapa de frecuencia de heladas, días de heladas por año [1].

El potencial solar con el que se cuenta en las zonas Altoandinas está comprendida entre 5,5 a 6,5 kWh·m⁻²·día⁻¹, en promedio diario durante un año [26], esto se puede observar en la figura 11, según el mapa de recurso solar elaborado por el Banco Mundial que toma como parámetro de medida la irradiación global horizontal [27].



Fig. 11. Irradiación solar global horizontal estimada, promedio diario anual, para el Perú [27].

2.3 Bienestar térmico

La palabra confort etimológicamente deriva del latín *confortare* (dar fuerza) que a su vez está formado por el prefijo *con-* (junto) y *fortare* (hacer fuerte) [28]. Algunas definiciones del confort térmico a continuación:

- i. Para las normas internacionales ISO 7730 y ASHRAE 55, el confort térmico “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico” [29]-[30].
- ii. Es “la ausencia de irritación o malestar térmico” [8].
- iii. Es una sensación neutra de la persona respecto a un ambiente térmico determinado [10].
- iv. “Estado de equilibrio resultante del balance de las cargas térmicas que se intercambian en el cuerpo humano y su ambiente inmediato, debido al proceso químico del metabolismo y al proceso fisiológico de termorregulación en respuesta a los elementos externos del clima: radiación, temperatura, humedad y movimiento del aire, como elementos principales [31].

El confort térmico comúnmente se usa para expresar cuando una persona se siente térmicamente neutra en relación con su ambiente, es decir, ni con mucho calor, ni mucho frío. Para llegar a la sensación de confort, el balance global de ganancias y pérdidas de

calor tiene que ser nulo, de tal forma que se conserve nuestra temperatura corporal normal [32].

Debido a las diferencias de latitudes, la realidad social, la economía y tecnología, el término confort no es el adecuado cuando se refiere a las zonas Altoandinas referentes en Perú, ya que en estas zonas la realidad está muy influenciada por otros factores como las heladas, el frío extremo, la humedad, la alta radiación que se dan en estos lugares siendo los más influyentes en la salud de los pobladores Altoandinos, por el cual la palabra confort no se ajusta según lo mencionado y no sería aplicable. Por estos motivos se utilizará la terminología bienestar térmico cuando se refiera a confort térmico [33].

2.3.1 Factores que influyen en el bienestar térmico

Existen diferentes factores que determinan el bienestar térmico, en la tabla 2 se presentan los factores y parámetros que influyen en la determinación del confort térmico, los cuales a su vez dependen de otras variables como ambientales, personales, arquitectónicos, etc.

Tabla 2. Factores y parámetros que determinan el bienestar térmico [34].

F A C T O R E S	Ambientales	Exteriores	Temperatura del aire
			Temperatura radiante
			Humedad relativa
			Velocidad del aire
	Personales	Fisiológicos y contributivos	Sexo
			Edad
			Peso
			Tasa de metabolismo Basal
			Muscular (Nivel de Actividad)
			Estado de Salud
			Intercambio de calor por ingestión de bebidas y alimentos
			Historial térmico Inmediato
			Mediato
			Tiempo de permanencia
	Socioculturales y Psicológicos	Socioculturales y Psicológicos	Variabilidad temporal y Espacial de los estímulos físicos ambientales
			Tipo de vestimenta
Expectativas de confort			
Contacto visual con el exterior			
P A R Á M E T R O S	Ambientales	Interiores	Temperatura del aire
			Temperatura radiante
			Humedad relativa
			Velocidad del aire
	Arquitectónicos	Adaptabilidad del espacio	Movilidad del ocupante dentro del espacio
			Modificación de elementos y dispositivos de control ambiental

Parámetros ambientales:

Temperatura seca del aire o temperatura de bulbo seco

Este parámetro es uno de los más principales en la determinación del confort térmico en un espacio y está referido principalmente al estado térmico del aire a la sombra. Para determinar si las personas sienten frío o calor en un determinado lugar, es necesario tener los datos de humedad y de temperatura. Con estos datos se puede estimar la zona para el cual la mayor parte de las personas sienten confort o bienestar, además de poder obtener un rango adecuado para un espacio de las viviendas o la vivienda en general, entendiéndose por temperatura seca del aire, a la temperatura del aire que prescinde de la radiación calorífica de los objetos que circundan ese lugar, además de los efectos de la humedad relativa y de los movimientos del aire [35].

Humedad relativa

Este parámetro se define como la cantidad de vapor de agua que hay en un kilogramo de aire con relación a la máxima cantidad de vapor que puede haber a una determinada temperatura. Su medición está dada por la temperatura de bulbo seco y húmedo, con una carta psicrométrica, además de medirlo con higrómetro [35].

Velocidad del aire

La influencia en las personas es fundamental, ya que tiene como funciones principales, refrescar y ventilar los ambientes interiores, de esta manera reduciendo la humedad y en consecuencia conservando ambientes más sanos [35].

2.3.2 Modelos existentes de bienestar térmico

Hay distintos enfoques para la determinación del confort térmico, los más nombrados son el enfoque cuantitativo y el enfoque cualitativo [36], por lo cual es necesario tomar en cuenta las relaciones que se dan entre el medio ambiente térmico y las sensaciones fisiológicas y psicológicas experimentadas por las personas frente a las condiciones existentes en dicho ambiente [37].

Enfoque cuantitativo o predictivo

Este enfoque también es conocido como analítico o determinista, el propósito metodológico es buscar fundamentalmente las relaciones de causa y efecto entre las variables implicadas con el objeto de estudio, por esta razón este enfoque es considerado determinista y se inclina a ser fenomenológico [36]. Para este modelo, establece que la explicación operativa del confort térmico se reduce a un estado de equilibrio resultante entre las cargas térmicas que se intercambian entre el cuerpo humano y su ambiente inmediato, a partir del proceso químico del metabolismo y el proceso fisiológico de termorregulación en respuesta a los elementos externos del clima: temperatura, humedad, radiación, movimiento del aire, como elementos principales [31]. El enfoque cuantitativo es altamente exitoso en el estudio de los sistemas simples con limitados componentes, y procura evidenciar principios universalmente aceptados [38]. Este modelo tiene su progreso en un número considerable de datos experimentales llevados a cabo con voluntarios en una cámara con condiciones climáticas monitorizadas, pudiéndose

concluir que la temperatura de la piel es un buen indicador de la sensación de confort térmico para individuos en ambientes fríos. Por el contrario, la humedad de la piel es un buen indicador para sujetos en ambientes cálidos en el que el sudor es un suceso más observable que los cambios de temperatura epidérmica [36]. Se considera a los humanos iguales desde el punto de vista biológico, físico y químico. Al ser humano se le considera como receptor pasivo en espera del balance energético [39].

Enfoque cualitativo

También conocido como adaptativo o empírico, la metodología que implica este modelo es comprender las relaciones entre los factores que conforman el objeto de estudio, del cual los resultados no necesariamente establecen fenómenos regulares [36]. A diferencia del enfoque cuantitativo, este es la alternativa para el estudio de sistemas complejos con muchos componentes interrelacionados, cuya explicación suele ser inestable por lo que no propone principios universales sino interpretaciones teóricas múltiples [38]. Se logró agrupar las características térmicas del ambiente y la transferencia de calor desde el cuerpo humano y hacia el mismo, con la subjetividad del comportamiento de las personas. Este modelo no solo toma en cuenta la relación física entre el sujeto y ambiente, sino que además la correlación fisiológica y psicológica a largo plazo, agregando las reacciones de aclimatación y decisiones que las personas efectúan para llegar a las condiciones de confort [40]. Según Humphreys y Nicol, el comportamiento humano es un elemento decisivo en la obtención del confort térmico, si ocurre un cambio y esto genera una incomodidad, los individuos responden de forma instintiva con el objetivo de regresar a las condiciones de bienestar. Nicol y Humphreys sugirieron por primera vez que dichas acciones tuvieron lugar a una regeneración iterativa entre la precepción de los individuos y su conducta, ya que estos lograron “adaptarse” a las situaciones climáticas además de diferentes variantes del medio en el que se realizaron los estudios. Por lo cual se derivó el nombre de *adaptación* y se conoce así los modelos e índices que se mantienen en este modelo [36].

En el estudio de este enfoque, se toma en cuenta encuestas de campo, reportes de la sensación térmica de los individuos en los diferentes entornos, además de vincularlas con las variables térmicas en dichos espacios, específicamente la temperatura de bulbo seco. Esto es, se encuestó a parte de la población acerca de su sensación de confort en los ambientes, de esta manera es factible aproximar la temperatura de confort o de neutralidad T_n , y se da cuando el cuerpo humano realiza un esfuerzo mínimo para alcanzar el confort térmico, teniendo los datos de las encuestas se estiman los límites del rango de confort [40], esta temperatura neutra también es conocida como neutral o de neutralidad por distintos autores [41], la correlación entre la sensación térmica de las personas y la temperatura ambiente promedio a la cual se habituaron, de este modo surgieron modelos que caracterizan la temperatura neutral como una función de la temperatura media exterior de cada lugar en específico, por lo general se obtienen en función de procesos de regresión lineal, de manera que dichos procesos toman la forma de ecuación de una recta como se muestra en la ecuación (1), [36].

$$T_n = b + m (T_{em}) \quad (1)$$

T_n : Temperatura de confort o neutralidad

b: Punto donde la recta de regresión interseca al eje de las ordenadas

m: Pendiente de la recta de regresión

Tem: Temperatura exterior media

A continuación, en la tabla 3 se muestran algunos valores de autores evaluados:

Tabla 3. Valores de b y m para los modelos de bienestar térmico [36].

Autor	b	m
Humphreys (1976)	11,9	0,534
Auliciems (1981)	17,6	0,31
Griffiths (1990)	12,1	0,534
Nicol et al. (1993)	17,0	0,38
Brager – De Dear (1998)	17,8	0,31
Humphreys – Nicol (2000)	13,5	0,54

III. TÉCNICAS BIOCLIMÁTICAS EMPLEADAS EN ZONAS ALTOANDINAS

Las técnicas bioclimáticas denominadas también componentes bioclimáticos [42], son el medio físico que se construye o se elabora con el fin de concretar el concepto de las estrategias bioclimáticas [26]. Los indicadores bioclimáticos nos dicen “qué hacer” mas no dicen “cómo hacerlo”, este último es el componente o técnica bioclimática, las cuales serán empleadas para el cumplimiento de las estrategias [6]. Con la apropiada interpretación de las estrategias bioclimáticas se establecerán las técnicas bioclimáticas respectivas, las cuales serán aplicadas en la edificación con el objetivo de proporcionar bienestar térmico a sus habitantes [42].

En el libro “Abrigando hogares” [32], se hace referencia de algunas técnicas bioclimáticas importantes empleadas en las viviendas de zonas Altoandinas, tanto en aislamiento y captación de calor, empleadas en pisos, techos, puertas, muros, ventanas, así como el uso del invernadero.

La envolvente de la vivienda está referida a los elementos constructivos que separan el aire interior del exterior, además definen el espacio. Se tienen los muros, techos, pisos, ventanas y puertas [43], [8].

3.1 Piso

Con el objetivo de evitar que la humedad del suelo repercuta en el aire del ambiente adyacente al piso, se presentan algunas formas de aislamiento térmico:

- Aislamiento higrotérmico con una cama de piedra de entre 10-15 cm de altura, dejando una capa de 5 cm de aire se coloca el entramado de madera, finalmente se colocan las tablas de madera anchas que será el piso de la habitación, así lo muestra la figura 12.
- Aislamiento con cama de piedras sobre el terreno, mortero de barro y paja de 10 cm de espesor, durmientes de madera sobre el mortero, tablas de madera sobre las durmientes. Otra opción sería la cama de piedras, mortero de barro y paja de 10 cm de espesor y sobre esta una capa de barro más fina y lisa, con mayor contenido de arena.
- Sábana de plástico sobre el terreno, durmientes de madera sobre el plástico, planchas de tecnopor incorporados entre las durmientes de madera, entablado de madera sobre las durmientes.
- Piso de cemento pulido, consiste en una capa de concreto de 10 cm de espesor y una capa de cemento pulido de 2,5 cm de espesor.

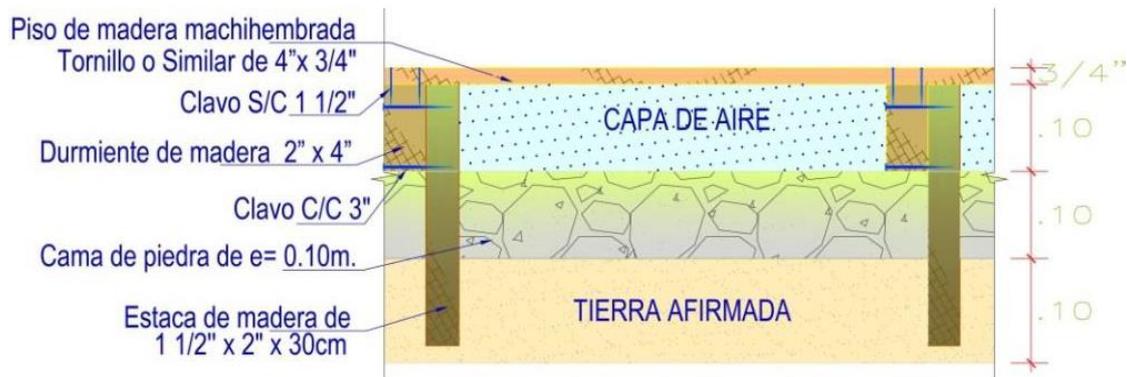


Fig. 12. Vista transversal de la aplicación del aislamiento térmico en el piso [18].

En la figura 13 se observa la aplicación de la técnica de aislamiento del piso mencionada en la imagen anterior, con cama de piedras sobre el piso de tierra y sobre estas los listones de madera y la capa de aire debajo del entablado con madera machihembrada.



Fig. 13. Piso con cama de piedras y tablas de madera machihembrada [26].

Otra variante en el aislamiento de pisos fue la utilización de una manta de polietileno (plástico) colocado sobre el piso de tierra, sobre este se colocaron los listones de madera y sobre estas planchas de poliestireno expandido de acero de 0,05 m de espesor (figura 14).



Fig. 14. Piso instalado en el MEV en San Francisco de Raymina [8].

3.2 Muros

De forma conservadora el adobe es el material más utilizado en las construcciones de las viviendas en zonas rurales Altoandinas, debido a sus propiedades térmicas, su gran capacidad para almacenar el calor y su económico costo para fabricarlo. Entre otras alternativas se presentan técnicas bioclimáticas usadas en el aislamiento térmico de muros:

- Muro de adobe (figura 15a).
- Muros de piedra, enlucidos con barro y paja, colchón de totora y enlucido de barro y paja en el exterior.
- Muro de adobe, capa de aire de 7 cm y muro de adobe, llamado también doble muro de adobe (figura 15b).

En la figura se observa los diferentes tipos de muros de adobe elaborados con barro y paja o ichu, el doble muro de adobe con separación de aire entre ellos, así como el uso de sogas que contribuyen con la resistencia frente a los sismos o los violentos vientos (figura 15c).



Fig. 15. Tipos de muros construidos de adobe: (a) muro simple de adobe en Imata, Arequipa [33], (b) doble muro con espacio de aire separado entre ellos en Ilave, Puno [8], y (c) muro de adobe reforzado con sogas de nylon (driza), Orduña, Puno [44].

Otra variante es el muro mejorado en su aislamiento con totora sobre el muro con una capa de 5 cm de espesor (figura 16a) amarrados con soga de nylon (figura 16b) que permite que el calor acumulado en el día no se escape durante la noche, sobre la totora se coloca una capa de barro con paja que cubre ambos materiales (figura 16c), tanto la totora como la soga para evitar el deterioro de estos.



Fig. 16. Aislamiento de muros en la comunidad de Orduña, Puno: (a) totora adosada sobre el muro de adobe para su aislamiento [43], (b) tensado de la sogá sobre la totora [43], y (c) embarrado de muros con mezcla de paja y barro [43].

La vivienda Sumaq Wasi se desarrolló con el Programa Nacional de Vivienda Rural, en el cual se tomaron diferentes aportes de especialistas que trabajaron desde el inicio de la creación del programa, mejorando las condiciones de temperatura dentro de la vivienda, para brindarles un mejor bienestar térmico, espacios limpios, reducción de hacinamientos y mejorar la calidad de vida de familias, con ventanas cenitales en el techo permitiendo el ingreso de la radiación solar aprovechando energías pasivas mejorando las condiciones de temperatura en las viviendas de zonas rurales, en el espacio que entra la radiación solar se acumula este calor durante el día, dependiendo de la zona los muros se elaboran con ladrillo y en el medio de dos muros se coloca el poliestireno expandido, en otros casos se construye con el adobe. En la figura se puede observar doble muro de ladrillo en el cual en el medio se tiene material de aislamiento (figura 17a), el cual es poliestireno expandido de 5 cm de espesor y se le conoce comercialmente como tecnopor (figura 17b).



Fig. 17. Muros construidos en viviendas Sumaq Wasi, Cusco: (a) construcción de una vivienda Sumaq Wasi con doble muro de ladrillo y aislante térmico en medio [45], y (b) poliestireno expandido entre los muros de ladrillo [45].

3.3 Techo

A continuación se mencionan algunas técnicas de aislamiento térmico de techos [32]:

- Cielo raso aislante, elemento constructivo cuya ubicación está por debajo del techo, con la finalidad de crear una cámara de aire que aísla del frío conservando de esta manera el calor y evitando su pérdida por la cubierta. Su construcción puede ser con planchas de triplay o tela arpillera, en el caso del triplay pueden ser horizontales o inclinados, se presenta también un cielo raso diferente, el cual consiste en un tejido y estructura de carrizo con acabado de enlucido de yeso.
- Calamina metálica, colchonetas de lana de oveja y planchas de fibrocemento.
- Planchas de fibrocemento, plástico polietileno, paja, tela gruesa y aire estanco.
- Calamina metálica, aire estanco y calamina metálica.
- Planchas de fibrocemento, material de paja y calamina metálica.
- Planchas de fibrocemento, barro con material de paja, plástico de polietileno y caña de bambú.
- Planchas de fibrocemento, material de paja, estera, aire aislado y plástico de polietileno.
- Planchas de calaminas metálicas y colchones de totora.
- Calamina metálica, plancha de poliestireno expandido y triplay.

La figura muestra algunas técnicas para el aislamiento de techos como colocar el ichu y el plástico y sobre estas las tejas (figura 18a y 18b), también se observa un colchón de totora colocado sobre las vigas de madera (figura 18c) y sobre este colchón se adiciona una capa alivianada de barro con paja y totora para mejorar el aislamiento térmico, y finalmente sobre este también se observa la colocación de calamina metálica (figura 18d).



Fig. 18. Técnicas bioclimáticas en techos: (a) listones de madera con ichu y plásticos encima del techo [46], (b) teja colocada encima de la madera y el ichu colocado en el

techo de la figura a [46], (c) colocación del colchón de totora sobre las vigas de madera [43], y (d) adición de una capa de tierra alivianada sobre el colchón de totora [47].

Técnicas de captación de calor

- Claraboya en el techo con ventanas corredizas elaboradas de madera y triplay que se cierran en la noche para evitar que se pierda el calor ganado durante el día, los materiales más usados para las claraboyas son el policarbonato alveolar y el ondulado.
- Invernaderos adosados o también llamados fitotoldos, construidos con muros de adobe y con estructura de madera en el techo y sobre esta se coloca el plástico grueso (uv) o policarbonato alveolar, o también muros de plástico o policarbonato sobre muro de sobrecimiento de 60 cm de altura con estructura de madera con cobertura de material traslúcido (plástico grueso o policarbonato).

La figura muestra un cielo raso elaborado con viguetas de madera como base para sostener la tela arpillera bien tensada para evitar que esta cuelgue (figura 19a), y sobre esta tela se colocó paja como aislante térmico, otra variante en forma de cielo raso es la construida con material de triplay como base y al medio con material de policarbonato traslúcido para que esté más iluminado el ambiente del módulo experimental de vivienda y se capte la radiación proveniente del Sol durante el día (figura 19b), cabe resaltar que en este caso cada base está separada por encima en cámaras que se forman con el techo, y las paredes laterales, otra técnica para la captación es colocando plástico transparente sobre el techo en el lugar de la claraboya (figura 19c), también para evitar que las pérdidas del calor acumulado se de en las noches se colocan ventanas corredizas que en el día se abren y eso permite que los rayos del Sol pasen por la claraboya y así se ilumine el ambiente y se caliente, y en la noche se cierran estas ventanas corredizas (figura 19d).



Fig. 19. Cielo raso y claraboyas en los techos: (a) cielo raso elaborado con tela arpillera debajo del techo con espacio para el ducto solar [48], (b) cielo raso elaborado con triplay como base y al medio con material de policarbonato alveolar traslúcida [49], (c) plástico como base y al medio con material de policarbonato alveolar traslúcida [49], (d) plástico transparente sobre el techo en el lugar de la claraboya [49].

transparente colocado en la claraboya [43] y (d) ventana corrediza colocada debajo de la claraboya para evitar las pérdidas de calor en la noche [48].

3.4 Puertas y ventanas

Tanto para las puertas y ventanas se usan los marcos de madera, se presentan algunas formas de aislamiento térmico:

- Ventana doble con marcos de madera.
- Ventana con vidrio doble y contraventana de madera.
- Doble puerta de madera, formando un espacio a modo de esclusa delante de la puerta exterior, las puertas deben tener marcos de madera.
- Una variación para la puerta es la inclusión de tecnopor en el espacio interior entre ambas caras de la puerta.

En la figura se observa el sellado con barro aplicado a los marcos de madera de la ventana para evitar las infiltraciones (figura 20a), para evitar la conducción en una ventana con marco de metal se utilizan los marcos de madera, se muestra también la contraventana abierta hacia el interior de la habitación (figura 20b), esto es con el fin de reforzar el aislamiento térmico en las ventanas.



Fig. 20. Aislamiento de ventanas y uso de contraventanas: (a) sellado con barro sobre las rendijas entre el marco de la ventana y el muro de adobe [48], (b) contraventana abierta hacia el interior para que ingrese la ventilación hacia el interior del dormitorio [17].

Para el caso de las puertas se muestra el uso de la madera como material predominante como material aislante del frío, en la figura se observan las puertas con marcos de madera (figura 21a y 21b), otra variante es el uso de doble puerta con un espacio separado entre ambas de 65 cm de distancia (figura 21c), que se conoce como esclusa con la finalidad de brindar mayor protección contra el frío y evitar un descenso de temperatura rápida como normalmente se abriría una sola puerta.



Fig. 21. Tipos de puertas de madera en viviendas Altoandinas: (a) puerta de madera sin oquedades [17], (b) sellado del marco de madera [16], y (c) esclusa conformada por dos puertas [6].

3.5 Invernadero adosado

Los invernaderos o también llamados fitotoldos, son sistemas pasivos indirectos de almacenamiento del calor [50], destinados a crear un microclima (efecto invernadero) [51], se trata de un espacio que forma parte o está unida a una edificación o zona habitable, además, se puede aislar por completo del edificio o zona habitable [52]. En relación a su construcción, tiene una cubierta o techo de un material que deja pasar la luz del sol, permitiendo de esta manera la acumulación de calor durante el día y liberándolo lentamente durante la noche, cuando las temperaturas caen severamente [53], para el caso de cultivo, lo protege de las condiciones climatológicas externas, permitiendo su crecimiento, dentro de la cual es factible la obtención de condiciones artificiales de microclima, y con ello la siembra de plantas fuera de estación en condiciones óptimas [54]. El invernadero permite controlar el ambiente interno, modificando el clima y creando las condiciones para el desarrollo de cultivos dentro de este, para cualquier época del año [53]. Dentro del invernadero se pueden cultivar hortalizas, frutas, sumando así a mejorar la dieta de la población beneficiada [55] y para fines de producción, ya que se pueden obtener productos de buena calidad, elevando la productividad, así como mejorar la oferta de los servicios de asesoría en producción y construcción de invernaderos [56]. Con respecto a los invernaderos adosados a las edificaciones, irán orientados hacia el norte y el techo será a un agua para maximizar la ganancia solar, los muros son de tapial, adobe o piedra, y el techo de plástico o calamina translúcida [48], La radiación solar atraviesa el techo transparente y calienta los muros, emitiéndose en este proceso una cantidad de calor que es retenida por el plástico o material de policarbonato alveolar que se coloca en el techo. Además, el calor se acumula gracias a la alta masa térmica de los muros que rodea el espacio del aire, ya que la radiación es absorbida [Abriando hogares]. Dependiendo del tipo de invernadero y la forma como se desee calentar el ambiente de la edificación, en algunos casos se elabora ductos entre el ambiente a calentar y el invernadero que, por la noche se transmite a través de dichos ductos al interior, donde se eleva la temperatura. El fitotoldo propaga el calor acumulado en su interior debido a la convección del aire cuando se abren las tapas de los ductos que comunican directamente con la vivienda o el ambiente a calentar. La diferencia entre el aire caliente que está en el interior del invernadero y el aire frío al interior de la vivienda, provoca el movimiento del

mismo en una u otra dirección, dependiendo de los ductos abiertos. Al abrir las tapas de la fila de ductos ubicados en el inferior, el aire frío saldrá de la casa y entrará en el invernadero, en este se calentará y subirá ya que disminuirá su densidad e ingresará a la vivienda al abrir los ductos de la fila superior, generando un lazo convectivo o corrientes de convección, siendo suficiente abrir los ductos al final del día cuando todavía hay sol, pero se deben cerrar cuando cae la noche [48], el calor acumulado también se transmitirá a través del muro que comparte el invernadero y la vivienda, debido a la conducción [32]. No obstante, los invernaderos adosados por su volumen y material transparentes utilizados, conforman una “trampa” de calor considerable proveniente de la radiación solar, el empleo de ductos no es lo más efectivo para los cambios de aire si la operatividad de los ductos no es el apropiado, debido a que se puede producir condensación al interior del invernadero y este trasladarse al interior de la vivienda generando la proliferación de hongos y en consecuencia una mala calidad del aire al interior de la vivienda, se ha visto que es más efectivo el empleo de ventanas en la pared o muro que comunica el invernadero y la vivienda [41].

En el altiplano de Bolivia se les denomina carpas solares, mientras que, en el altiplano peruano, fitotoldos y algunas familias, en idioma aymara los designan “*junt'u uta*”, que traducido al castellano significa “*casa caliente*” [53].

Los invernaderos o fitotoldos permiten:

Producción de hortalizas durante todo el año. Al controlar la temperatura y la humedad, se puede acelerar el crecimiento de los cultivos posibilitando que la cosecha se realice en menos tiempo. Tienen mejor rendimiento en comparación a campo abierto [53]. La producción es mayor en poco espacio de terreno. Hay mayor facilidad en el control de las plagas y enfermedades. Conservan los suelos ya que promueven la siembra en el mismo suelo en varias ocasiones. Protege a las plantas de las granizadas, nevadas, heladas y las bajas temperaturas en general. Hay menos exposición de contaminación de las plantas por parte del aire. La vivienda tiene mejor condición térmica saludable, ya que se mantiene caliente el ambiente de la vivienda adosada al invernadero [53]. Se consideran como un “espacio tapón”, ya que amplifican las oscilaciones térmicas exteriores. La distribución de calor a la vivienda se puede lograr por convección natural a través de ventanas y puertas, por ventilaciones a nivel del suelo y techo en el muro de masa. Es posible la implementación de un sistema de ventilación forzada que distribuya el calor hacia la pared sur de la vivienda [52]. Estos sistemas son beneficiosos en zonas rurales de bajas temperaturas, dado el abundante recurso solar con el que se cuenta. La implementación es de autoconstrucción y los materiales en su mayoría son asequibles a la población.

En la figura 22 se muestran algunos tipos de invernaderos adosados a las viviendas, así como a escuelas y el invernadero netamente usado en la obtención de cultivos como es el caso del altiplano en el país de Bolivia. En la figura 22a se muestra un invernadero adosado a una escuela, la institución educativa N° 40105 ubicada en el distrito de Tisco, en la provincia de Caylloma, región Arequipa, a una altitud de 4 329 msnm, con latitud 15,1° Sur, en la figura 22e se observa el interior de dicho invernadero con algunos cultivos plantados por los alumnos del centro educativo. En la figura 22b se tiene un invernadero construido netamente para uso agrícola, está ubicado en el altiplano, en el país de Bolivia, en la figura 22c se tiene un invernadero adosado a una vivienda mejorada, dicho

invernadero está construido por un esqueleto de madera y el plástico que cubre desde el techo hasta el piso, brinda calor a la habitación de la vivienda, ubicado en la comunidad de San Francisco de Raymina, en el distrito de Huambalpa, en la provincia de Vilcas Huamán, en Ayacucho, con altitud de 3 700 msnm y latitud $-13,7^{\circ}$ Sur, la figura 22d presenta el invernadero adosado a la vivienda, este invernadero tiene las paredes construidas de adoba y el techo cubierto con plástico grueso uv, ubicado en el anexo de San Juan de Yanacolpa, en el distrito de Santiago de Chocorvos, en la provincia de Huaytará en Huancavelica, a 4 000 msnm, y en la figura 22f se presenta otro modelo de invernadero adosado a la vivienda con paredes enlucidas con yeso y en el techo planchas de policarbonato traslúcido, ubicado en la localidad de San Felipe en el distrito de Pilpichaca, en la provincia de Huaytará en Huancavelica, a una altitud de 4 480 msnm. En los casos mencionados se puede inferir que el uso del invernadero se ha masificado en diferentes regiones del país siendo mayor su difusión en el sur del país, debido a la baja de temperaturas en zonas Altoandinas comprendidas sobre los 3 500 msnm, siendo esta una técnica muy utilizada y de fácil acceso para su construcción, según los datos de valores obtenidos en el incremento de temperatura en el interior de una vivienda.



Fig. 22. Invernaderos adosados: (a) Institución educativa, ubicada en Tisco, Arequipa, (b) cultivos producidos dentro de un invernadero en Bolivia [53], (c) vivienda en San Francisco de Raymina, Ayacucho [16], (d) vivienda en San Juan de Yanacolpa, Huancavelica [48], (e) centro educativo en Tisco, Arequipa y (f) vivienda, con paredes enlucidas con yeso y techo de plástico transparente, ubicada en la localidad de San Felipe, Huancavelica [18].

IV. CÁLCULO DE LA TEMPERTURA EN LA SIMULACIÓN

En este capítulo se presentará los fundamentos de transferencia de calor, los subprogramas usados por el *EnergyPlus* para la simulación, la temperatura en una zona calculada por el programa *EnergyPlus*, así como las aplicaciones de las ecuaciones de transferencia de energía que usa el programa en el cálculo de estas.

4.1 Transferencias de energía térmica

Se tienen tres mecanismos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación.

Conducción

La conducción es la transferencia de calor de las partículas que presentan mayor energía hacia las partículas colindantes de menor energía, debido a una diferencia de temperaturas [57], también conocida como la ley de Fourier. Para una pared plana de una sola dimensión, el flujo de calor por unidad de área se expresa en la ecuación (2):

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Donde:

q_x'' : Flujo de calor por conducción por unidad de área ($W \cdot m^{-2}$)

$\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura

k : Conductividad térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)

El flujo de calor es la rapidez con el cual se transfiere la energía en la dirección x por área unitaria. La conductividad térmica es una propiedad que mide la capacidad de los materiales para poder conducir el calor. El signo menos de la ecuación asegura que la transferencia de energía se dé en la dirección en que la temperatura es decreciente.

Convección

La convección es el intercambio de energía debido al movimiento de un fluido adyacente a una superficie sólida cuando ambas presentan diferencia de temperaturas [58], conocida también como la ley de enfriamiento de Newton, la ecuación (3) presenta el cálculo de la convección:

$$q = h A (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Donde:

q : Calor convectivo (W)

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección

A : Área (m^2)

T_s : Temperatura superficial

T_∞ : Temperatura del entorno

El flujo de calor convectivo por unidad de área ($W \cdot m^{-2}$) se puede expresar mediante la ecuación (4):

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Se tiene que la transferencia de calor por convección es el producto del flujo y el área, se presenta en la ecuación (5):

$$q = q'' A \quad (5)$$

Radiación

Es la transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas, con la diferencia de los mecanismos de conducción y convección, la radiación no necesita un medio para propagarse. Conocida como la ley de Stefan-Boltzman, se evalúa según la ecuación (6):

El flujo de calor que se emite por una superficie real está dad por la ecuación (6):

$$E = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (6)$$

Donde:

ε : Emisividad

σ : Constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

A : Área

T_s : Temperatura superficial

T_{alr} : Temperatura en los alrededores

La emisividad toma valores en el intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, cuando $\varepsilon = 1$, se tiene un cuerpo negro. El cuerpo negro es un absorbente perfecto y de la misma forma es un emisor perfecto [58].

4.2 Programas de simulación empleados

El programa de simulaciones *EnergyPlus* es un motor de cálculo y está basado en modelos de transferencia de calor en estados transitorios a fin de desarrollar cálculos térmicos además de energía en una vivienda o edificio. Se ejecuta como un sistema de caja negra, de tal forma que no se puede observar los cálculos que se desarrollan internamente ni las relaciones entre las variables introducidas y se obtienen las salidas en formato de hoja de cálculo, archivo gráfico o texto [19]. Es un software cuyo empleo es la de definir las necesidades energéticas de un edificio, mejorar el rendimiento de las instalaciones y adaptar el edificio ya definido a las condiciones térmicas demandadas, todas de forma eficiente [19].

SketchUp

El primer paso es la modelización del edificio, el cual se hace mediante el *SketchUp*, la realización de modelos en 3D, es mucho más rápida y fácil. Aquí también se asignan los tipos de espacios, así como las zonas térmicas [59].

OpenStudio

El programa de simulaciones *EnergyPlus* incorporó un *plug-in* para el programa de *Google SketchUp*, el cual es conocido como el *OpenStudio* [60]. Dentro de este software se crean los materiales, se asignan los materiales de construcción, así como las cargas internas, horarios, etc., se configuran las superficies que abarcan la envolvente del edificio a estudiar [33].

EnergyPlus

Una vez realizado el diseño, se guarda como archivo con extensión .idf, el cual es un archivo de entrada al *EnergyPlus* [61].

La simulación se realiza con este software, el cual es un motor de cálculo que usa los balances de energía de transferencia de calor que dependen del tiempo, así se puede determinar la temperatura en el interior, demanda de energía de calefacción o de refrigeración de un edificio [12], se abre el subprograma *EP-Launch*, en el cual se ingresan dos archivos, el primero es el archivo creado con extensión .idf, y el otro es el archivo para el clima con extensión .EPW, luego se ejecuta el programa y se obtiene un archivo de salida en formato .CSV, texto o archivo gráfico [33].

4.3 Ecuaciones usadas por el programa *EnergyPlus*

Se presentarán algunas ecuaciones que el *EnergyPlus* utiliza para el cálculo de temperatura en una zona, conducción en una pared, convección en una superficie exterior e interior, así como la radiación.

Integración de la zona y el sistema de aire

Ecuación de balance de calor en el aire de la zona, ecuación (7). Esta ecuación supone que el caudal másico de aire de suministro de la zona es precisamente igual a la suma de caudales de aire salientes de la zona a través de la cámara de aire de retorno del sistema y se extraen directamente de la zona.

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_Z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_Z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_Z) + \dot{Q}_{sys} \quad (7)$$

Donde:

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ = Suma de las cargas internas convectivas

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_Z)$ = transferencia de calor por convección desde las superficies de la zona

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_Z)$ = transferencia de calor debido a la infiltración de aire exterior

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_i (T_{zi} - T_Z)$ = transferencia de calor debido a la mezcla de aire entre zonas

$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_Z)$: salida de sistemas de aire

$C_Z \frac{dT_Z}{dt}$ = energía acumulada en el aire de una zona

$C_Z = \rho_{air} C_p C_T$: capacitancia del aire

ρ_{air} = densidad del aire de la zona

Desestimando la capacitancia del aire (C_Z) y considerando que la energía del sistema que se proporciona a la zona se puede obtener en función de la diferencia de la entalpía del aire de suministro y la entalpía del aire que sale de la zona, se obtiene la ecuación (8):

$$\dot{Q}_{\text{sys}} = \dot{m}_{\text{sys}} C_p (T_{\text{sup}} - T_Z) \quad (8)$$

Con esta consideración, esta ecuación infiere que el caudal másico de aire de suministro de la zona es precisamente igual a la suma de los caudales de aire que salen de la zona a través de la cámara de aire de retorno del sistema y se extraen directamente de la zona. Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7) se obtiene la siguiente ecuación:

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_Z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_Z) + \dot{m}_{\text{inf}} C_p (T_{\infty} - T_Z) + \dot{m}_{\text{sys}} C_p (T_{\text{sup}} - T_Z) \quad (9)$$

El programa *EnergyPlus* provee de tres algoritmos de solución diferentes para resolver las ecuaciones de equilibrio de humedad y energía del aire de la zona. Los cuales están definidos en el objeto `ZoneAirHeatBalanceAlgorithm`: `3rdOrderBackwardDifference`, `EulerMethod` y `AnalyticalSolution`. Los dos primeros métodos para resolver la ecuación (9) usan la aproximación en diferencias finitas mientras que el tercero usa una solución analítica.

Para el cálculo del término derivado con respecto al tiempo se utilizó una aproximación en diferencias finitas (fórmula de Euler), con este método de Euler quedó limitado el tamaño del paso de tiempo en algunas condiciones. A fin de obtener una mejora, se desarrollaron expresiones de orden superior con los respectivos errores de truncamiento, con el objetivo de permitir el uso de pasos de tiempo más grandes. Se experimentaron con aproximaciones de segundo a quinto orden según Taylor (1990) [5], concluyendo que la aproximación en diferencias finitas de tercer orden, dio un buen resultado en la ecuación de la actualización de la temperatura de la zona. Históricamente el programa *EnergyPlus* usa esta forma y es el valor predeterminado actual designado `3rdOrderBackwardDifference`, este algoritmo demanda temperaturas del aire de la zona en tres pasos de tiempo anteriores y utiliza coeficientes de temperatura constantes, con el supuesto de que las longitudes de los tres pasos de tiempo anteriores son iguales. El algoritmo `AnalyticalSolution` es un enfoque de integración. Mientras que la aproximación de diferencia finita de tercer orden proporciona estabilidad sin requerir un paso de tiempo prohibitivamente pequeño, este algoritmo solo requiere la temperatura del aire de la zona para un paso de tiempo anterior, en lugar de tres pasos de tiempo anteriores como lo induce el algoritmo `3rdOrderBackwardDifference` [5]. La solución integrada (analítica) para la temperatura en la zona puede expresarse como sigue:

$$\begin{aligned}
& T_z^t \\
& = \left(T_z^{t-\delta t} \right. \\
& \quad \left. - \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p} \right) \\
& \quad * \exp \left(- \frac{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p}{C_z} \delta t \right) \\
& \quad + \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p}
\end{aligned} \tag{10}$$

Conducción a través de las paredes

Módulo de función de transferencia por conducción

El resultado principal de series de tiempo es la ecuación del factor de respuesta, el cual vincula el flujo en una superficie dado un elemento, con una serie infinita de datos de temperatura en ambos lados, así lo muestra la ecuación (11):

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=1}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \tag{11}$$

donde q'' es el flujo de calor, i denota el interior del elemento de construcción, T es temperatura, o denota el exterior del elemento de construcción, t es el paso de tiempo actual, X e Y son los factores de respuesta.

La solución nueva comprende elementos los cuales son llamados Funciones de Transferencia por Conducción (FTC) [5], y su forma básica de solución es:

Para el flujo de calor interior:

$$\begin{aligned}
q''_{ki}(t) & = -Z_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_0 T_{o,t} \\
& \quad + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta}
\end{aligned} \tag{12}$$

Y para el flujo de calor exterior:

$$\begin{aligned}
q''_{k0}(t) & = -Y_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_0 T_{o,t} \\
& \quad + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{k0,t-j\delta}
\end{aligned} \tag{13}$$

Donde:

X_j : Coeficiente FTC exterior, $j = 0,1, \dots nz$.

Y_j : Coeficiente FTC cruzado, $j = 0,1, \dots nz$.

Z_j : Coeficiente FTC interior, $j = 0,1, \dots nz$.

Φ_j : Coeficiente de flujo FTC, $j = 1,2, \dots nq$.

T_i : Temperatura interior de la superficie

T_0 : Temperatura exterior de la superficie

q''_{k0} : Flujo de calor por conducción en la cara exterior.

q'' : Flujo de calor por conducción en la cara interior.

El sistema de espacio de los estados básicos se describe por medio de las siguientes ecuaciones matriciales lineales (14) y (15):

$$\frac{d[x]}{dt} = [A][x] + [B][u] \quad (14)$$

$$[y] = [C][x] + [D][u] \quad (15)$$

En el que x es un vector de variables de estado, u es un vector de entradas, y es el vector de salida, t es el tiempo y A , B , C y D son las matrices de coeficientes. Por medio del álgebra matricial, el vector variable de estado $[x]$ se puede eliminar y el vector de salida $[y]$ tiene relación de forma directa al vector de entrada $[u]$, además de los historiales de tiempo de los vectores de entrada y salida [5]. Esta representación se puede utilizar para la resolución de la ecuación de conducción de calor transitorio, usando la aplicación de una cuadrícula de diferencias finitas sobre las diferentes capas de los elementos de construcción. Para este caso se denominó a las variables de estado como temperaturas nodales, las temperaturas ambientales tanto en el interior como en el exterior son las entradas, y los flujos de energía resultantes en ambas superficies son las salidas. Teniendo en cuenta que se asume solo transferencia de calor por convección, pero también se da la transferencia de energía por radiación. Las temperaturas nodales se pueden eliminar, permitiendo obtener los flujos de calor en función de las temperaturas ambientales [5]. En comparación con las funciones complejas empleadas por el método de transformadas de Laplace, esta resolución tiene mayor significado físico.

Las funciones de transferencia de conducción resultó ser un método eficiente para calcular los flujos de calor en las superficies ya que eliminan la necesidad de conocer las temperaturas y los flujos en el interior de la superficie. Aunque, las series de funciones de transferencia de conducción se tornan más inestables a medida que el paso de tiempo se hace más pequeña. Para resolver este problema se usó un método, el cual consistió en mantener dos grupos de historiales fuera de fase uno del otro, se pudo trabajar con dos grupos de historiales desfasados en un valor que corresponde a la mitad del paso de

tiempo, esto permitió que más grupos de historiales de temperatura y flujo pudieran ser usados, a su vez el paso de tiempo de la simulación pueda tomar valores: 1/2, 1/4, 1/5, etc., del mínimo del paso de tiempo permitido para cálculos de FTC [5]. Se pudo obtener intervalos más pequeños favorables para el cual las series FTC sean estables, con esto fue posible cálculos de balance de energía usando la información actualizada de la superficie en un paso de tiempo más reducido del que podía permitir una serie de historial FTC. Este método no necesita de la interpolación. Otro método fue con el uso de las interpolaciones sucesivas “Interpolación secuencial de nuevos historiales” para resolver el siguiente grupo de historiales de temperatura y de los flujos, el historial actual es interpolado de forma directa del grupo historial previo por medio del uso del corrimiento de fase de tiempo necesario, mientras más interpolaciones se realizan los datos de salida de temperaturas y los flujos se suavizan. El método final que usaron fue el tipo híbrido, “Historial maestro con interpolación” [5], el cual fue un mixto de los dos métodos mencionados, el grupo historial “maestro” se mantuvo actualizado durante todo el tiempo, con esto se solucionó los eventos actuales que propagaba información retrasada en el tiempo, para los flujos de la superficie calculado en tiempos desfasados con el historial maestro, un nuevo historial de tiempo se interpola de los valores del historial maestro, con esto se eliminó la información retrasada en el tiempo y solamente se requirió el almacenamiento compatibles de los dos grupos de historiales para las temperaturas y los flujos.

Balance de calor en la superficie exterior

La figura 23 muestra la distribución de la interacción entre la pared y su entorno del ambiente exterior, como la radiación de onda corta por parte de la luz solar incidente, la reflejada y la difusa, radiación de onda larga del ambiente y el intercambio de calor por convección de la pared con el aire exterior.

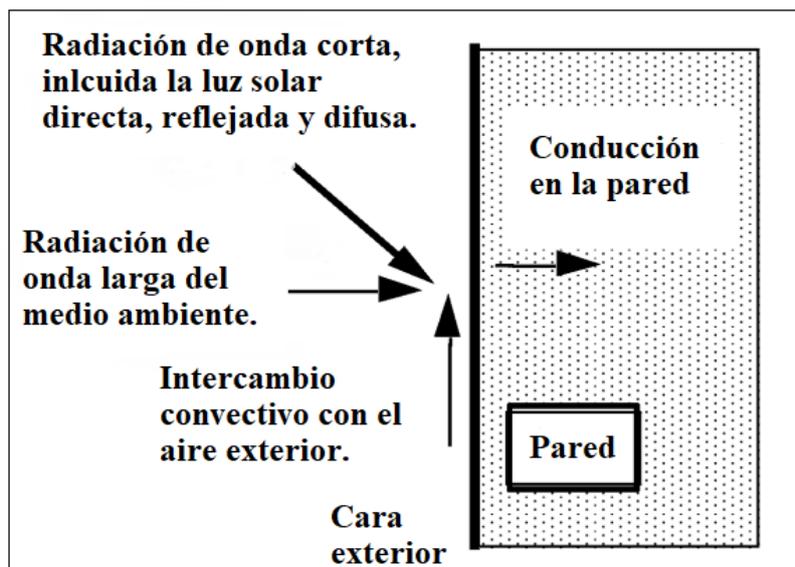


Fig. 23. Esquema de volumen de control de balance de calor exterior [5].

La ecuación (16) es la que representa el balance:

$$q''_{\alpha_{sol}} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (16)$$

Donde:

$q''_{\alpha_{sol}}$: Flujo de calor de radiación solar directa y difusa absorbida (longitud de onda corta), ($W \cdot m^{-2}$)

q''_{LWR} : Intercambio neto de flujo de radiación de longitud de onda larga con el aire y los alrededores ($W \cdot m^{-2}$).

q''_{conv} : Intercambio de flujo convectivo con el aire exterior ($W \cdot m^{-2}$).

q''_{ko} : Flujo de calor por conducción hacia la pared ($W \cdot m^{-2}$).

Balance de calor interior

La figura 24 muestra el balance de calor donde se considera las caras internas de las superficies de la zona, comúnmente se modela con cuatro componentes de transferencia de calor juntos, los cuales son la conducción a través de elementos de construcción, convección del aire, la reflectancia y la absorción de radiación de onda corta y el intercambio de radiación en la onda larga.

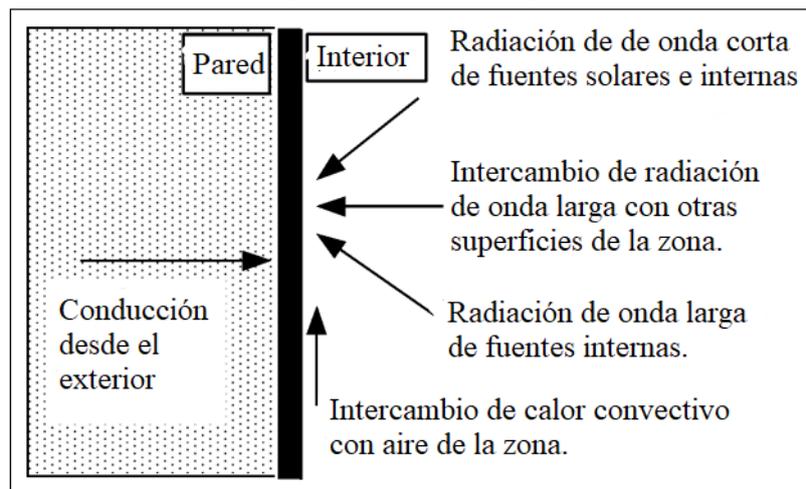


Fig. 24. Gráfico de volumen de control de balance de calor interior [5].

El balance de calor en la cara interior se presenta de la siguiente forma, ecuación (17):

$$q''_{LWX} + q''_{sw} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (17)$$

Donde:

q''_{LWX} : Flujo de intercambio radiante de onda larga neta entre las superficies en una zona o grupo de zonas, ($W \cdot m^{-2}$)

q''_{sw} : Flujo neto de radiación de onda corta a la superficie desde las luces, ($W \cdot m^{-2}$)

q''_{LWS} : Flujo de radiación de onda larga de equipos de zona o grupo de zonas, ($W \cdot m^{-2}$)

q''_{ki} : Flujo de conducción a través de la pared, ($W \cdot m^{-2}$)

q''_{sol} : Flujo de radiación solar transmitido absorbido en la superficie, ($W \cdot m^{-2}$)

q''_{conv} : Flujo de calor convectivo al aire de la zona, ($W \cdot m^{-2}$)

La transferencia de calor de la convección en la superficie el *EnergyPlus* utiliza la formulación clásica, el cual la representan la ecuación (18):

$$Q_c = h_{c,ext} A (T_{surf} - T_{air}) \quad (18)$$

Donde:

Q_c : Tasa de transferencia de calor por convección exterior

$h_{c,ext}$: Coeficiente de convección exterior ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)

A : Área de superficie (m^2).

T_{surf} : Temperatura de la superficie ($^\circ C$).

T_{air} : Temperatura del aire exterior ($^\circ C$).

EnergyPlus presenta diversas formas para el cálculo del coeficiente convectivo exterior, se puede ejecutar en dos niveles. El primero presenta opciones disponibles en el objeto de entrada `SurfaceConvectionAlgorithm:Outside` el cual permite seleccionar las ecuaciones del modelo que se aplican en todo el modelo. Para los objetos de entrada `SurfaceProperty:ConvectionCoefficients` y `SurfaceProperty:ConvectionCoefficients:MultipleSurface` de igual manera proporcionan maneras de seleccionar las ecuaciones o valores del modelo que se aplican a superficies específicas. Las opciones básicas se conocen por medio de la clave utilizada para la entrada e incluyen, `SimpleCombined`, `TARP`, `MoWiTT`, `DOE-2` y `AdaptativeConvectionAlgorithm` [5].

Radiación de onda corta externa

Están incluidas la radiación solar incidente directa y difusa absorbida por la cara de la superficie. Los factores que influyen son la ubicación, el ángulo de inclinación de la superficie, las propiedades del material de la superficie, condiciones climatológicas, etc.

Radiación de onda larga externa

El intercambio neto de flujo de radiación de longitud de onda larga con el aire y los alrededores es un planteamiento de referencia de intercambio

Es un planteamiento modelo de intercambio de radiación entre la superficie, el cielo y el suelo. El flujo de calor por radiación se obtiene partiendo de la absorptividad de la superficie, temperatura de la superficie, temperaturas del suelo y el cielo, y factores de vista del suelo y cielo. El intercambio entre las superficies depende de las temperaturas de la superficie, el entorno y las propiedades de los materiales de las superficies. Normalmente se aceptan algunos supuestos para los cálculos de cargas de edificios:

- Cada superficie emite o refleja difusamente y es gris y opaca ($\alpha = \varepsilon$, $\tau = 0$, $\rho = 1 - \varepsilon$).
- Cada superficie está a una temperatura uniforme.
- El flujo de energía que sale de una superficie se distribuye uniformemente por toda la superficie.
- El medio dentro del recinto no participa.

Tomando como ejemplo un recinto que consiste de la superficie exterior del edificio, la superficie del suelo y el cielo, y usando los supuestos mencionados, se determina el flujo de calor radiante de onda larga en la superficie exterior del edificio, el cual es la suma de los componentes debidos al intercambio de radiación con el suelo, el cielo y el aire, y se tiene la ecuación (19):

$$q''_{LWR} = q''_{gnd} + q''_{sky} + q''_{air} \quad (19)$$

El *EnergyPlus* aplica la ecuación de Stefan-Boltzmann, para la ecuación (20) de la siguiente forma:

$$q''_{LWR} = \varepsilon\sigma F_{gnd}(T_{gnd}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon\sigma F_{sky}(T_{sky}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon\sigma F_{air}(T_{air}^4 - T_{surf}^4) \quad (20)$$

Donde:

ε : Emitancia de onda larga de la superficie.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

F_{gnd} : Factor de vista de la superficie de la pared a la temperatura de la superficie del suelo.

F_{sky} : Factor de visión de la superficie de la pared a la temperatura del cielo

F_{air} : Factor de vista de la superficie de la pared a la temperatura del aire

T_{surf} : Temperatura de la superficie exterior.

T_{gnd} : Temperatura de la superficie del suelo.

T_{sky} : Temperatura del cielo.

T_{air} : Temperatura del aire.

Las ecuaciones presentadas son una pequeña muestra de cómo el programa de simulaciones *EnergyPlus* realiza el cálculo de algunos parámetros de medida y algunos algoritmos de cálculo que se usan. Existen diversos métodos de cálculo, supuestos, consideraciones, valores predeterminados, teoremas, ecuaciones, etc., que considera el programa para poder obtener una aproximación lo más cercana posible a lo real.

V. IMATA

El distrito de San Antonio de Chuca, fue creado el 14 de noviembre de 1944, mediante la Ley N° 10011 durante el gobierno del presidente Manuel Prado Ugarteche. Se encuentra ubicado al sur de la ciudad de Arequipa a 195 km de distancia; pertenece a uno de los 20 distritos con que cuenta la provincia de Caylloma en la región de Arequipa.

Se encuentra a una altitud de 4 519 msnm. Tiene una superficie total de 2 225 km² de distancia. Por el Norte limita con el distrito de Yanque, Chivay; por el Este, distrito de Santa Lucía – Puno; por el Oeste, distrito de Yanahuara – Arequipa y por el Sur, distrito de San Juan de Tarucani – Arequipa. Cuenta con una aproximación de 1500 habitantes según datos del INEI, 2017 [62]. Cabe mencionar que su desarrollo se debió por la construcción de una estación de tren que unió la vía entre Arequipa y Puno. Una gran cantidad de trabajadores que laboraban en la empresa de ferrocarril tuvieron la necesidad de trasladarse al lugar, con la finalidad de realizar su trabajo debidamente, de esta manera, con el pasar de los años, otras familias también fueron situándose en los alrededores de la estación de tren que se construyó.

Anexos: San Antonio de Chuca, Imata Capital, Viscachani, Pillone, Vincocaya, Colca Huallasta, Alto Paracayo.

El centro poblado de Imata está ubicada a una altitud de 4 519 msnm, en el distrito de San Antonio de Chuca, en la provincia de Caylloma, Arequipa, al sur del Perú. En la figura 25 se muestra el mapa del Perú, la ubicación del departamento de Arequipa (figura 25a), la provincia de Caylloma, además del centro poblado de Imata indicado con un punto rojo (figura 25b).

Coordenadas geográficas:

Latitud: 15° 50' 18,92" S

Longitud: 71° 5' 28,46" W

Zona horaria GTM: -5

Altitud: 4 519 msnm



Fig. 25. Ubicación del Centro Poblado de Imata: (a) en el mapa del Perú, departamento de Arequipa, y (b) en la provincia de Caylloma, en el distrito de San Antonio de Chuca [63]-[64].

En la figura 26, se observa una toma aérea de Imata (figura 26a) donde el indicador con la letra “C” indica la ubicación del Tambo de Imata, con un acercamiento que visualiza los dos MEVs (figura 26b) desde el aire, y en la última imagen (figura 26c) ya se puede observar los módulos experimentales con invernadero (adelante) y sin invernadero (al fondo).



Fig. 26. Panorama aéreo del centro poblado de Imata [64] y de los MEV: (a) vista aérea de Imata con las ubicaciones de instituciones con las que cuenta [64], (b) ubicación de los MEV, y (c) vista de los MEV, MEV1 sin invernadero (atrás), MEV2 con invernadero (adelante).

Ubicaciones en el mapa.

A: Comisaría

B: Centro de Salud

C: Tambo del MVCS

D: Centro educativo

E: Albergue

F: Iglesia

G: Municipalidad

En la figura 27 se muestra las condiciones severas del clima para el centro poblado de Imata en épocas de heladas, generalmente de ocurrencia entre los meses de abril hasta setiembre. En la figura 27a se muestra parte de la plaza principal y la municipalidad de San Antonio de Chuca y se puede apreciar el grosor de la nieve sobre el piso que aproximadamente fue de 10 cm de espesor, en tanto que la figura 27b muestra el panorama del centro poblado de Imata y la caída de la nieve sobre los techos de las viviendas, la figura 27c muestra las afueras del centro educativo ubicado cerca de la municipalidad y en la figura 27d se muestra a dos pobladores en el campo junto a sus animales (llamas y alpacas) en sus corrales, donde se puede observar que el terreno donde crece el ichu está totalmente cubierto de nieve.



Fig. 27. Centro poblado de Imata para algunos días de invierno. Adaptado del diario La República [65].

5.1 Clima

Se muestran algunos parámetros climatológicos de media correspondientes al registro de datos para la estación Davis Vantage Pro Plus ubicada en la municipalidad de Imata, en el cuarto nivel, estación meteorológica del SENMAHI ubicada en el centro poblado de Imata, y datos descargados del programa de Solcast, todas las mediciones se realizaron para el año 2018.

Temperatura

La figura 28 resume los valores de la temperatura del aire promedio mensual que corresponden al año 2018 para Imata, los datos fueron registrados por el SENAMHI, que cuenta con una estación instalada en el lugar de estudio [14]. Se muestra que desde el mes de mayo hasta el mes de setiembre la temperatura media muestra valores por debajo a 2°C, siendo estos meses de heladas o bajas temperaturas, intensificándose en junio y julio.

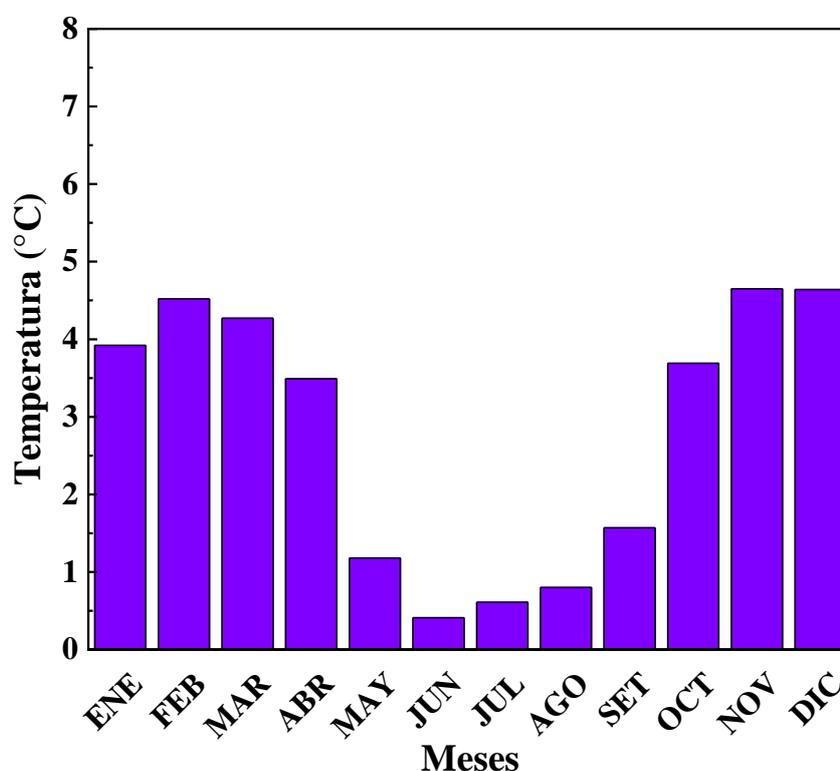


Fig. 28. Temperatura media mensual (T_{m-m}) de Imata según datos del SENAMHI, 2018.

En la figura 29 se presentan los valores mensuales de temperaturas para el año 2018, se muestra la temperatura diaria mensual, la media (T_{m-m}), media máxima ($T_{m\acute{a}x-m}$), y media mínima ($T_{m\acute{m}n-m}$); temperatura extrema mensual, máxima y mínima, en el cual, el mes que registra la temperatura más baja es julio, con una media de 1,2 °C, y temperaturas extremas mínimas de hasta -15,3 °C para el mes de setiembre, mientras que para el mes de diciembre se presentan las temperaturas más altas con una media de 5,3 °C, y temperaturas extremas diarias mensuales de -10,9 °C y 17,5 °C. La oscilación térmica media anual fue de 16,2 °C. La temperatura promedio anual fue de 3,7 °C, las mínimas temperaturas se registraron entre las 4:00 y 5:30 horas del día y las máximas entre las 12:00 y 15:00 horas del día. En relación a las temperaturas mínimas extremas e incluso temperaturas medias mínimas, la problemática de las heladas para Imata se presentan durante todo el año y no solo en los meses de mayo a setiembre. Haciéndose más intensas en este caso, 2018, en los meses de agosto y setiembre, y las temperaturas máximas no llegan a superar los 18 °C. Las líneas que unen los datos tanto de la temperatura media diaria mensual, temperatura media máxima y mínima mensual se han trazado con el fin de obtener una mejor visualización y observar así su tendencia.

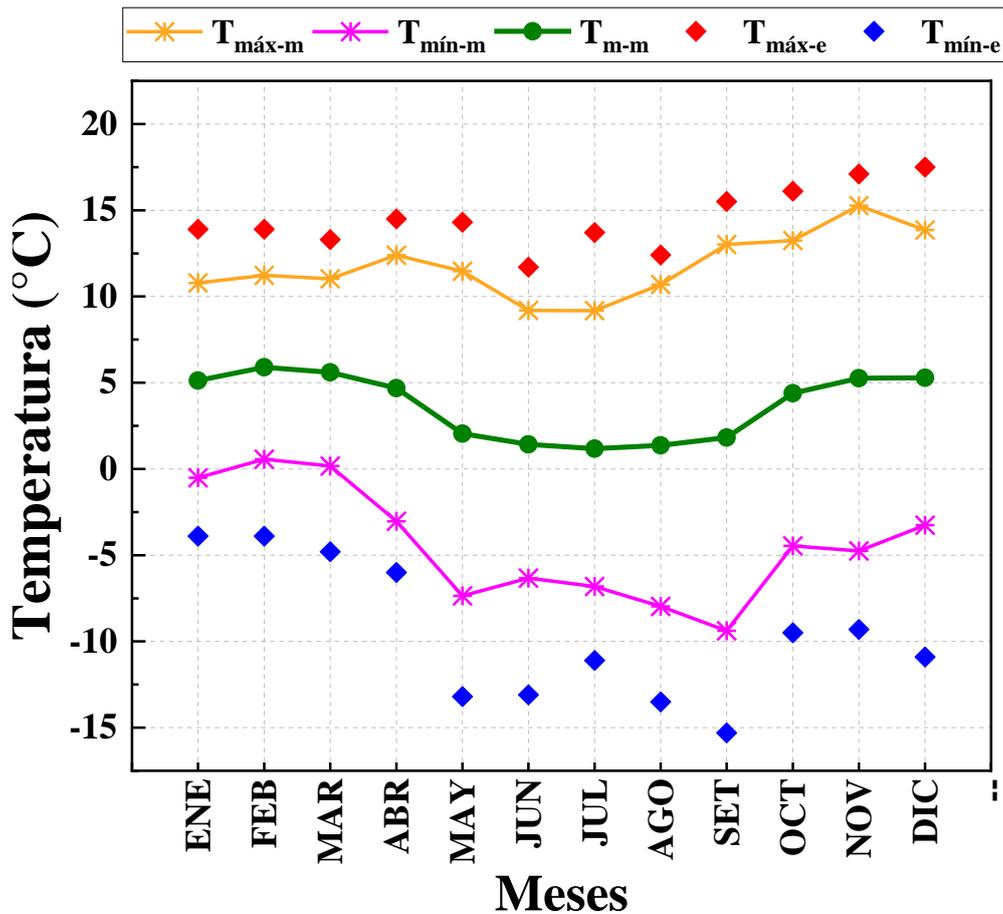


Fig. 29. Temperaturas medias diarias mensuales (T_{m-m}), temperatura promedio máximo ($T_{máx-m}$), temperatura promedio mínimo mensual ($T_{mín-m}$), temperatura promedio máxima extrema ($T_{máx-e}$) y temperatura promedio mínima extrema ($T_{mín-e}$) mensuales para el año 2018.

Irradiación solar (I_{rs})

La figura 30 muestra la irradiación solar media mensual para el año 2018 en Imata. Los valores analizados competen a la empresa de servicios de datos solares Solcast, que proporciona datos de energía e irradiancia solar pronosticados y reales, a nivel mundial, utilizando satélites y mediciones de superficie [13], estos datos se utilizaron debida a la carencia de datos *in situ* de este parámetro. Para asegurar el uso de la data del Solcast, esta se comparó con data registrada por la estación Davis que registra irradiancia solar global sobre superficie horizontal, resultando diferencias promedio no mayores de $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, esto permite una buena aproximación y representación de la incidencia solar en el propio lugar, de manera que, esta misma data se utilizó como parte de los parámetros meteorológicos requeridos para generar un archivo de clima EPW de entrada al programa *EnergyPlus*. Tomando estas consideraciones se representó la irradiación solar anual, promedio mensual de Imata, observándose que en noviembre el promedio supera los $7 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, con mínimos de $4,6 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ para el mes de junio.

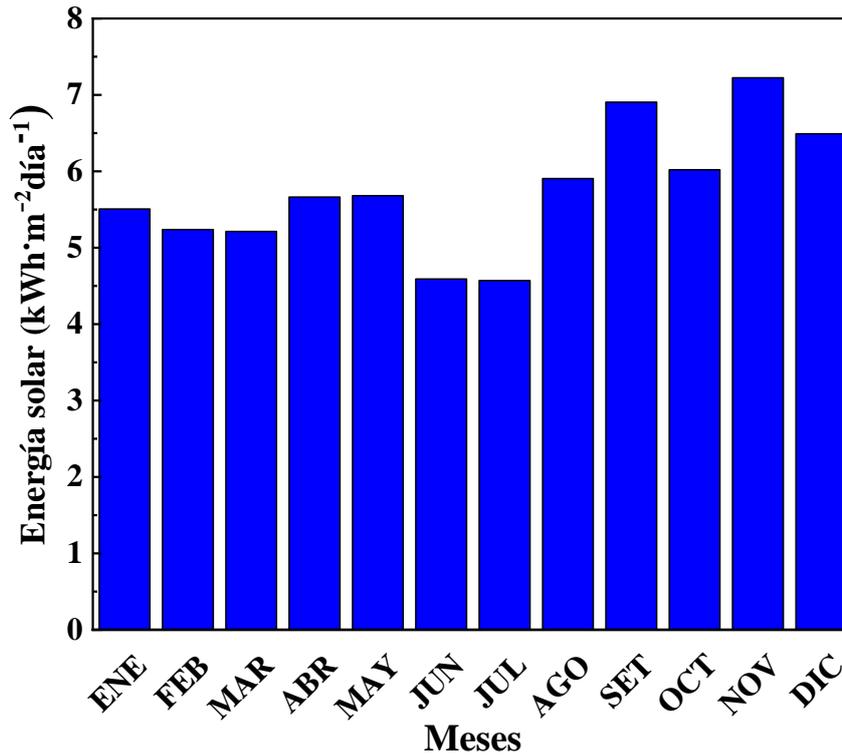


Fig. 30. Irradiación solar media diaria mensual ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$) para Imata, según archivo del programa Solcast [13] para el año 2018.

Humedad relativa

La figura 31 presenta los valores promedios mensuales de la humedad relativa para el año 2018, para el centro poblado de Imata según los datos procesados del SENAMHI, se tiene humedad relativa media diaria mensual (HR_{m-m}), humedad relativa media diaria mensual mínima ($HR_{mín-m}$) y humedad relativa media diaria mensual máxima ($HR_{máx-m}$), donde, la humedad relativa media anual para Imata es de 61,5 %, los valores altos de humedad se presentan durante los meses desde enero hasta abril, valores de bajo porcentaje para los meses desde mayo hasta setiembre. Se observa que la humedad relativa máxima ocurre en el mes de febrero con un valor de 77,4 %, mientras que el valor mínimo fue de 41,9 % para el mes de setiembre. Para mejor visión en el gráfico, se unieron las líneas para que se pueda observar mejor la tendencia de los datos tabulados.

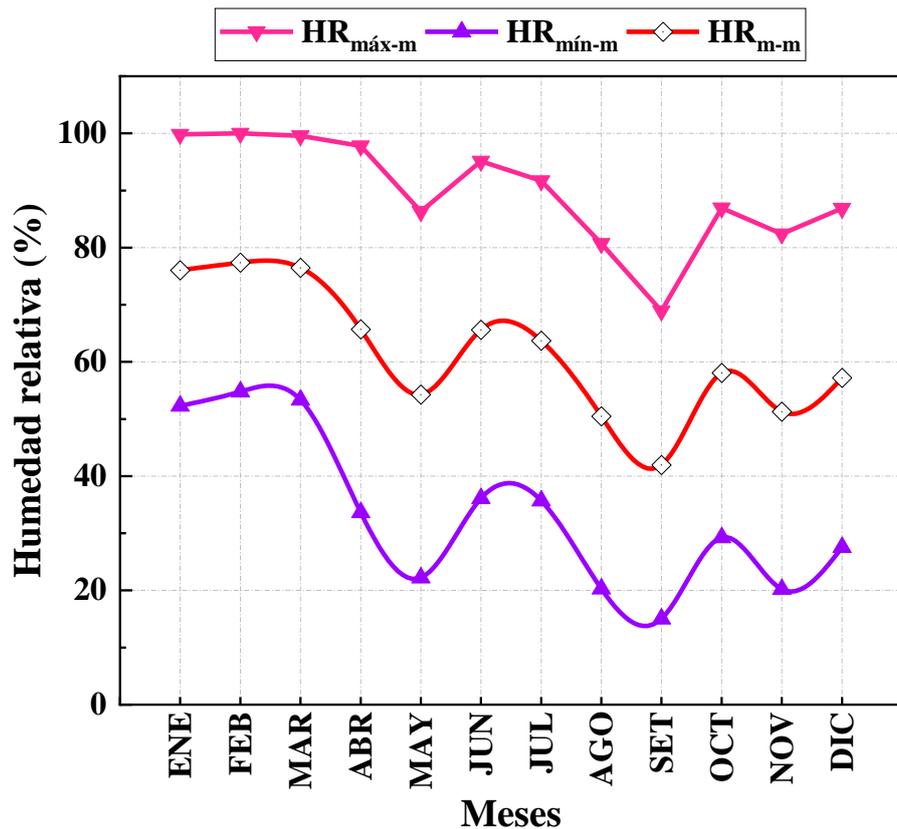


Fig. 31. Humedad relativa promedio diario mensual (HR_{m-m}), humedad relativa promedio diario mensual mínimo ($HR_{mín-m}$) y humedad relativa promedio diario mensual máximo ($HR_{máx-m}$), característicos para el centro poblado de Imata.

Dirección y velocidad del viento (D_{vto} y V_{vto})

En la figura 32 se observa la frecuencia y velocidad de la rosa de vientos para el centro poblado de Imata la dirección predominante de los vientos es proveniente de la dirección Suroeste. Se hace mención que, a partir desde las 14:00 hasta las 17:00 horas los vientos presentan mayor intensidad. La línea de color rosado indica la dirección media del viento. Programa WRPLOT [66].

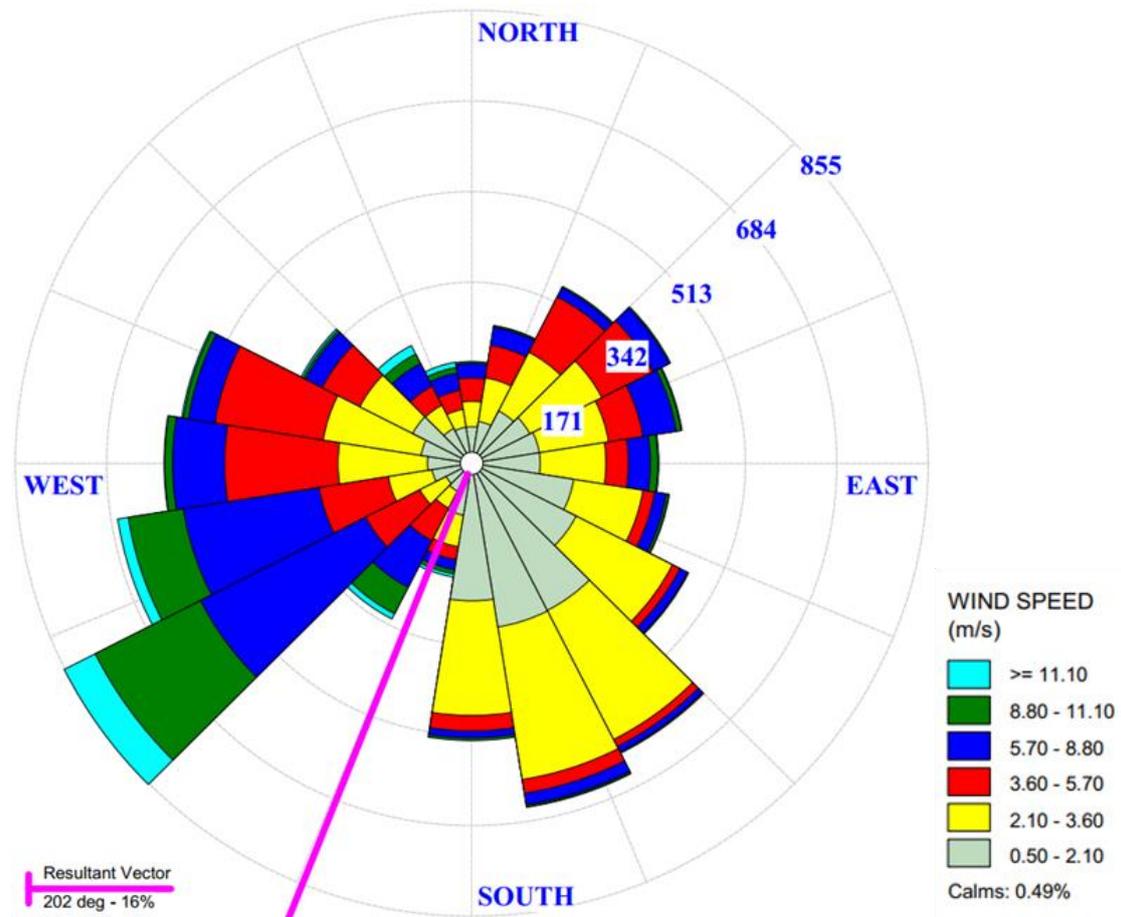


Fig. 32. Frecuencia y velocidad anual del viento para Imata, calculados con el programa del WRPLOT [66].

Ábaco o Carta solar estereográfica

El uso de la carta solar estereográfica permite conocer el recorrido aparente del Sol para un año, para un día y una hora concreta, a condición de que se haya establecido la carta para una determinada latitud, que sería la base referencial de las estrategias pasivas como: la orientación y distribución de los recintos, tamaños y ubicaciones de las ventanas y estrategias de captación directa de energía, indirecta y aislada, etc.

En la figura 33 se muestra la trayectoria que sigue el Sol para el día 21 de marzo antes del mediodía (línea amarilla), así como la trayectoria en todo el año, a modo de representación sobre una pequeña zona del cielo de Imata en una circunferencia de color azul y aplicada sobre una imagen satelital del centro poblado de Imata. Dicha trayectoria está más orientada hacia el norte durante el año.

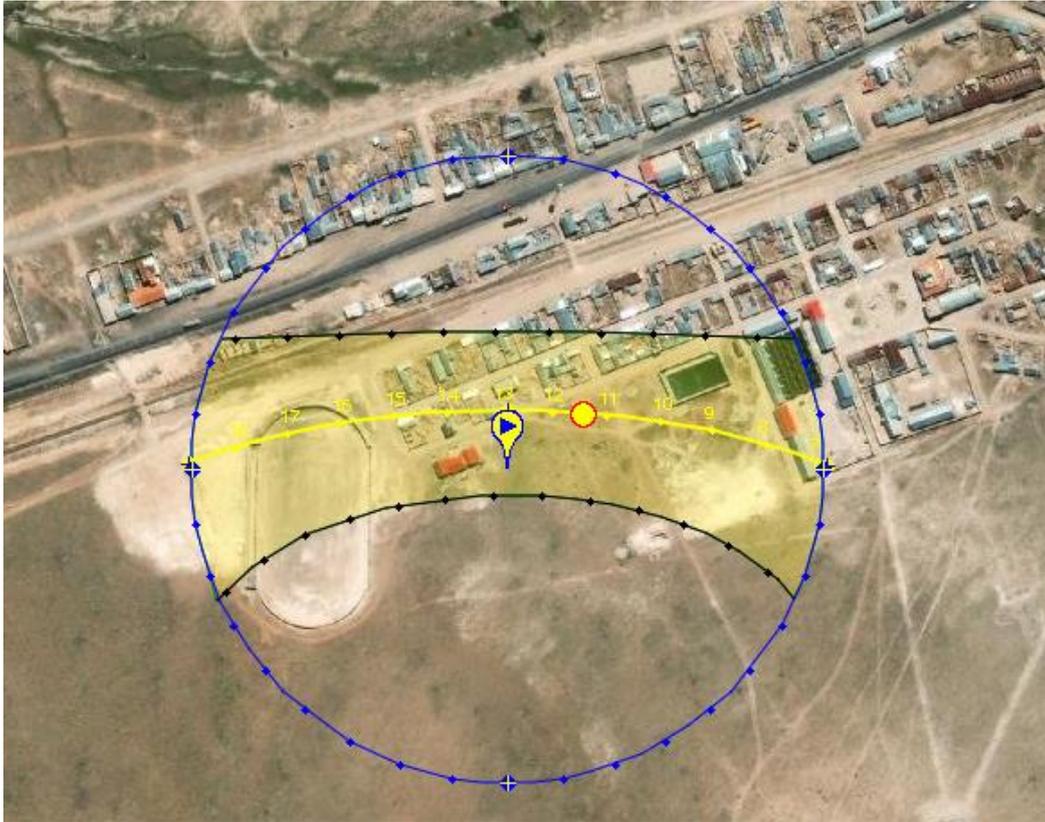


Fig. 33 Trayectoria solar sobre el cielo de Imata proyectados sobre los MEVs [67].

En la figura 34 se observa el recorrido aparente del Sol en la bóveda celeste, durante un año para el centro poblado de Imata, se puede observar que, el Sol se ubica más hacia la dirección del norte que el sur, desde el mes de marzo hasta setiembre el Sol se traslada de este a oeste con un declive hacia el norte, por el contrario, en los meses desde octubre hasta febrero el Sol se inclina hacia el sur, entonces se tiene que el Sol durante el año prevalece con mayor posición hacia el norte con respecto al sur.

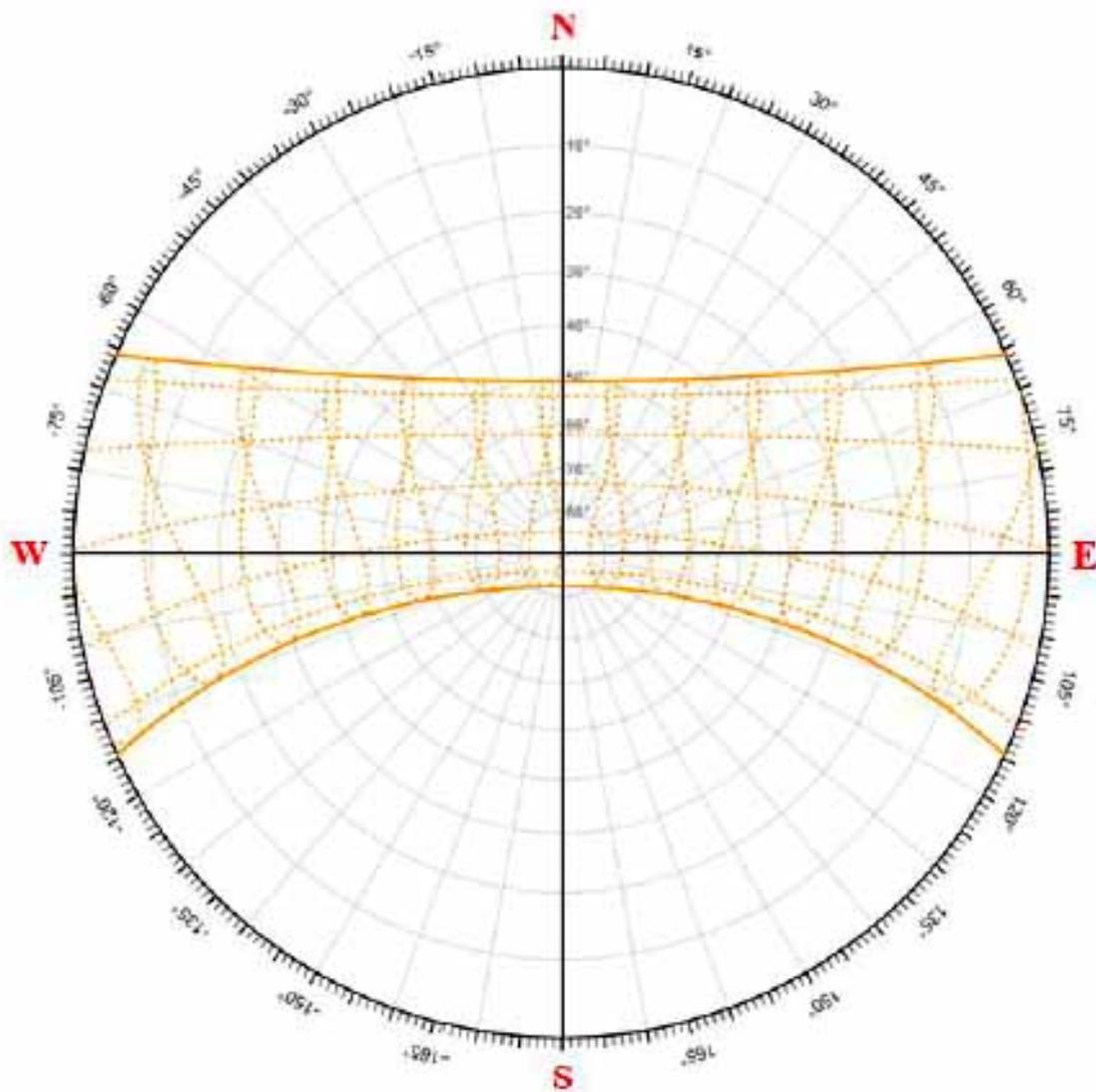


Fig. 34. Carta solar estereográfica para el centro poblado de Imata.

5.2 Parámetros socioeconómicos de la población

En Imata la actividad económica principal es la ganadería, principalmente la crianza de llamas y alpacas, la agricultura es escasa debido al terreno y al clima que no permite el desarrollo del crecimiento de las plantas, además cada dos semanas se desarrolla la feria de ventas de productos típicos del lugar, así como la venta de herramientas, productos básicos de alimentos, preparación de comidas típicas como la trucha frita o el chicharrón de alpaca, y el caldo de chuño y alpaca, al mismo tiempo que se realiza la feria también se realiza la misa en la parroquia a cargo del padre Franz Windischhofer de nacionalidad austriaca, quien también está a cargo del albergue, lugar que gracias al apoyo de un grupo de mujeres lugareñas se brinda almuerzo a los adultos mayores del centro poblado, también cuentan con agua caliente para las duchas y piso radiante, gracias a la tecnología solar, ya que cuentan con 10 colectores solares y un tanque de 1000 litros que permite almacenar el agua caliente para uso interno y a los pobladores que deseen usarlo para aseo personal, se paga un monto mínimo, cuenta con cuartos para alojar a turistas y personas

de tránsito por la zona, así como a los profesores que vienen desde la ciudad de Arequipa a dictar clases en los centros educativos.

Imata cuenta con un aproximado de 900 habitantes según datos del INEI [62], con respecto al estado de nutrición de los niños menores de 5 años se tiene que el 23,5 % hay desnutrición crónica según el indicador talla/edad de un total de 51 niños evaluados, mientras que para la anemia en niños entre 6 a 59 meses, el 63,2 % presenta anemia total, 21,1 % de anemia leve y 36,8 % de anemia moderada, de un total de 19 niños evaluados (Indicadores de niño enero junio 2020), esta situación ha ido decreciendo ya que en el 2016 los indicadores fueron mayores que este año, la desnutrición crónica en niños menores de 5 años, Red Arequipa Caylloma, el 25,9 % presenta este índice, siendo 108 niños los evaluados, para los niños menores de 5 años con anemia, Red Arequipa Caylloma, el 93,5 % de los niños lo presenta, de un total de 31 niños evaluados [68]. Toda la población cuenta con el Documento Nacional de Identidad (DNI), el 51,1 % de la población cuenta con Seguro Integral de Salud, mientras que 13,9 % está afiliadas al ESSALUD y el 32,8 % no están afiliados a ningún tipo de seguro de salud, en lo referente a la educación hay un 12,6 % de la población que no cuenta con algún nivel educativo, y los que estudiaron en la universidad y la concluyeron son el 1,1 %, en tanto los que estudiaron en institutos y la concluyeron son el 2,4 %, hasta el 2018 no se tienen datos censados de estudiantes con maestría ni doctorados [62], cabe mencionar que estos datos son para personas que emigraron del centro poblado y se fueron a estudiar a la ciudad capital Arequipa o también algunos a la ciudad de Puno.

5.3 Tipología de las viviendas

La vivienda provee cobijo y protege a las personas de los severos factores climatológicos que los azotan con su clima extremo. Por tal razón debería ser el componente esencial de tal manera que se pueda aminorar el embate de las bajas temperaturas en la población de las zonas Altoandinas. Hoy en día las viviendas no cumplen lo esperado, puesto que la temperatura registrada dentro de las viviendas es igual, inclusive, menor que la registrada en el exterior. Vale decir, es debido a las imperfecciones constructivas como los agujeros, aberturas en los vanos o malos sellados, resultando como consecuencia que el aire helado ingrese a la vivienda [48].

En Imata, la gran mayoría de las viviendas poseen estas características, las paredes son de adobe, con techo de calamina, las puertas metálicas, las ventanas de vidrio simple con marco metálico generándose los llamados “puentes térmicos”, generando así las infiltraciones de aire. Las puertas de madera ayudan a disminuir las pérdidas de calor en cuanto se refiere a la conducción, pero debido a las filtraciones de aire que se dan por los marcos el efecto es adverso, las ventanas debido a su grosor y área, claramente indica una falta de hermeticidad. La figura 35 muestra un panorama del centro poblado de Imata, donde se puede observar el uso de planchas metálicas de zinc (calamina) como cobertor de techos en la gran mayoría de las viviendas.



Fig. 35. Vista del centro poblado de Imata, imagen tomada desde el mirador.

En el centro poblado se realizó un estudio de la tipología de las viviendas, el cual se muestran los resultados en la tabla 4, donde claramente se puede observar que el 74% de las viviendas están construidas con material de adobe para las paredes, el 22% con paredes de ladrillo, en el caso del techado, el 85% es con calamina y el 15% de concreto, las puertas, el 82% son de metal, el 11% de madera y 7% de calamina, las ventanas son de vidrio con un 98%, y los marcos de las ventanas el 97% son de metal y un 3% de madera.

Tabla 4. Tipología de las viviendas en el centro poblado de Imata [33].

Elemento constructivo	Número de viviendas con:					
	Adobe	Ladrillo	Bloquetas	Piedras	Sillar	Madera
PAREDES	148	43	6	1	1	1
	Calamina			Concreto		
TECHO	170			34		
	Metal		Madera		Calamina	
PUERTA	165		21		14	
	Vidrio		Calamina		Madera	
VENTANA	197		2		1	
	Metal			Madera		
MARCO DE VENTANAS	195			5		

En la figura 36 se puede observar el uso de planchas metálicas de zinc (calamina) como cobertor de techos, con forma a dos aguas. El empleo de materiales metálicos en los marcos, tanto para ventanas como de puertas, que debido a sus propiedades de buenos conductores de calor no genera protección térmica, ya que en el día el ambiente interior estará caliente, pero en las noches será muy fría y, considerando las infiltraciones de aire que se dan por los marcos de las ventanas y puertas en la junta con sus vanos, la temperatura en el interior no estará muy alejada respecto de la temperatura en el exterior [61].



Fig. 36. Viviendas con techos de planchas de calamina, Imata: (a) vivienda con techo de calamina y puerta de metal oxidada con marcos de metal, (b) ventanas de vidrio con marco de metal, puerta de metal, (c) piedras colocadas sobre el techo de calamina metálica de la vivienda, y (d) vivienda con techo de calamina metálica, ventana de vidrio simple.

VI. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONITOREO DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD DE LOS MEVs

En esta sección se presentará el plan secuencial de cambios realizados en las envolventes de los MEVs, el detalle de cada uno de los cambios, la construcción y una planificación de mejoras sucesivas en las envolventes de los MEVs, así como la instrumentación de los MEVs.

6.1 Construcción y plan de mejoras sucesivas de las envolventes de los MEVs

Por cada modificación realizada en la envolvente de los MEV, se registraron las fechas, comprende desde el módulo típico inicial, con techo de calamina metálica, paredes de adobe, puerta de calamina metálica con marco de madera, piso de tierra. Luego se hicieron cambios en el techado, claraboyas en el techo, enlucido en las paredes, separación de cámaras en el ático, incorporación de poliestireno expandido sobre el falso techo, construcción de un invernadero adosado en la pared norte de uno de los módulos, se tuvo diferentes configuraciones con la puerta y ventana en común al invernadero y el módulo para obtener los datos de temperatura y los cambios en el comportamiento térmico debido a las modificaciones realizadas en las envolventes.

En la tabla 5 se muestra las modificaciones y las fechas correspondientes en las cuales se hicieron los cambios en las envolventes de los módulos.

Tabla 5. Cambios sucesivos en las envolventes de los MEV de acuerdo con las fechas indicadas.

Configuraciones de medidas		Fecha
1	MEV1 inicial típico.	26-31 jul.
2	MEV2 típico con cambio en techado.	07-14 ago.
3	MEV1 con cambio en techado y enlucido de yeso en paredes.	23-31 ago.
4	MEV1 con falso techo y se separan las cámaras en el ático. MEV2 enlucido de yeso en paredes.	14-22 set.
5	MEV2 con falso techo y se separan las cámaras.	23-30 set.
6	Se incorpora el poliestireno expandido sobre el falso techo de triplay en el MEV1.	31 oct. – 03 nov.
7	Se incorpora el poliestireno expandido sobre el falso techo de triplay en el MEV2.	03-05 nov.
8	Invernadero adosado al MEV2, configuración de puerta y ventana cerrada del MEV2.	02-04 dic.
9	Configuración de puerta y ventana abiertas de 8:00 a 16:00 horas, comunes al MEV2 e invernadero	05-06 dic.
10	Puerta abierta (de 8:00 a 16:00 horas) y ventana cerrada, comunes al MEV2 e invernadero	07-09 dic.
11	Puerta cerrada y ventana abierta (de 8:00 a 16:00 horas), comunes al MEV2 e invernadero.	10-12 dic.

En la figura 37 se muestra el orden de las modificaciones desarrolladas en la envolvente de ambos módulos, con la diferencia que uno de ellos lleva un invernadero adosado en su pared con dirección hacia el norte.

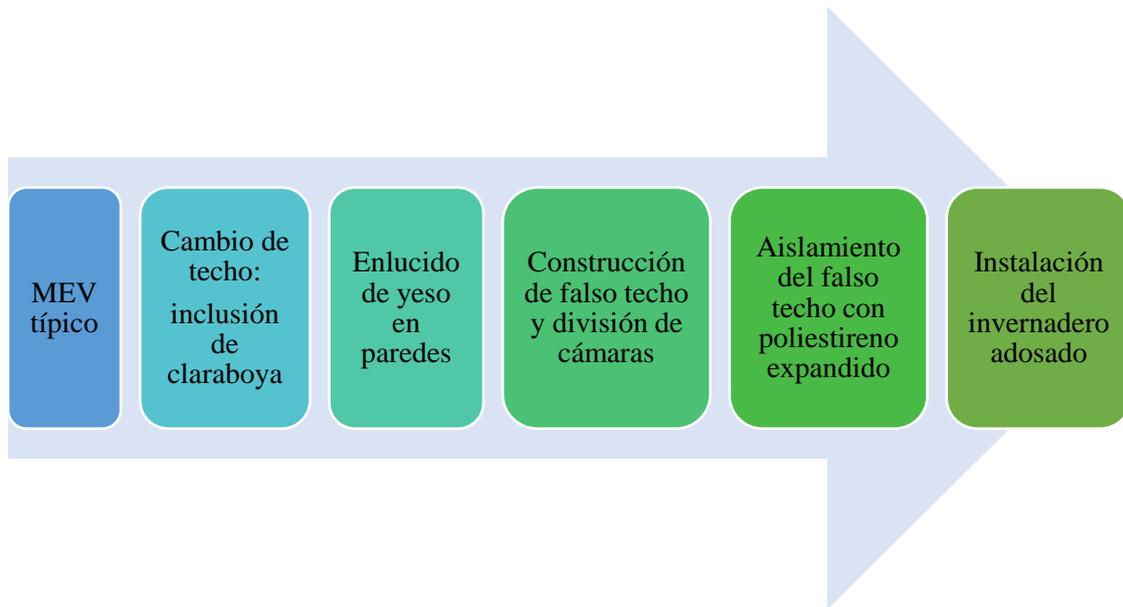


Fig. 37. Diagrama de secuencia de las modificaciones realizadas en la envolvente del MEV.

En la figura 38 se muestran las diferentes configuraciones en las modificaciones de las envolventes de los MEVs realizadas desde un inicio (julio) hasta la construcción del invernadero adosado (noviembre), cambios como el cambio en el techado con fibrocemento (agosto), construcción de claraboyas en el techo (agosto), enlucido de yeso en paredes (agosto), división de cámaras (setiembre), poliestireno expandido sobre la base del falso techo (octubre), construcción de un invernadero adosado (noviembre), durante el año 2018.

En la tabla 6 se presentan a detalle las diferentes modificaciones sucesivas realizadas en las envolventes de los MEV de acuerdo con las diferentes fechas, el cual se tiene desde el 26 de julio hasta el 12 de diciembre del 2018, se aprecian las distintas técnicas aplicadas en los MEV, para su aislamiento térmico y la captación solar de energía proveniente del sol, así como las configuraciones de puerta y ventana entre el MEV y el invernadero.



Fig. 38. Modificaciones de las envolventes de los MEVs.

Tabla 6. Detalle de las modificaciones secuenciales de las envolventes de los MEVs.

Simulación n (N°)	Módulos		Fechas 2018		Puerta		Ventana		Piso		Techo		Falso techo		Muros		Invernadero	
	M1	M2	Inicio	Fin	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
1	Módulo típico	En construcción	26-Jul	1-Ago	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Calamina metálica con listones de madera	X	X	X	Adobe (0.4mx0.4mx0.2m) (e=0.4m)	X	X	X
2	Módulo típico	Módulo típico con cambio en techado	7-Ago	15-Ago	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Calamina metálica con listones de madera (sin sellar infiltraciones)	X	X	X	Adobe (0.4mx0.4mx0.2m) (e=0.4m)	X	X	X
3	Módulo típico con cambio en techado	Módulo típico se mantiene con el techado	23-Ago	31-Ago	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Fibrocemento y claraboya (sellado con barro, muro y techo)	X	X	X	Adobe (0.4mx0.4mx0.2m) (e=0.4m)	X	X	X
4	Módulo con falso techo	Módulo sin falso techo	M1 = M2		Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Fibrocemento y claraboya	X	X	X	Adobe (0.4mx0.4mx0.2m) (e=0.4m)	X	X	X
5	Módulo con falso techo	Módulo con falso techo	M1 = M2	30-Set	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Fibrocemento y claraboya	X	X	X	Adobe (0.4mx0.4mx0.2m) (e=0.4m)	X	X	X
6	Incorporación del tecnopor sobre el falso techo	Módulo con falso techo sin tecnopor	M1 = M2	31-Oct	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Fibrocemento y claraboya (en las cámaras de triplay)	X	X	X	Adobe con capa de yeso	X	X	X
7	Incorporación del tecnopor sobre el falso techo	Incorporación del tecnopor sobre el falso techo	M1 = M2	5-Nov	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Fibrocemento y claraboya	X	X	X	Adobe con capa de yeso	X	X	X
8*	Puerta y ventana cerradas	Piso de concreto en el invernadero. Puerta y ventana cerradas	2-Dic	4-Dic	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Marco metálico con vidrio simple	X	X	X	Adobe con capa de yeso	X	X	X
9*	Puerta y ventana cerradas	Puerta y ventana abiertas	5-Dic	6-Dic	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Marco metálico con vidrio simple	X	X	X	Adobe con capa de yeso	X	X	X
10*	Puerta y ventana cerradas	Puerta abierta y ventana cerradas	7-Dic	9-Dic	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Marco metálico con vidrio simple	X	X	X	Adobe con capa de yeso	X	X	X
11*	Puerta y ventana cerradas	Puerta cerrada y ventana abierta	10-Dic	12-Dic	Calamina metálica con marco de madera, con infiltraciones	X	Marco metálico con vidrio simple	X	Piso de tierra	X	Marco metálico con vidrio simple	X	X	X	Adobe con capa de yeso	X	X	X

6.2 Diseño de los MEVs

El diseño realizado se hizo en base al resultado del estudio de la tipología mostrada en la tabla 4.

Se muestra el diseño de los MEVs

El diseño se generó en el programa *SketchUp*, se hizo primero el dibujo geométrico del módulo antes de su construcción y sus respectivas medidas.

Paredes

En la figura 39 se observa las medidas del MEV, las paredes son de adobe de 0,4 m x 0,4 m x 0,12 m, el ancho y largo (3,8 m x 4,8 m) tanto del exterior, así como en el interior (3 m x 4 m) y su altura (2,2 m), ancho y altura de la puerta (0,9 m x 2,12 m) y ventana (0,7 m x 0,9 m), altura debajo del techo a dos aguas (0,8 m), grosor de las paredes (0,4 m), el ángulo de depresión del tímpano (22,8 °C), el ángulo de rotación respecto del norte (21,6 °). A partir de la tercera modificación en las envolventes (tabla de cambios), las paredes de adobe llevan un recubrimiento de yeso de 0,02 m (figura 10, derecha) tanto en el interior como en el exterior.

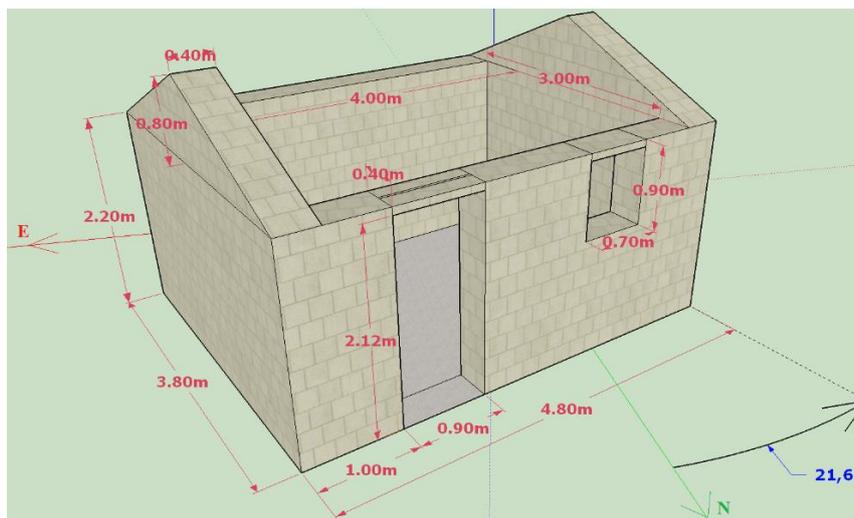


Fig. 39. Vista de las medidas del MEV, diseñados en *SketchUp*.

Estructura de madera para la cubierta del techo

En la figura 40 se muestra las maderas las cuales se utilizaron para armar el techo, las maderas de color marrón oscuro son las viguetas de 2" x 3" x 2,45 m, se usaron 5 en cada lado de las caídas a dos aguas, con una separación de 1m prácticamente, las correas colocadas transversalmente a las viguetas tienen dimensión de 2" x 2" x 5,6 m, separadas 0,7 a 0,75 cm, se usaron 4 en cada caída, en la parte más alta del módulo donde se unen las viguetas se utilizó viga de 3" x 3" x 5 m de extremo a extremo.

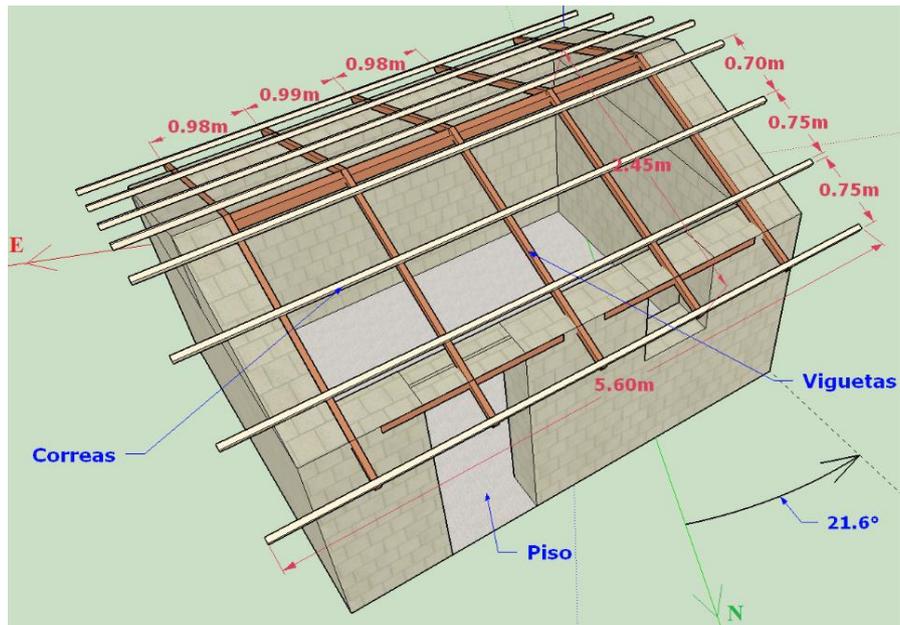


Fig. 40. Cobertura del techo, viguetas y correas armadas en el MEV.

Techado y falso techo

En la figura 41 se muestra los diferentes materiales usados para el techado, la calamina metálica de 0,0005 m de espesor se usó para el módulo típico inicial ,figura 41 (izquierda), el módulo típico aún no cuenta con falso techo, para el techo del módulo mejorado se utilizó planchas de fibrocemento de 0,004 m de espesor, en cada lado también se usó policarbonato traslúcido de 0,005 m de espesor para las claraboyas en cada caída del techo como se observa en la figura 41 (derecha), tienen medidas de 0,72 m x 2,45 m, para el falso techo se usó planchas de triplay de 0,0004 m de espesor, sobre esta base de triplay también se incorporó el poliestireno expandido de 0,005 m de espesor,

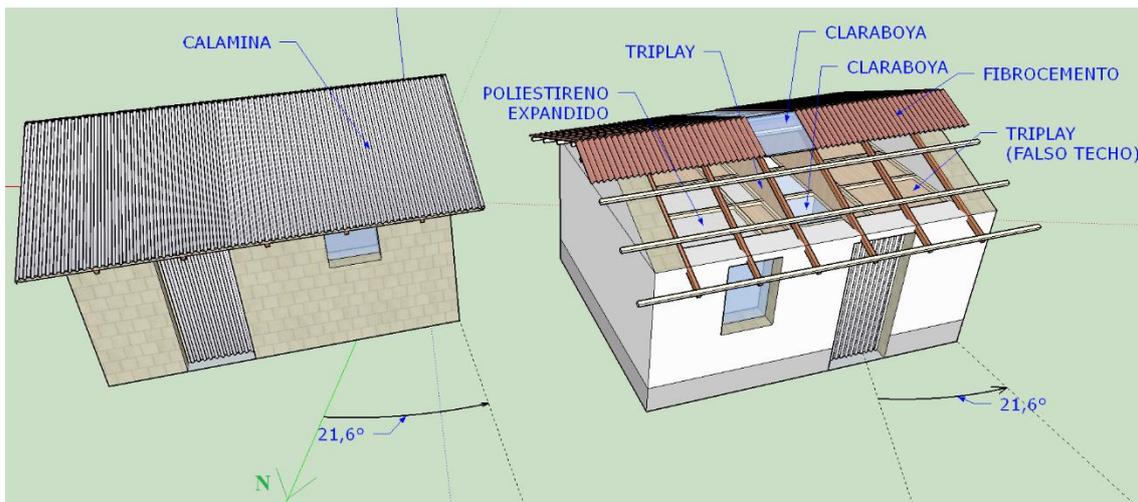


Fig. 41. Diferentes techados de los módulos: (izquierda) módulo típico, (derecha) módulo mejorado con falso techo.

Puerta

La puerta está conformada por una calamina metálica de 0,0005 m de espesor con marcos de madera, de dimensiones de 0,9 m x 2,12 m, este modelo lo presentan ambos módulos y están situados en su pared con dirección al norte en ambos módulos.

Piso

El piso es de tierra apisonada de 10 cm de espesor, para ambos módulos se trabajó con la misma tierra.

Ventana

Ambos módulos llevan una sola ventana en su pared con dirección al norte, cuya dimensión es de 0,7 m x 1 m, y estas llevan vidrio de 3 mm de espesor con marco metálico.

Invernadero adosado

El MEV2 lleva el invernadero adosado en su pared con dirección al norte, cuyas dimensiones son de 2 m x 4,8 m en la parte exterior y altitudes de 2,3 m y 1,6 m, con el techo inclinado, lleva un muro de adobe con enlucido de yeso, el cual tiene la forma de un corral como se muestra en la figura 42, la altura del muro es de 0,85 m y sobre este se tiene la estructura de madera sobre el cual se ha colocado el policarbonato alveolar de 0,005 m de espesor, tanto en las paredes como el techo como lo muestra la figura 42b. El invernadero lleva una puerta de material policarbonato con marcos de madera, de dimensiones 0,8 m x 1,82 m ubicada con dirección oeste, el cual es la puerta principal hacia el cuarto del módulo.

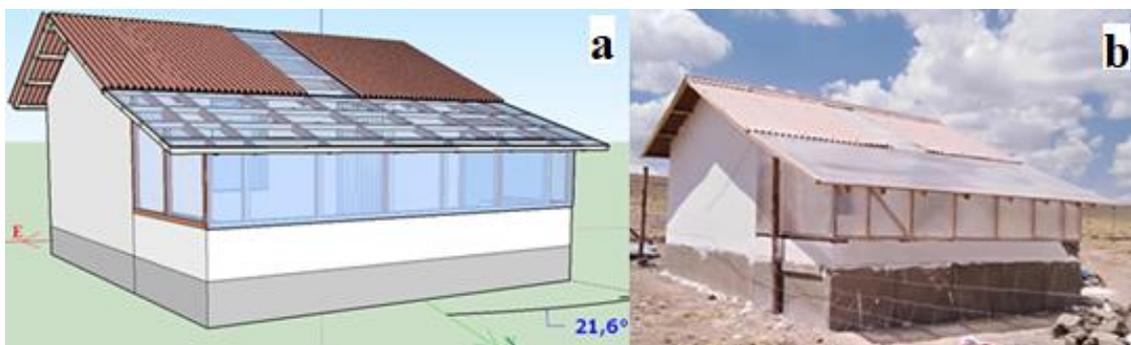


Fig. 42. Invernadero adosado al MEV2: (a) invernadero diseñado en *SketchUp* e (b) invernadero en construcción.

6.3 Instrumentación de los MEVs

Los instrumentos de medida utilizados en la toma de datos en el interior del MEV fueron los sensores de temperatura Pt100, registradores de datos de dos tipos: micro estación (ME) Onset HOBO y *data logger* Onset HOBO (de 4 canales).

El inicio de las medidas de los datos fue registrado a partir del 26 de julio hasta el 12 de diciembre, los intervalos de las mediciones fueron tomados por cada hora, durante las 24 horas del día.

6.3.1 Equipos utilizados

Los instrumentos que se utilizaron en los registros de los datos de temperatura tanto en la superficie interior como exterior de las paredes fueron los sensores de temperatura Pt100, para el almacenamiento de estos datos, se usaron los registradores de datos o *data logger*, en los que, para cada uno de los canales de salida de los *data logger* se usaron los sensores de temperatura Pt100. Para registrar la temperatura y humedad del aire en el ambiente interior del MEV se usaron micro estaciones, todos estos equipos son de la marca Hobo.



Fig. 43. Estación Davis instalada en la azotea de la municipalidad de Imata.

También se utilizó una estación meteorológica de modelo Vantage Pro 2 Plus de la marca Davis para obtener los datos del clima de Imata (figura 44), datos como temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, irradiancia solar. La estación se programó empleando el software *WeatherLink* para registrar los datos cada 10 minutos a través de la consola o receptor del equipo.



Fig. 44. Partes de la estación Vantage Pro 2 Plus [69].

6.3.2 Ubicación de los sensores

Para monitorear el comportamiento térmico de los MEV se ubicó de manera estratégica los sensores de temperatura Pt100, para medir la temperatura superficial de las paredes

se colocaron los sensores en el centro del área de cada pared entre 3 a 3,5 cm de profundidad tanto en la cara interior como la exterior, para medir la temperatura en el subsuelo se cavó un hueco a una profundidad de 60 cm y se colocó el sensor, también en el centro del piso de tierra, para los datos de temperatura en el ambiente interior de las cámaras en el ático se colocó un sensor de temperatura Pt100 aproximadamente en el centro geométrico del ambiente, para medir la temperatura y humedad al interior de los módulos y el invernadero se registraron mediante una micro estación colocada aproximadamente en el centro geométrico del ambiente.

En la figura 45a se aprecia la ubicación de los ST. (sensores de temperatura en adelante) colocados en las paredes de adobe del módulo típico para su registro de la temperatura en la superficie de dicha pared, el ST.9 está colocado sobre la pared con dirección al este y el ST.11 sobre la pared orientada al norte, en la figura 45b se observa la forma en que está ubicado el sensor en la pared de adobe, en la figura 45c se observa el sensor cubierto con barro y empotrado en la pared de adobe, estos sensores están conectados a un registrador de datos o *data logger* que se encuentra en el interior del módulo típico, también se muestra el ángulo de rotación del MEV de $21,6^\circ$ con respecto al eje norte en dirección oeste.



Fig. 45. Ubicación de sensores en el MEV: (a) vista exterior de sensores de temperatura empotrados en las paredes, (b) sensor ubicado en la pared de adobe, y (c) sensor empotrado en la pared de adobe.

La figura 46 muestra los ST. instalados en las superficies interiores de las paredes, el ST. 13 está ubicado en la pared con dirección sur, el ST. 7 ubicado en la pared con dirección oeste, también se muestra la ME. (micro estación en adelante) ubicado en el centro del ambiente del MEV1, en este caso con la denominación de la letra H, con fines de llevar un orden de las micro estaciones y ubicarlos de manera rápida.

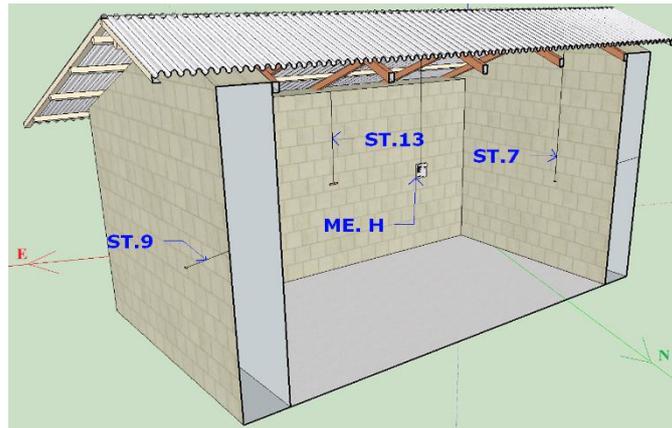


Fig. 46. Vista interior de la ubicación de los ST. y micro estación ubicados en el interior del módulo típico.

En la figura 47 se muestra la colocación de los ST. en las superficies de las paredes de adobe en el interior del módulo mejorado (cambio en el techado e inclusión de claraboyas), el ST. 2 está ubicado en la pared con dirección al este, el ST. 4 ubicado en la pared con dirección al sur y el ST. 6 ubicado en la pared con dirección oeste, la ME con denominación G ubicada en el centro del ambiente.



Fig. 47. Vista interior de la ubicación de los ST. y micro estación ubicados en el interior del módulo mejorado.

La figura 48 muestra las etapas realizadas en la instalación del ST. sobre la superficie de la pared enlucida con yeso, en la figura 48a se observa una regla introducida en el hueco hecho en la pared donde se muestra la medida de la profundidad (3 cm), la figura 48b muestra el sensor ubicado dentro del orificio hecho en la pared, en la figura 48c se observa el sensor completamente tapado con barro, la figura 48d muestra el sensor ya instalado y direccionado hacia el interior del módulo para que se conecte al registrados de datos y en la figura 48e se tiene una vista de los ST. ubicados en el exterior de las superficies de las paredes exteriores del módulo realizado en *SketchUp*, el ST. 11 está ubicado en la pared con dirección al norte, el ST. 19 está ubicado en la pared con dirección al oeste, para este caso las paredes está enlucidas con yeso.

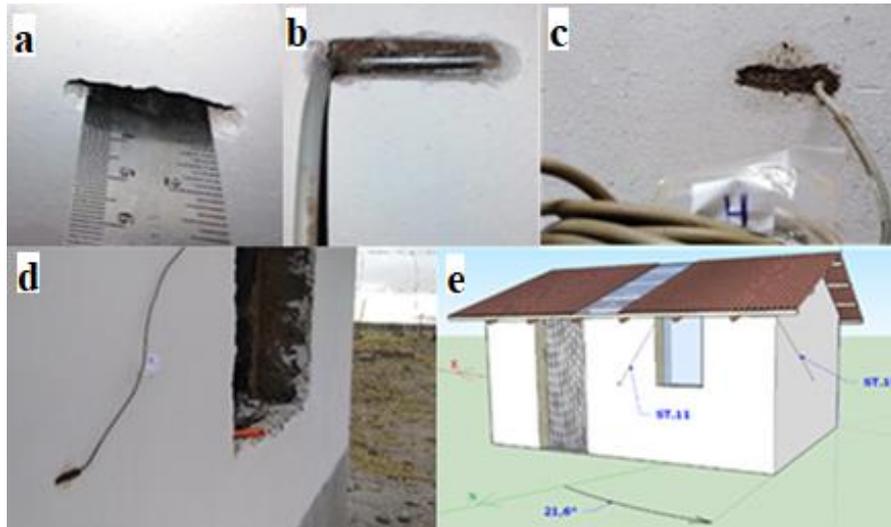


Fig. 48. Secuencia de la forma en que los ST. fueron ubicados en la superficie de la pared

En la figura 49 se observa la ubicación de los ST. en la superficie de las paredes exteriores tanto del MEV1 y el MEV2 (figura 49c), el ST. 9 y 11 están ubicados en la superficie de la pared exterior con dirección al este y norte respectivamente, y el ST. 12 está ubicado a una profundidad del suelo de 65 cm, estos sensores están instalados en el MEV1, el ST. 10 ubicado en la superficie de la pared exterior con dirección al norte y el ST. 14 ubicado en el subsuelo a una profundidad de 65 cm (figura 49a), ambos sensores están ubicados en el MEV2, la figura a muestra el hoyo cavado en el piso y el uso del metro para medir su profundidad, en la figura 49b se tiene el ST. colocado dentro el hoyo listo para tatar.

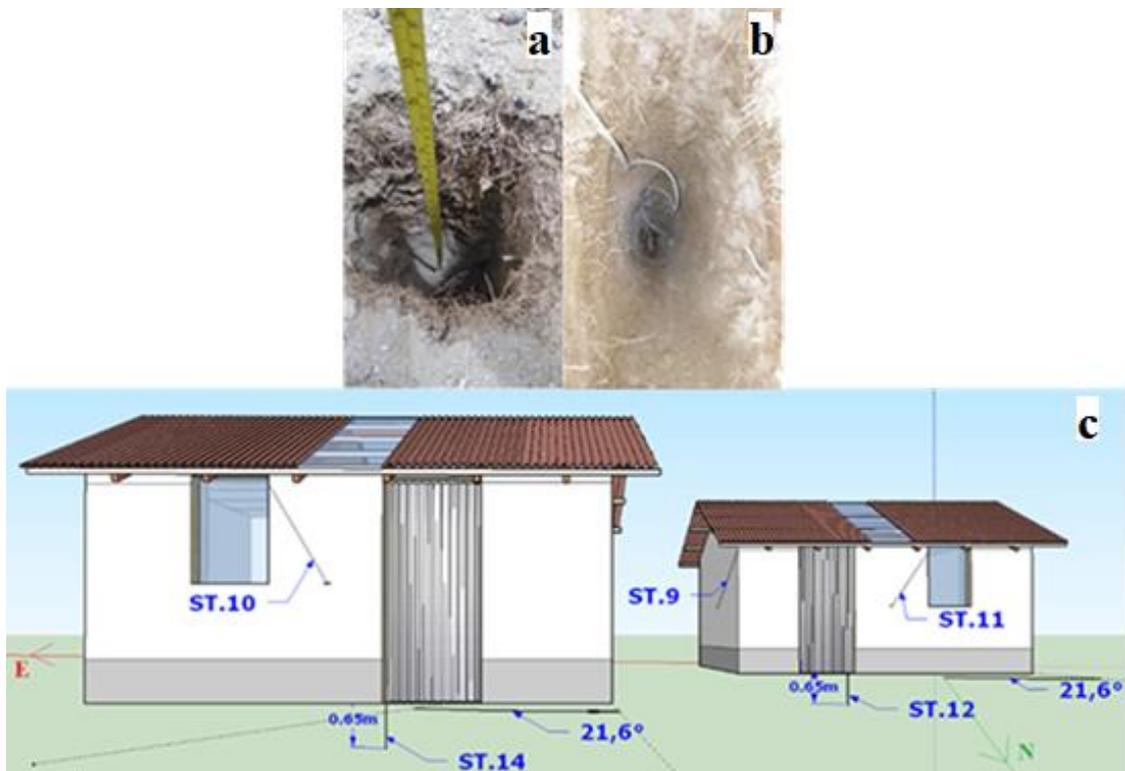


Fig. 49. Sensores ubicados en las paredes y en el subsuelo de ambos módulos: (a) medida de la profundidad del hoyo en el subsuelo, (b) sensor dentro del hoyo, y (c) vista de los ST. ubicados en las paredes exteriores y en el subsuelo de ambos módulos.

Se observa en la figura 50 el MEV1 y el invernadero adosado al MEV2, el ST. 9 está ubicado en la superficie de la pared exterior con dirección al este del MEV1, el ST. 4 y 6 están ubicados en la superficie de las paredes interiores con dirección al sur y oeste respectivamente, así como, la ubicación de las micro estaciones instaladas en el centro del ambiente tanto del módulo y el invernadero, cuyas denominaciones son la letra G y D respectivamente.

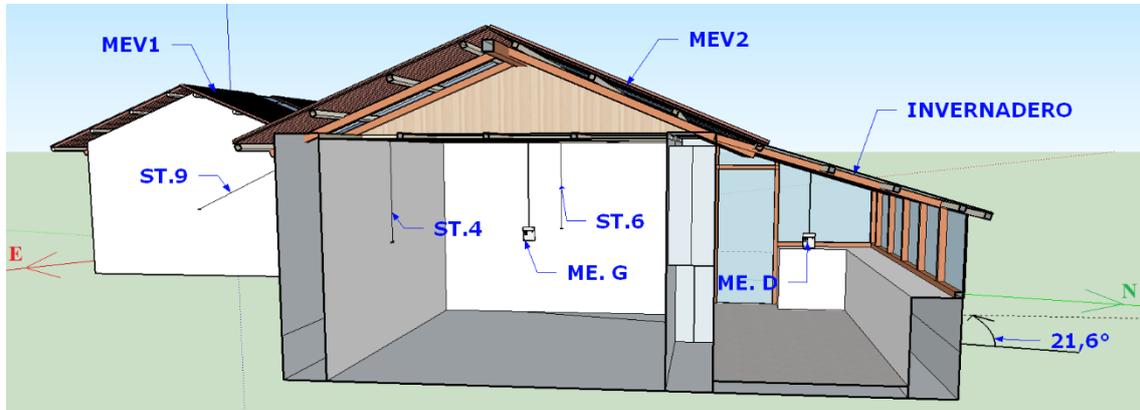


Fig. 50. Vista de los sensores y micro estaciones ubicados en el interior del módulo e invernadero.

VII. RESULTADOS DE LA MODIFICACIÓN Y SIMULACIÓN SECUENCIAL DE LOS CAMBIOS EN LAS ENVOLVENTES DE LOS MEVs.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos debido a las modificaciones realizadas en las envolventes de los MEVs, comparaciones en el incremento térmico y las simulaciones realizadas por cada cambio.

7.1 Comportamiento térmico experimental y simulado para las envolventes

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos de los datos registrados de temperatura en el interior del MEV, de acuerdo a los cambios sucesivos realizados durante diferentes fechas de medidas comprendidas entre los meses de julio y diciembre. Por cada cambio realizado en la envolvente de uno de los módulos se registraba el incremento de temperatura, manteniendo el otro módulo sin cambios, luego se comparó las diferencias y se obtuvo el efecto causado por dicha modificación o técnica realizada en la envolvente del MEV. También se simuló con el programa *EnergyPlus* y los valores obtenidos se compararon con los resultados experimentales.

Comparaciones térmicas

En la figura 51 se presenta el comportamiento de la temperatura del aire interior ($T_{int M1}$) de MEV1 (en todas las figuras, línea sólida azul), y la temperatura exterior (T_{ext} , a partir de ahora línea verde sólida), en su diseño inicial, denominado módulo típico, figura 51 (derecha). Se muestra en la figura 51 (derecha), la forma y disposición de los materiales que se emplearon como, paredes de adobe, techo de calamina, puerta con marco de madera y hoja de calamina metálica, y ventana de vidrio simple con marco metálico. La figura 51 (izquierda) corresponde a la etapa de medida del 26 al 31 de julio, donde, en promedio diario horario la temperatura del aire interior fue de 3,3 °C, con una temperatura promedio horario del aire exterior de 1,9 °C; la temperatura promedio diario horario entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV1 fue de 6,2 °C, y en el exterior fue de 8,1 °C, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 1,9 °C con respecto al exterior, es decir, una temperatura del aire interior inferior al exterior. La diferencia más relevante se da durante las 24:00 y 8:00 horas con una diferencia promedio diario horario de temperatura que amortigua en 5,6 °C con respecto de la temperatura en el exterior, de ocurrencia alrededor de las 6:00 horas.

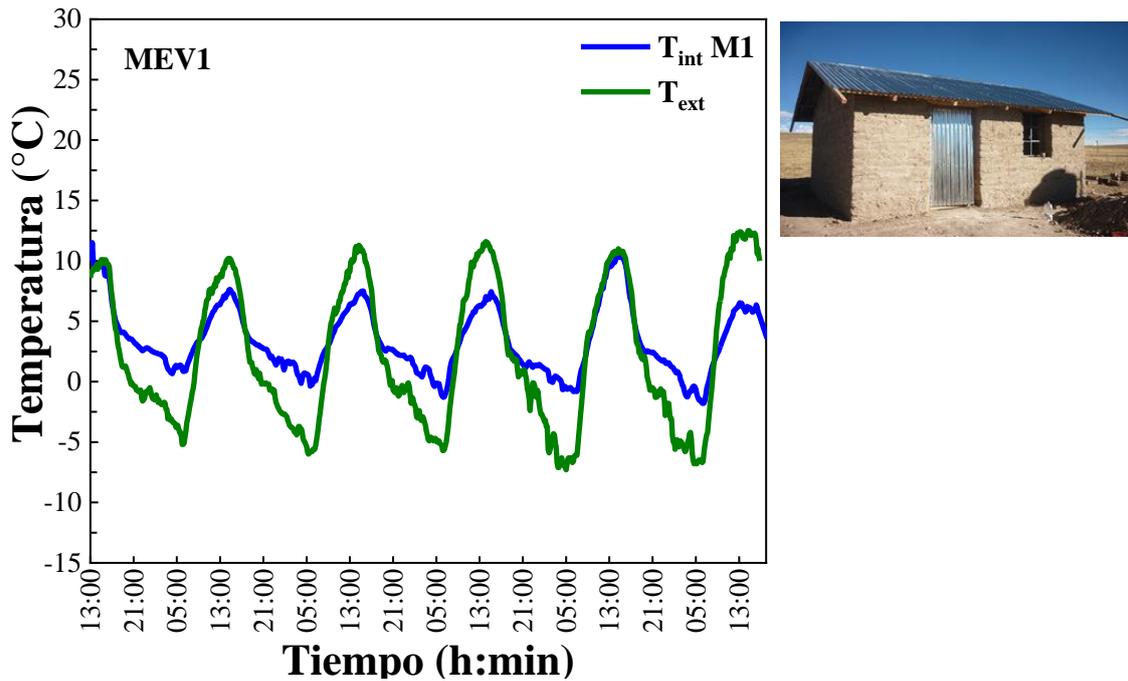


Fig. 51. Imagen del MEV1 típico y su comportamiento térmico: (izquierda) temperatura horaria en el interior del MEV1, T_{int} M1 (línea sólida azul), temperatura del aire exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 26 al 31 de julio, (derecha) MEV1 típico en su estado inicial.

La figura 52 (izquierda) muestra el comportamiento de la temperatura del aire interior de MEV1 (T_{int} M1) y MEV2 (T_{int} M2, desde ahora línea sólida anaranjada), y la temperatura exterior (T_{ext}). La figura 52 (derecha) muestra el MEV1 con techo de calamina (al fondo) y el MEV2 con cambio en el techado con material de fibrocemento y la inclusión de la claraboya (adelante). En este caso el registro de mediciones fue del 7 al 14 de agosto (figura 52b), en promedio diario horario la temperatura del aire interior para el MEV1 fue de 2,3 °C, y para MEV2 fue 3 °C, siendo mayor la temperatura del MEV2 en 0,7 °C con respecto a MEV1, esta diferencia es debida al cambio en el techado y la inclusión de la claraboya para la captación del Sol de forma directa, con una temperatura promedio horario del aire exterior de 1,5 °C; presentándose en promedio entre las 9:00 y 18:00 horas una temperatura en el aire interior de los módulos, de 5,3 °C para MEV1 y 9,1 °C para MEV2, con una temperatura promedio exterior de 8,7 °C, inferior a la exterior en 3,4 °C para MEV1 y superior a la exterior en 0,4 °C para el MEV2, la diferencia más notoria se dio entre las 24:00 y 8:00 horas, con una diferencia promedio de temperatura entre el aire interior del módulo y el exterior, de 4,5 °C para MEV1 y 3 °C para MEV2, de ocurrencia entre las 5:00 y 6:00 horas.

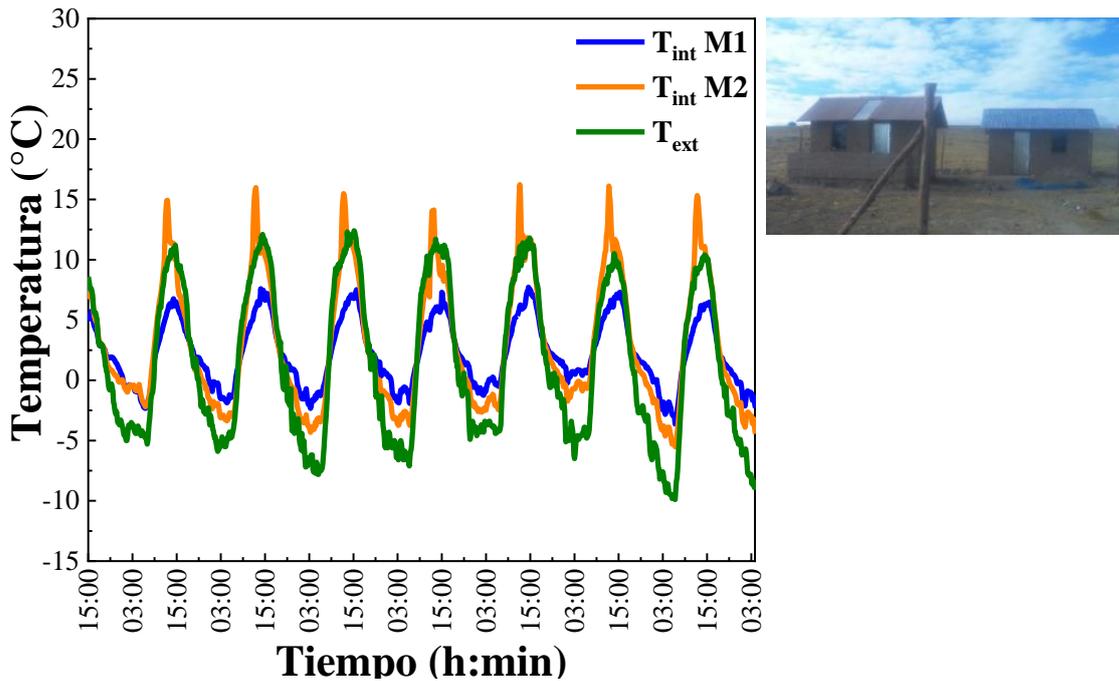


Fig. 52. Imagen de los MEVs y su comportamiento térmico: (Izquierda) Temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 7 al 14 de agosto, y (derecha) cambio en el techado del MEV2 y su comportamiento térmico comparado con el MEV1.

La figura 53 (izquierda) muestra el comportamiento de la temperatura del aire interior de MEV1 (T_{int} M1) y MEV2 (T_{int} M2), y la temperatura exterior (T_{ext}). La figura 53 (derecha y abajo) muestra el MEV1 con techo de fibrocemento y la inclusión de claraboya en el techo, además del enlucido de yeso en las paredes de adobe tanto en el interior como en el exterior del módulo, el MEV2 se mantiene con el techado de fibrocemento y claraboya así lo muestra la figura 53 (derecha y arriba). En este caso el registro de mediciones fue del 23 al 31 de agosto, en promedio diario horario la temperatura del aire interior para el MEV1 fue de 4 °C, y para MEV2 fue 4,8 °C, siendo mayor la temperatura del MEV2 en 0,8°C con respecto a MEV1, esta diferencia es debida al cambio en el techado, la inclusión de la claraboya y el enlucido de yeso en las paredes del módulo, con una temperatura promedio del aire exterior de 1,5 °C; teniéndose en promedio entre las 9:00 y 18:00 horas una temperatura en el aire interior de los módulos, de 9,9 °C para el MEV1 y 10 °C para MEV2, con una temperatura promedio exterior de 8,8 °C, superior al exterior en 1,1°C para el MEV1 y 1,3 °C para MEV2, la diferencia más notoria se da entre las 24:00 y 8:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 4,6 °C para el MEV1 y 6,6 °C para MEV2, de ocurrencia entre las 5:00 y 7:00 horas.

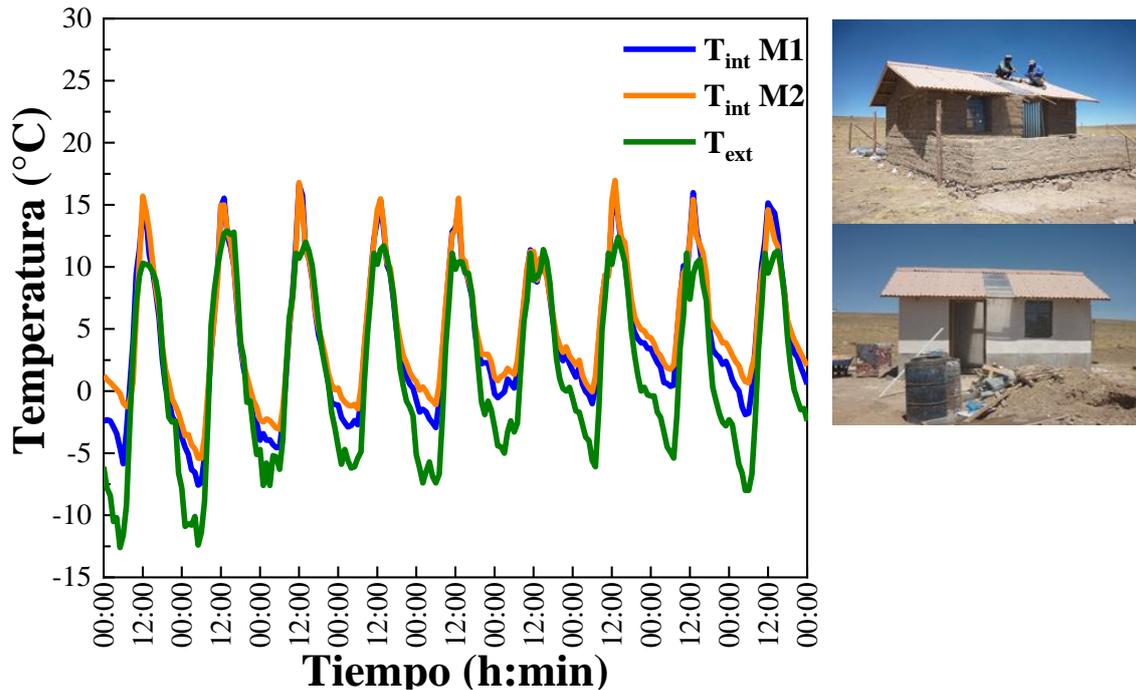


Fig. 53. Cambio en el techado del MEV1, enlucido de yeso y su comportamiento térmico comparado con el MEV2: (izquierda) temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 23 al 31 de agosto, (derecha y abajo) MEV1 con techo de fibrocemento y claraboya, y (derecha y arriba) MEV2 sin enlucido de yeso.

La figura 54 (izquierda) presenta el comportamiento de la temperatura del aire interior de MEV1 (T_{int} M1) y MEV2 (T_{int} M2), y la temperatura exterior (T_{ext}). La figura 54 (derecha y arriba) muestra el interior del MEV1 con el falso techo o cielo raso construido con material de triplay, con la separación del ático en 3 cámaras, dos de ellas de triplay y la del medio está comprendida tanto en el techo de material policarbonato alveolar, así como en la base del falso techo, además del enlucido de yeso en las paredes de adobe tanto en el interior como en el exterior del módulo, el MEV2 se mantiene con el techado de fibrocemento, claraboya y enlucido de yeso en las paredes sin falso techo. En este caso el registro de mediciones fue del 14 al 22 de setiembre, en promedio diario la temperatura del aire interior para el MEV1 fue de 2,9 °C, y para MEV2 fue 3,2 °C, siendo mayor la temperatura del MEV2 en 0,3 °C con respecto a MEV1, con una temperatura promedio del aire exterior de 0,9 °C; teniéndose en promedio entre las 9:00 y 18:00 horas una temperatura en el aire interior de los módulos, de 9 °C para el MEV1 y 8,8 °C para MEV2, con una temperatura promedio exterior de 9,9 °C, inferior al exterior en 0,9 °C para el MEV1 y 1,1 °C para MEV2, la diferencia más notoria se da entre las 24:00 y 8:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 7,3 °C para el MEV1 y 8 °C para MEV2, de ocurrencia a las 5:00 horas.

La figura 54 (derecha y abajo) muestra el interior del MEV2 con el falso techo o cielo raso de material triplay, con la separación del ático en 3 cámaras, con la misma configuración del MEV1, además del enlucido de yeso en las paredes de adobe tanto en el interior como en el exterior del módulo. En este caso el registro de mediciones fue del 23 al 30 de setiembre figura 54 (izquierda), en promedio diario la temperatura del aire

interior para el MEV1 fue de 4,7 °C, y para MEV2 fue 4,5 °C, siendo mayor la temperatura del MEV1 en 0,2 °C con respecto a MEV2, con una temperatura promedio horario del aire exterior de 2 °C; presentándose en promedio entre las 9:00 y 18:00 horas una temperatura en el aire interior de los módulos, de 10,4 °C para MEV1 y 9,6 °C para MEV2, con una temperatura promedio exterior de 9,3°C, superior al exterior en 1,1°C para el MEV1 y 0,3 °C para MEV2, la diferencia más notoria se da entre las 24:00 y 8:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 5,9 °C para MEV1 y 6,3 °C para MEV2, de ocurrencia entre las 5:00 y 6:00 horas.

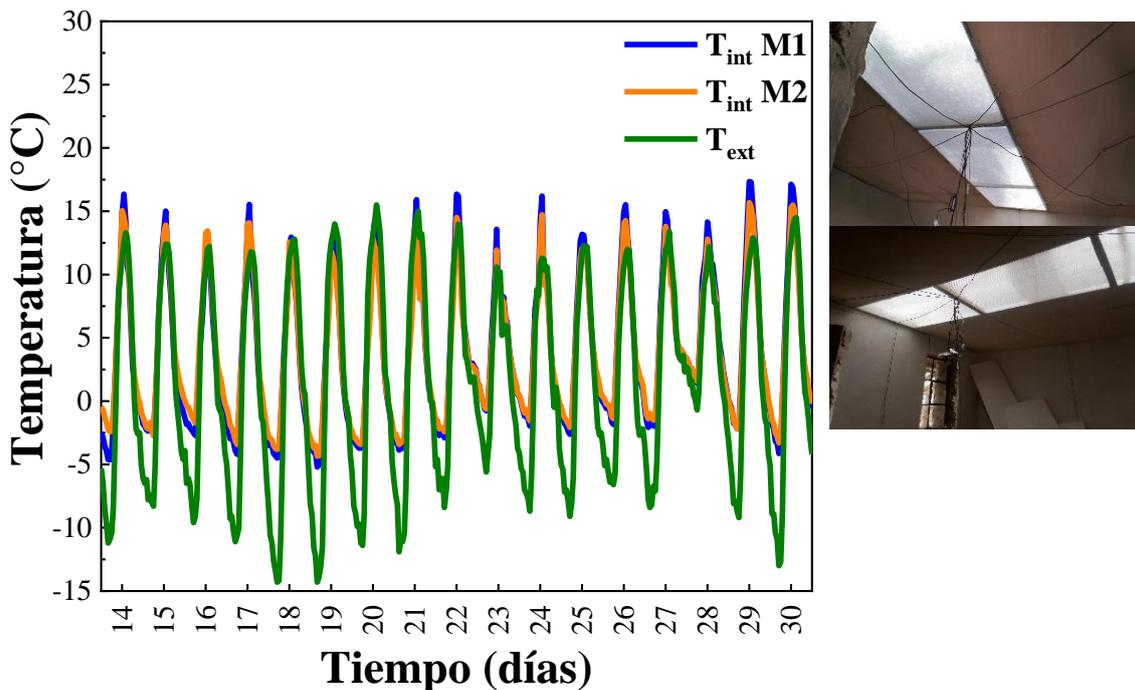


Fig. 54. Inclusión del falso techo en MEV1 y MEV2, y su comportamiento térmico comparando ambos incrementos de temperatura después de los cambios realizados: (derecha y arriba) falso techo construido en el MEV1, (derecha y abajo) falso techo construido en el MEV2, (izquierda) temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 14 al 30 de setiembre.

La figura 55 (izquierda) muestra el comportamiento de la temperatura del aire interior de MEV1 (T_{int} M1) y MEV2 (T_{int} M2), y la temperatura exterior (T_{ext}). La figura 55 (derecha y abajo) presenta el interior del ático del MEV1, en la cual la base contiene poliestireno expandido sobre tableros de triplay configurando el falso techo, y la figura 55 (derecha y arriba) muestra una vista del falso techo en el interior del módulo, en cambio, el MEV2 cuenta con falso techo solo de triplay. En este caso el registro de mediciones fue del 31 de octubre al 6 de noviembre (figura 55c), donde, para la fecha del 31 de octubre hasta el 2 de noviembre, en promedio diario horario la temperatura del aire interior para el MEV1 fue de 8,8 °C, y para el MEV2 fue de 8 °C, siendo mayor la temperatura del MEV2 en 0,8 °C con respecto al MEV1, esta diferencia puede inferirse que es debida al aporte del poliestireno expandido o conocido como tecnopor de 0,05 m de espesor, con una temperatura promedio del aire exterior de 4,9 °C; teniéndose en promedio entre las 9:00 y 18:00 horas una temperatura en el interior de los módulos de 12 °C para el MEV1 y 11,7 °C para el MEV2, con una temperatura promedio horario exterior de 9,9 °C, superior

a la exterior en 2,1 °C para el MEV1 y 1,8 °C para el MEV2, la diferencia más notoria se da entre las 24:00 y 8:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 7,1 °C para el MEV1 y 5,7 °C para MEV2, de ocurrencia a las 5:00 horas. A partir del día 03 al 06 de noviembre se observa que, el comportamiento de las temperaturas interiores de ambos módulos (T_{int} M1 y T_{int} M2) son muy parecidos, con una pequeña diferencia promedio de 0,2 °C.

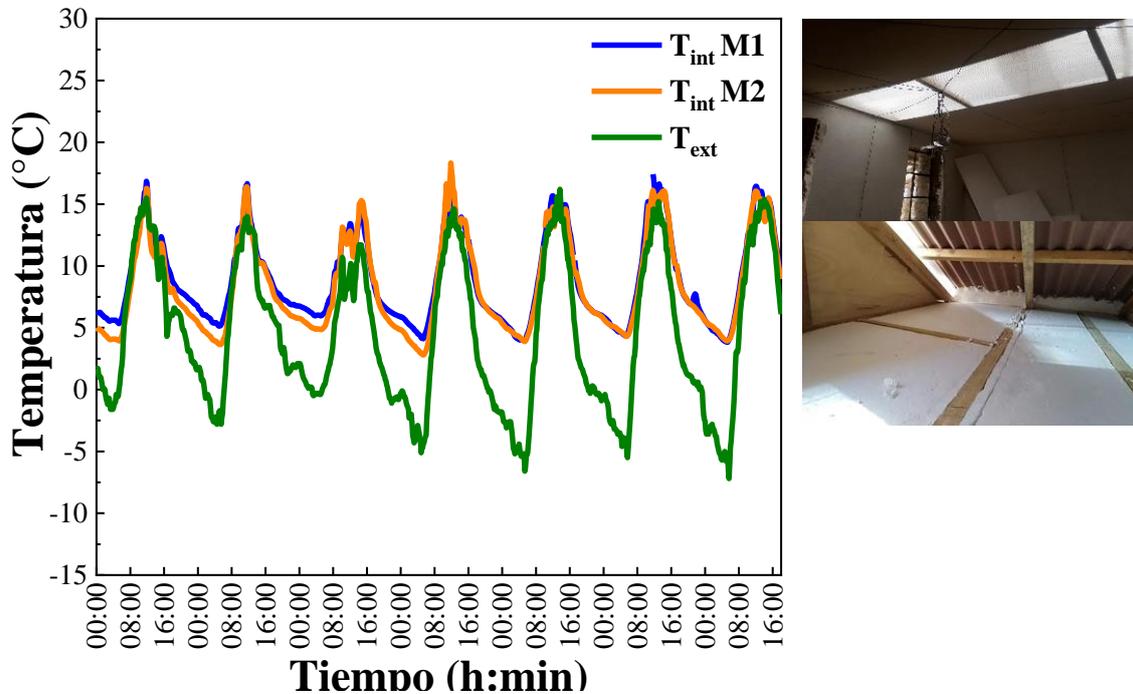


Fig. 55. Falso techo de ambos módulos (MEV1 y MEV2) y su comportamiento térmico: (izquierda) temperatura horaria en el interior de los módulos, T_{int} M1 (línea sólida azul) y T_{int} M2 (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 31 de octubre al 06 de noviembre, (derecha y abajo) poliestireno expandido sobre falso techo, (derecha y arriba) falso techo con divisiones de triplay y policarbonato.

La figura 56 muestra el comportamiento de la temperatura del aire interior de MEV1 (T_{int} M1) y MEV2 (T_{int} M2), la temperatura exterior (T_{ext}), y la temperatura del aire en el invernadero (T_{Invro}) (línea sólida negra). La figura 56a muestra parte del interior de MEV2, donde se observa la puerta y la ventana que comparten en común el módulo y el invernadero adosado en su pared norte, la figura 56b presenta parte del ambiente interior del invernadero. La data de esta modificación corresponde del 2 al 4 de diciembre (figura 56c), con la configuración de puerta y ventana cerradas, en promedio diario la temperatura del ambiente interior de MEV1 fue de 8,2 °C, y del MEV2 fue 12 °C, siendo la temperatura del aire de MEV2 mayor en 3,8 °C respecto del MEV1, con temperatura promedio horario del aire exterior de 2,1 °C y temperatura promedio del interior del invernadero de 19,5 °C; teniéndose en promedio entre las 9:00 y 18:00 horas, una temperatura del aire interior para el MEV1 de 12,7 °C y para el MEV2 de 16,9 °C, con una temperatura del exterior de 9,9 °C, siendo superior a la exterior en 2,8 °C para MEV1, y para MEV2 en 7 °C, la diferencia más notoria se da entre las 24:00 y 8:00 horas, con una diferencia promedio de temperatura de 12,4 °C para MEV1, y 16 °C para el MEV2, estos valores promedios se dan aproximadamente a las 5:00 horas.

Del 5 al 6 de diciembre, la puerta y ventana que comunica el invernadero con el MEV2 se mantuvieron abiertas en el horario de 8:00 a 16:00 horas, donde, en promedio diario, la temperatura del aire interior de MEV1 fue 8,5 °C, y para MEV2 14,1 °C, de acuerdo a ello, se tiene que la temperatura del aire interior en MEV2 es mayor en 5,6 °C que MEV1, con una temperatura promedio del aire exterior de 2,9°C y temperatura promedio del interior del invernadero de 18,2 °C. Para temperaturas promedio entre las 9:00 y 18:00 horas, la temperatura del aire interior de MEV1 fue de 12,8 °C y para el MEV2 fue de 21 °C, con una temperatura promedio exterior de 10,7 °C, siendo superior al aire exterior en 2,1 °C para MEV1, y para MEV2 en 10,3 °C, la diferencia más notoria se da entre las 24:00 y 8:00 horas, con una diferencia promedio de temperatura de 12,1 °C para MEV1 y 16 °C para MEV2, estos valores promedios se dan aproximadamente alrededor de las 5:00 horas.

Del 7 al 9 de diciembre, la ventana estuvo cerrada y la puerta se mantuvo abierta en el horario desde las 8:00 hasta las 16:00 horas, en promedio diario, la temperatura del aire interior de MEV1 fue 10,7 °C, y para MEV2 16,1 °C, de acuerdo a ello, se tiene que la temperatura del aire interior en MEV2 es mayor en 5,4 °C que MEV1, con una temperatura promedio del aire exterior de 6,5 °C y temperatura promedio del interior del invernadero de 20,9 °C. Para temperaturas promedio entre las 9:00 y 18:00 horas, la temperatura del aire interior de MEV1 fue de 14,2 °C y para el MEV2 fue de 21,8 °C, con una temperatura promedio exterior de 12,4 °C, siendo superior al aire exterior en 1,8 °C para MEV1, y para MEV2 en 9,4°C, la diferencia más notoria se da entre las 24:00 y 8:00 horas, con una diferencia promedio de temperatura de 8,7 °C para MEV1 y 12,3 °C para MEV2, estos valores promedios se dan aproximadamente alrededor de las 5:00 horas.

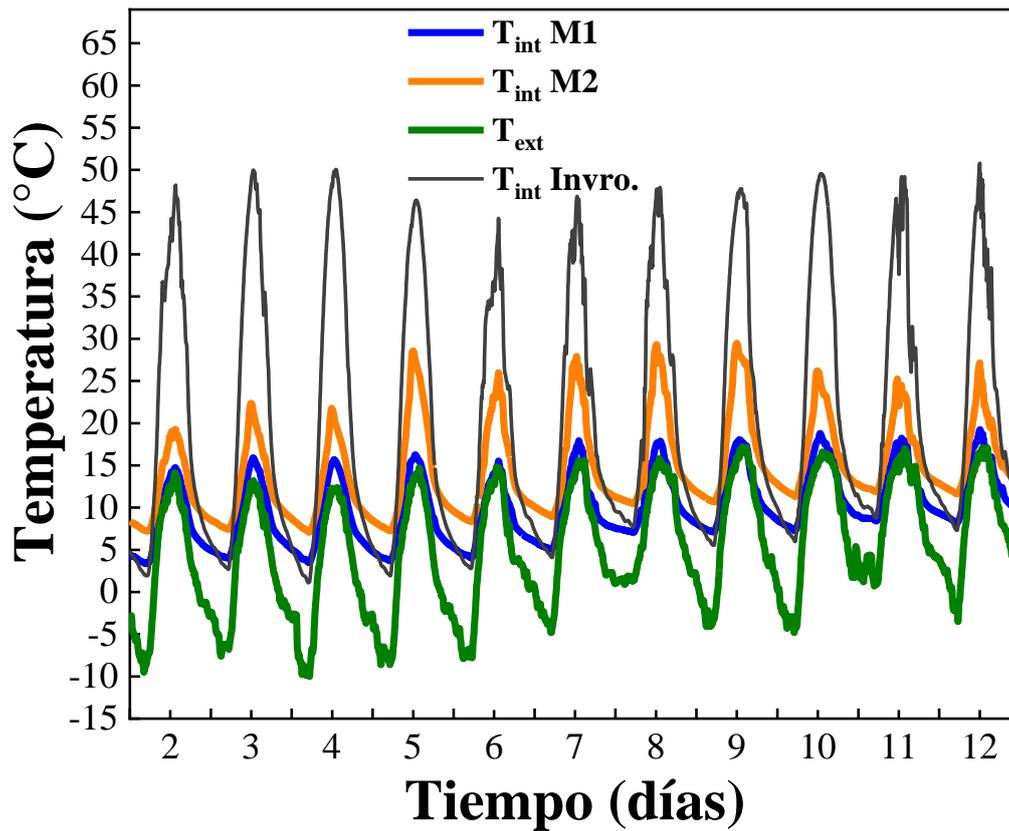
Del 10 al 12 de diciembre, la puerta se mantuvo cerrada y la ventana abierta en el horario de 8:00 a 16:00 horas, en promedio diario, la temperatura del aire interior de MEV1 fue 12,1 °C, y para MEV2 fue de 16,2 °C, de acuerdo a ello, se tiene que la temperatura del aire interior en MEV2 es mayor en 4,1 °C que MEV1, con una temperatura promedio del aire exterior de 7,7 °C y temperatura promedio del interior del invernadero de 22,8 °C. Para temperaturas promedio entre las 9:00 y 18:00 horas, la temperatura del aire interior de MEV1 fue de 16,1 °C y para el MEV2 fue de 21 °C, con una temperatura promedio exterior de 14,5 °C, siendo superior al aire exterior en 1,6 °C para MEV1, y para MEV2 en 6,5 °C, la diferencia más notoria se da entre las 24:00 y 8:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 10,5 °C para MEV1 y 14,1 °C para MEV2, estos valores promedios se dan aproximadamente alrededor de las 5:00 horas.



(a)



(b)



(c)

Fig. 56. Interior del invernadero y comportamiento térmico del invernadero y de los módulos: (a) puerta y ventana que comunican el módulo y el invernadero, (b) ambiente interior del invernadero, y (c) temperatura horaria en el interior de los módulos, $T_{int} M1$ (línea sólida azul) y $T_{int} M2$ (línea sólida anaranjada), temperatura del invernadero T_{Invro} (línea sólida negra), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 02 al 12 de diciembre.

En la tabla 7 se muestran los horarios de las diferentes configuraciones tanto para la puerta y la ventana que comunica el interior del ambiente del módulo experimental y el invernadero adosado en su pared norte. La ventana y la puerta que comunican ambos espacios, se abrieron en el horario desde las 8:00 hasta las 16:00 horas, de acuerdo con las diferentes configuraciones realizadas, ya sea ambas abiertas, una abierta y la otra cerrada o ambas cerradas.

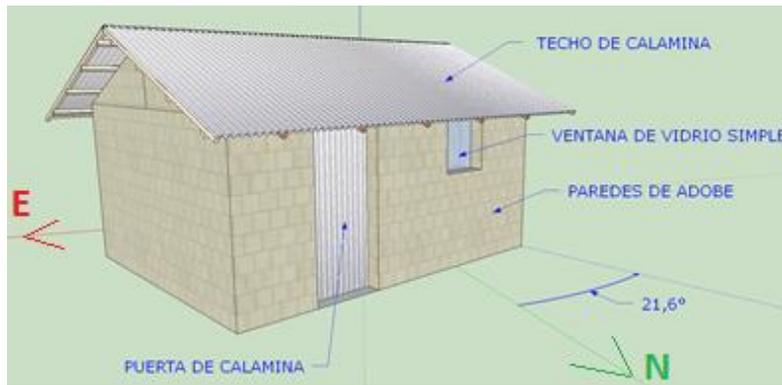
Tabla 7. Tabla de las interacciones entre el invernadero y el MEV2, mediante la configuración de ventana o puerta cerrada o abierta o solo uno de ellos abierto y la otra cerrada en el horario de 8:00 a 16:00 horas.

Interacción entre el Invernadero y el módulo en el horario de 8:00 am - 16:00 pm		
Día	Entre el módulo y el Invernadero	
	Puerta	Ventana
2-Dic	X	X
3-Dic	X	X
4-Dic	X	X
5-Dic	✓	✓
6-Dic	✓	✓
7-Dic	✓	X
8-Dic	✓	X
9-Dic	✓	X
10-Dic	X	✓
11-Dic	X	✓
12-Dic	X	✓

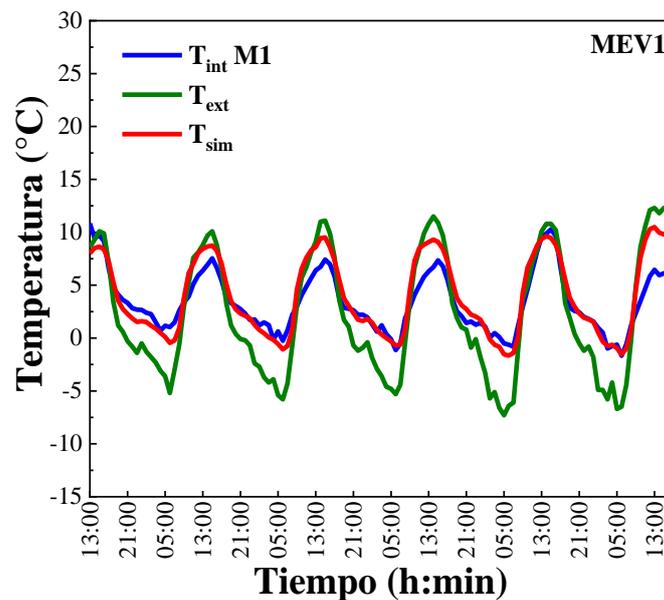
✓ : Abierto
X : Cerrado

Simulaciones térmicas

En la figura 57 se muestran los valores experimentales y simulados de la temperatura en el interior del ambiente del MEV1 (figura 57b), (desde ahora línea azul para los valores experimentales (T_{int}) y roja para los valores simulados (T_{sim})), la temperatura exterior (desde ahora línea verde sólida (T_{ext})), inicialmente representa el módulo tradicional dibujado en *SketchUp* (figura 57a), para los días del 26 al 31 de julio. En promedio diario horario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 3,3 °C y la simulada de 3,8 °C, con una diferencia promedio diario de 0,5 °C entre lo experimental y lo simulado, la temperatura promedio del aire exterior fue de 1,9 °C. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV1 fue de 5,9 °C, y en el exterior fue de 7,6 °C, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 1,7 °C con respecto al exterior, es decir, la temperatura interior del módulo es inferior a la del exterior. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente a las 6:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de 5,7 °C para el MEV1. Para el módulo MEV1 se muestra la orientación con respecto al eje del norte con un ángulo de rotación de 21,6° en dirección oeste.



(a)



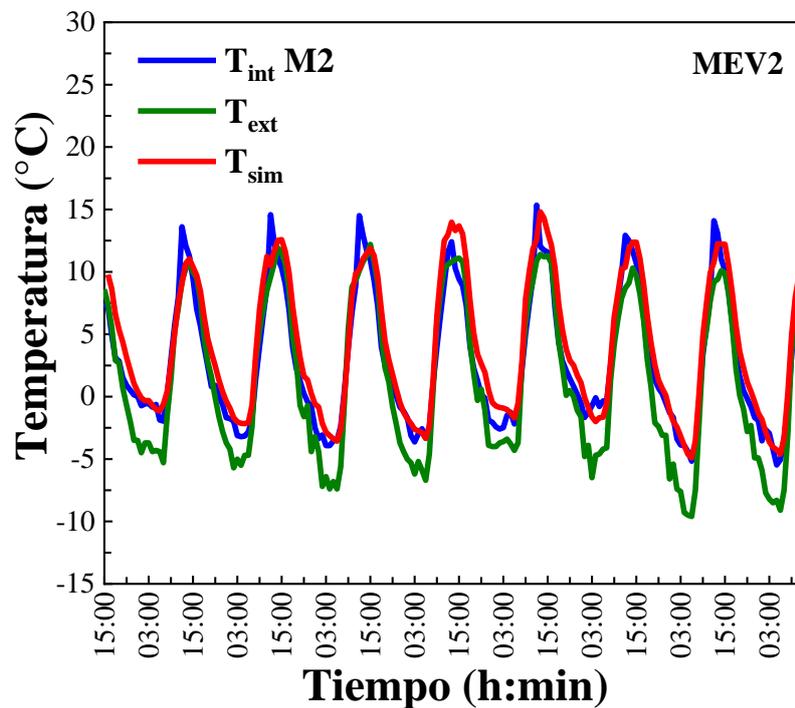
(b)

Fig. 57. MEV1 típico y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV1 en su estado inicial representado en *SketchUp*, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 26 al 31 de julio.

En la figura 58 se presentan los valores simulados (T_{sim}) y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del MEV2 (T_{int}), temperatura exterior (T_{ext}). El MEV2 muestra un cambio en el techado con material de fibrocemento y claraboya en ambas caídas del techo, dibujados en *SketchUp* (figura 58a), para los días del 7 al 14 de agosto (figura 58b). En promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de $3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la simulada $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una diferencia promedio diario de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre lo experimental y lo simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV2 fue de $8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en el exterior fue de $8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, con lo cual se tiene una diferencia promedio de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente entre las 5:00 y 6:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de $2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el MEV2. Para el módulo MEV2 se muestra la orientación con respecto al eje del norte con un ángulo de rotación de $21,6^{\circ}$ en dirección oeste (figura 58a).



(a)



(b)

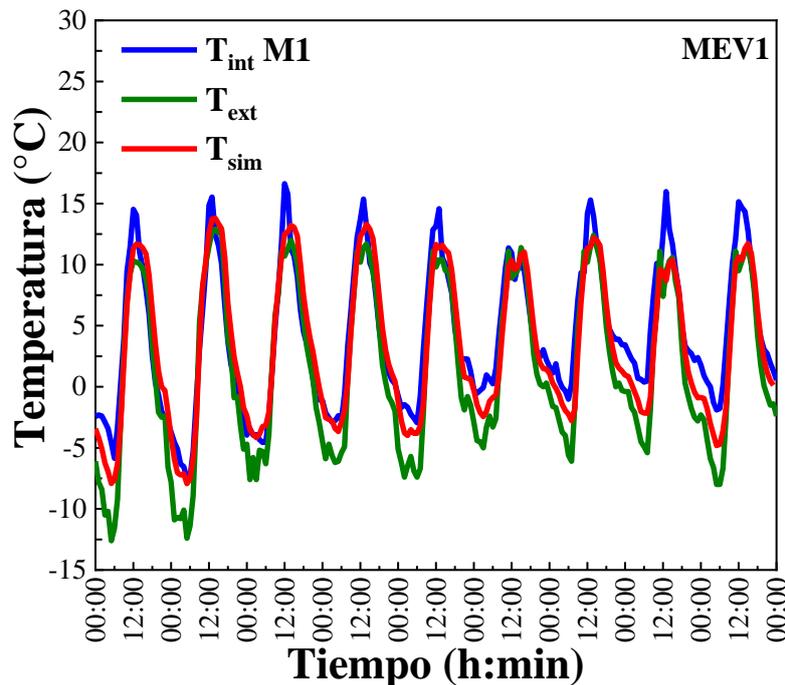
Fig. 58. Imagen del MEV2 mejorado y su comportamiento térmico: (a) cambio en el techado con fibrocemento y claraboya para el MEV2, dibujado en *SketchUp*, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 7 al 14 de agosto.

En la figura 59 se presentan los valores simulados (T_{sim}) y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del MEV1 (T_{int}), la temperatura exterior (T_{ext}). El MEV1 cuenta con techo de fibrocemento, claraboya y enlucido de yeso en las paredes de adobe, en el interior y exterior del módulo, dibujado en *SketchUp* (figura 59a), para los días del 23 al 31 de agosto (figura 59b). En promedio diario horario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 4 °C y la simulada 3,7 °C, con una diferencia promedio diario de 0,3 °C entre lo experimental y simulado, la temperatura promedio horario del aire exterior fue de 1,5 °C. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00

horas al interior del MEV1 fue de $9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en el exterior fue de $8,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, con lo cual se tiene una diferencia promedio de $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente entre las 5:00 y 6:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el MEV1. Para el MEV1 se muestra la orientación con respecto al eje del norte con un ángulo de rotación de $21,6^{\circ}$ en dirección oeste (figura 59a).



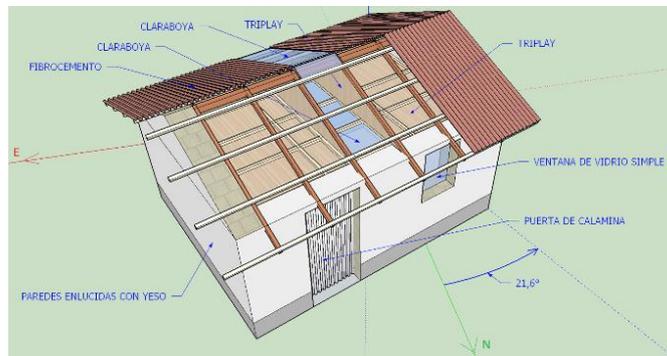
(a)



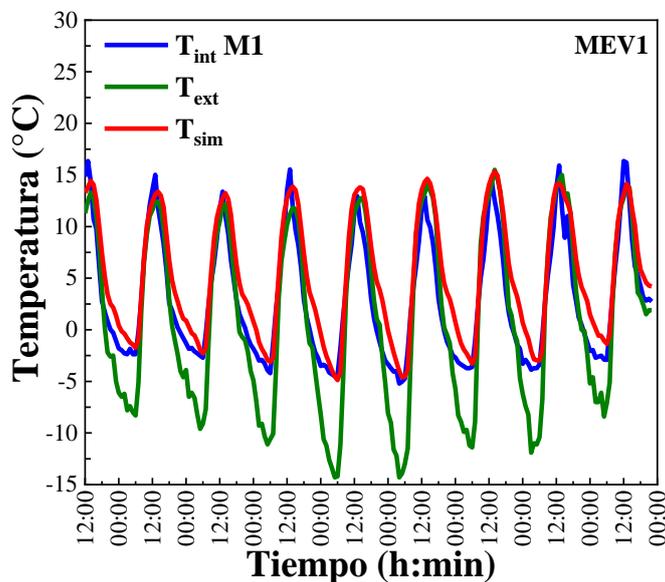
(b)

Fig. 59. MEV1 mejorado y su comportamiento térmico simulado: (a) techado con fibrocemento, claraboya y enlucido de yeso en las paredes de adobe del MEV1, dibujado en *SketchUp*, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea azul sólida), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 23 al 31 de agosto.

En la figura 60 se muestran los valores simulados (T_{sim}) y experimentales de la temperatura en el interior del ambiente del MEV1 (T_{int}), la temperatura exterior (T_{ext}). El MEV2 ahora lleva falso techo además de enlucido de yeso en las paredes tanto en el interior como el exterior del módulo y están dibujados en *SketchUp* (figura 60a), para los días del 14 al 22 de setiembre (figura 60b). En promedio diario horario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 2,9 °C y la simulada 4,9 °C, con una diferencia promedio diario de 2 °C entre lo experimental y lo simulado, la temperatura promedio del aire exterior fue de 0,9 °C. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV1 fue de 9 °C, y en el exterior fue de 9,9 °C, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 1,1 °C respecto del exterior, es decir que en el exterior está más caliente que en el módulo. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente entre las 5:00 y 6:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de 7,3 °C para el MEV1. Para el módulo MEV1 se muestra la orientación con respecto al eje del norte con un ángulo de rotación de 21,6° en dirección oeste (figura 60a).



(a)



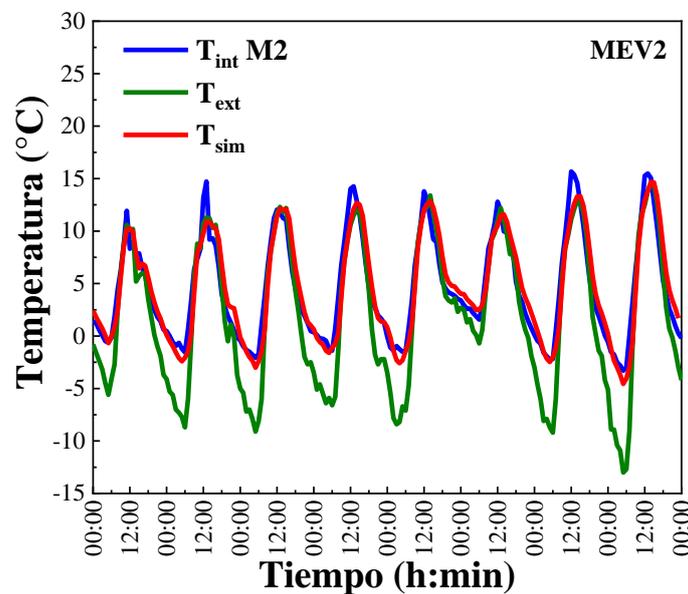
(b)

Fig. 60. Imagen del MEV1 y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV1 en *SketchUp*, con falso techo y la separación del ático en 3 cámaras, y (b) temperatura horaria en el interior del MEV1, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 14 al 22 de setiembre.

En la figura 61 se presentan los valores simulados (T_{sim}) y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del MEV2 (T_{int}), la temperatura exterior (T_{ext}). El MEV2 ahora cuenta con falso techo y el ático se separó en 3 cámaras, dibujado en *SketchUp* (figura 61a), para los días del 23 al 30 de setiembre (figura 61b). En promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la simulada $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una diferencia promedio diario de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre lo experimental y lo simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV2 fue de $10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en el exterior fue de $9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, con lo cual se tiene una diferencia promedio de $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente entre las 5:00 y 6:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el MEV2. Para el módulo MEV2 se muestra la orientación con respecto al eje del norte con un ángulo de rotación de $21,6^{\circ}$ en dirección oeste (figura 61a).



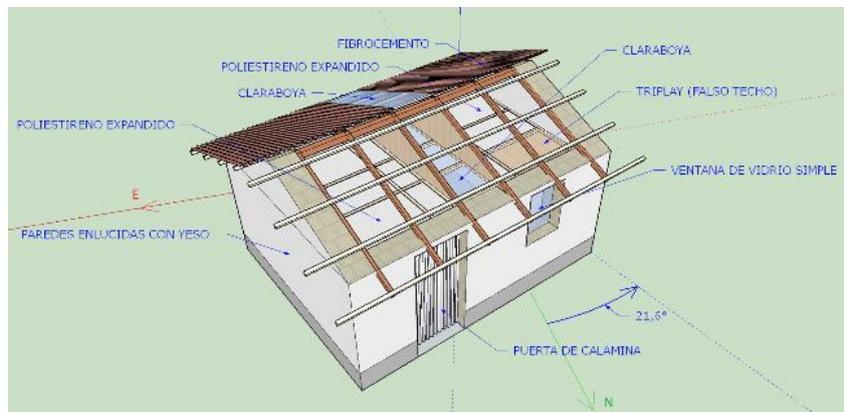
(a)



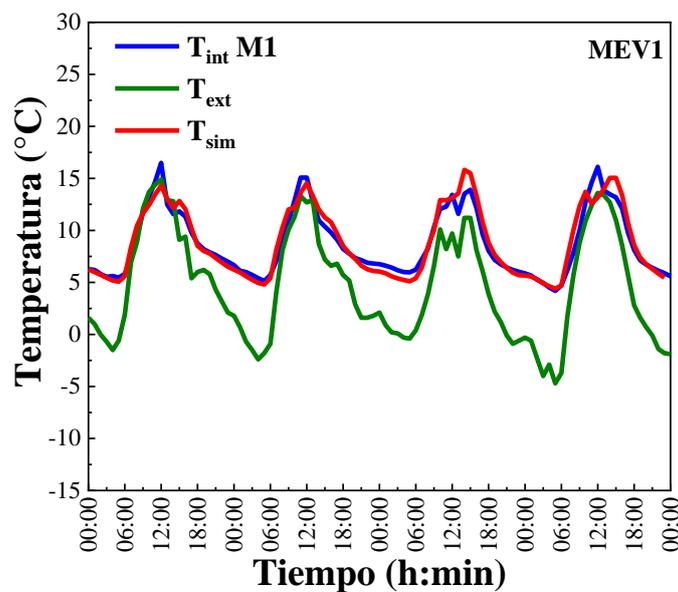
(b)

Fig. 61. Imagen del MEV2 y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en *SketchUp*, con falso techo y la separación del ático en 3 cámaras, y (b) temperatura horaria en el interior del MEV2, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 23 al 30 de setiembre.

En la figura 62 se presentan los valores simulados (T_{sim}) y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del MEV1 (T_{int}) y la temperatura exterior (T_{ext}). El MEV1 lleva poliestireno expandido de 0,05 m colocado sobre la base de triplay del falso techo, representado en *SketchUp* (figura 62a), para los días del 31 de octubre al 3 de noviembre (figura 62b). En promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 8,8 °C y la simulada 8,9 °C, con una diferencia promedio diario de 0,1 °C entre lo experimental y lo simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de 4,9 °C. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV1 fue de 11,8 °C, y en el exterior fue de 9,6 °C, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 2,2°C. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente entre las 4:00 y 5:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de 7,1 °C para el MEV1. Para el módulo MEV1 se muestra la orientación con respecto al eje del norte con un ángulo de rotación de 21,6° en dirección oeste (figura 62a).



(a)



(b)

Fig. 62. Imagen del MEV1 y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV1 en *SketchUp*, con falso techo y poliestireno expandido sobre la base del falso

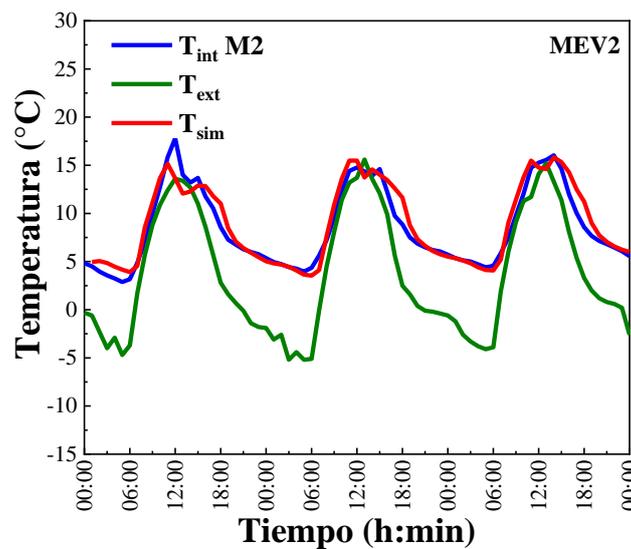
techo, y (b) temperatura horaria en el interior del MEV1, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 31 de octubre al 03 de noviembre.

En la figura 63 se presentan los valores simulados (T_{sim}) y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del MEV2 (T_{int}), la temperatura exterior (T_{ext}). El MEV2 lleva poliestireno expandido de 0,05 m sobre la base de triplay del falso techo, dibujo representado en *SketchUp* (figura 63a), para los días del 3 al 5 de noviembre (figura 63b). En promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 8,6 °C y la simulada 9 °C, con una diferencia promedio diario de 0,4 °C entre lo experimental y lo simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de 3,8 °C. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV2 fue de 12,7 °C, y en el exterior fue de 10,4 °C, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 2,2 °C. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente alrededor de las 5:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de 8,8 °C para el MEV2.

Para el módulo MEV2 se muestra la orientación con respecto al eje del norte con un ángulo de rotación de 21,6° en dirección oeste.



(a)



(b)

Fig. 63. Imagen del MEV2 y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en *SketchUp*, con falso techo y poliestireno expandido sobre la base del falso techo, y (b) temperatura horaria en el interior del MEV2, T_{int} (línea sólida azul),

temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 03 al 05 de noviembre.

Representación del invernadero adosado al MEV2 en su pared norte, dibujados en *SketchUp*, se observa en la figura 64 el ángulo de rotación de $21,6^\circ$ con respecto del eje del norte geográfico con dirección oeste, así como algunos materiales que se señalan en la figura.

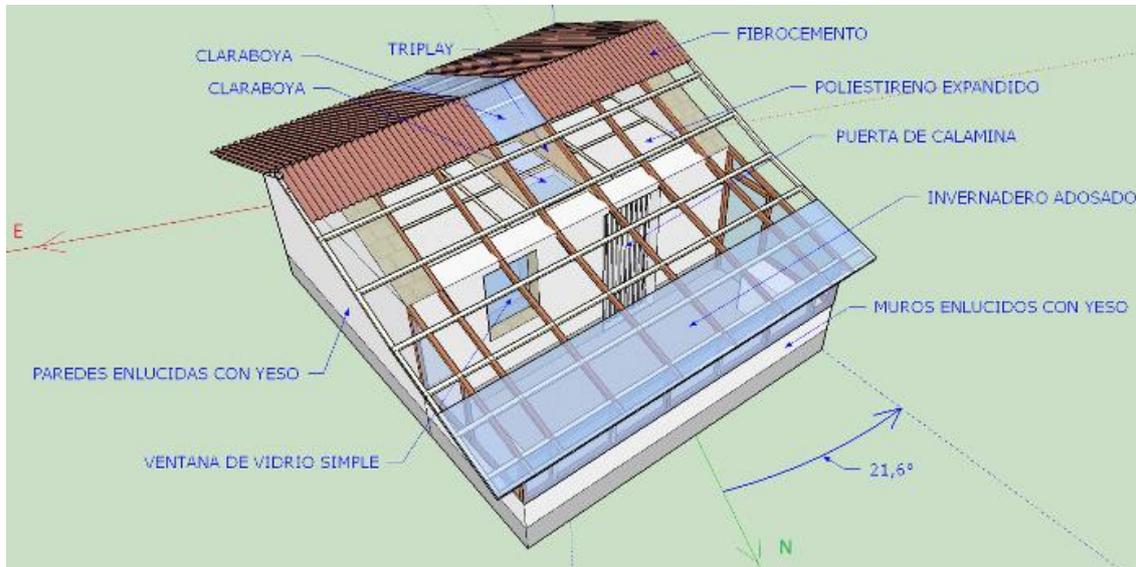
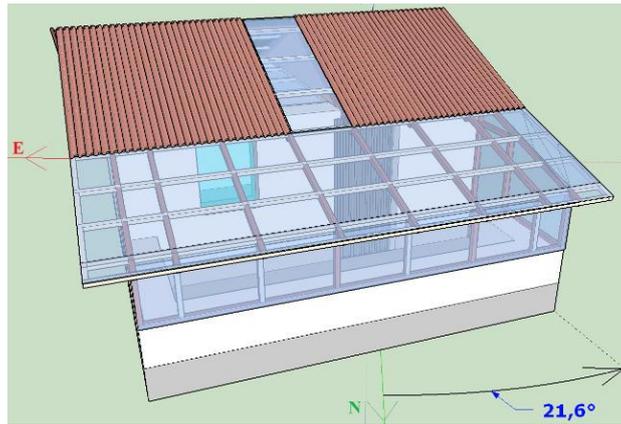


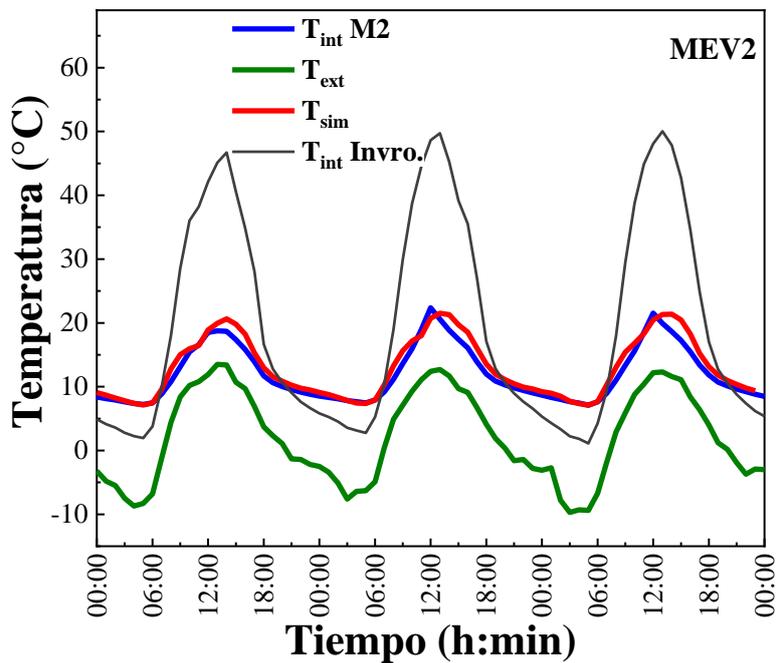
Fig. 64. Representación del invernadero adosado al MEV, donde se señalan algunos de los materiales usados en la construcción, el ángulo de rotación del MEV y su dirección con respecto al norte geográfico.

Para fines de una representación clara en las imágenes y poder apreciar las diferentes configuraciones realizadas en la puerta y ventana que comunican el módulo y el invernadero, el color de la ventana se cambió a turquesa para visualizar cuando esté abierta o cerrada.

En la figura 65 se muestran los valores experimentales y simulados (T_{sim}) de la temperatura en el interior del ambiente del MEV2 (T_{int}), la temperatura exterior (T_{ext}) y la temperatura en el ambiente interior del invernadero (T_{Invro}) (desde ahora línea negra sólida). El MEV2 ahora tiene un invernadero adosado en la pared norte del módulo, representado en *SketchUp* (figura 65a), para los días del 02 al 04 de diciembre (figura 65b), con una configuración de puerta y ventana cerradas del MEV2 (ver tabla 7), en promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 12°C y la simulada $12,9^\circ\text{C}$, con una diferencia promedio diario de $0,9^\circ\text{C}$ entre lo experimental y simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de $2,1^\circ\text{C}$ y temperatura promedio del aire interior del invernadero de $19,6^\circ\text{C}$. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV2 fue de $16,5^\circ\text{C}$, y en el exterior fue de $9,5^\circ\text{C}$, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 7°C . La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de $16,3^\circ\text{C}$ para el MEV2, de acurrencia a las 5:00 horas. El ángulo de rotación del MEV2 y el invernadero adosado en su pared norte es de $21,6^\circ$ en dirección oeste, observándose en la imagen tanto la puerta y la ventana del MEV2 abiertas (figura 65a).



(a)

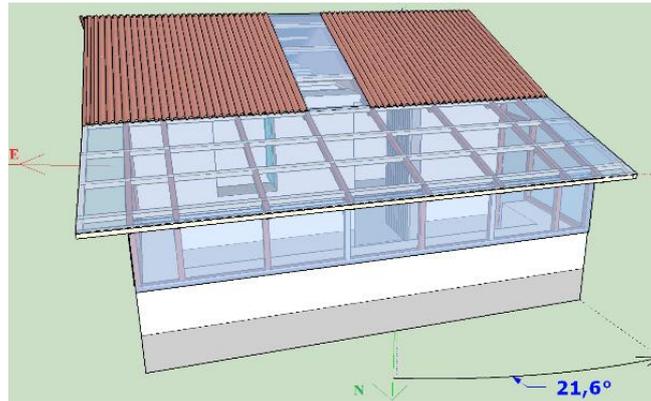


(b)

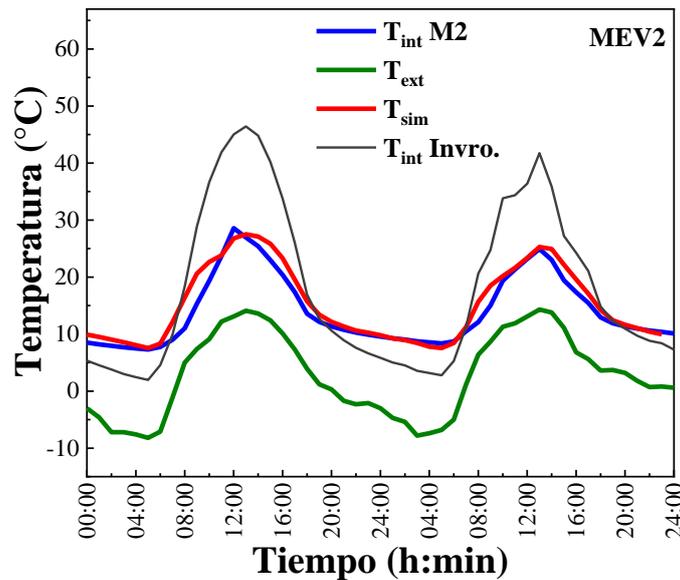
Fig. 65. Imagen del MEV2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en su estado final en *SketchUp*, con puerta y ventana cerrada, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, T_{Invro} (línea negra sólida), del 02 al 04 de diciembre.

La figura 66 presenta los valores experimentales y simulados (T_{sim}) de la temperatura en el interior del ambiente del MEV2 (T_{int}), la temperatura exterior (T_{ext}) y la temperatura en el ambiente interior del invernadero (T_{Invro}). El MEV2, lleva el invernadero adosado, dibujado en *SketchUp* (figura 65a), del 05 al 06 de diciembre (figura 65b), con una configuración de puerta y ventana abiertas del MEV2 en el horario de 8:00 a 16:00 horas (ver tabla 7), en promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 14,1 °C y la simulada 15,2 °C, con una diferencia promedio diario de 1,1 °C entre lo experimental y simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de 2,8 °C y

temperatura promedio del aire interior del invernadero de 18,1 °C. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV2 fue de 20,3 °C, y en el exterior fue de 10,2 °C, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 10,1 °C. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente entre las 4:00 y 5:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de 15,7 °C para el MEV2. El ángulo de rotación del MEV2 y el invernadero adosado en su pared norte es de 21,6° en dirección oeste, observándose en la imagen (diseñado en *SketchUp*) tanto la puerta y la ventana del MEV2 abiertas.



(a)

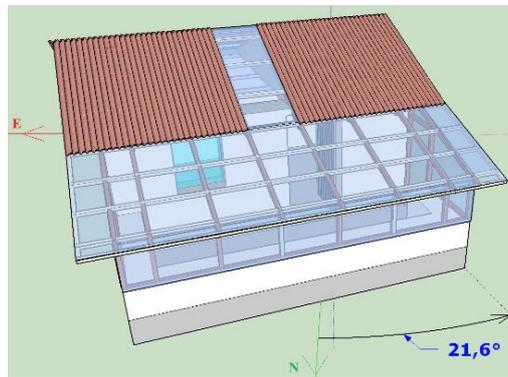


(b)

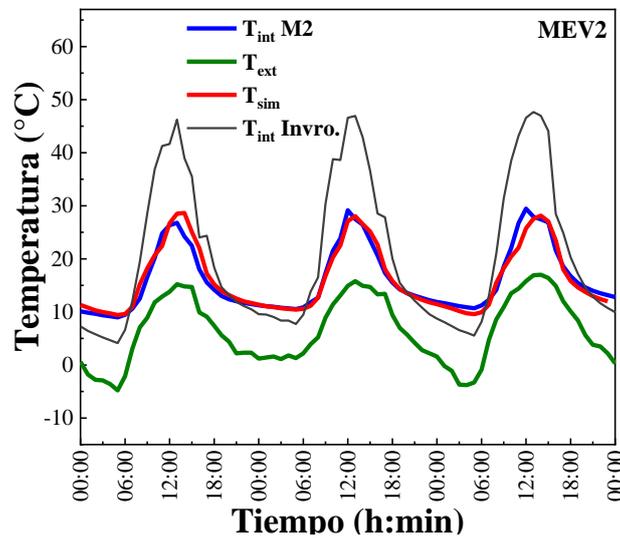
Fig. 66. Imagen del MEV2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en su estado final en *SketchUp*, con puerta y ventana abiertas, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, $T_{Invro.}$ (línea negra sólida), del 05 al 06 de diciembre.

La figura 67 presenta los valores experimentales y simulados (T_{sim}) de la temperatura en el interior del ambiente del MEV2 (T_{int}), la temperatura exterior (T_{ext}) y la temperatura en el ambiente interior del invernadero ($T_{Invro.}$), del 07 al 09 de diciembre (figura 67b),

con una configuración de puerta abierta y ventana cerrada del MEV2 (figura 67a) en el horario de 8:00 a 16:00 horas, en promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 16,1 °C y la simulada 16,2 °C, con una diferencia promedio diario de 0,1 °C entre lo experimental y simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de 6,5 °C y temperatura promedio del aire interior del invernadero de 20,9 °C. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV2 fue de 22,3 °C, y en el exterior fue de 13 °C, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 9,3 °C. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente entre las 4:00 y 5:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de 12,6 °C para el MEV2. El ángulo de rotación del MEV2 y el invernadero adosado en su pared norte es de 21,6° en dirección oeste (figura 67a), observándose en la imagen (diseño en *SketchUp*) tanto la puerta y la ventana del MEV2 abiertas.



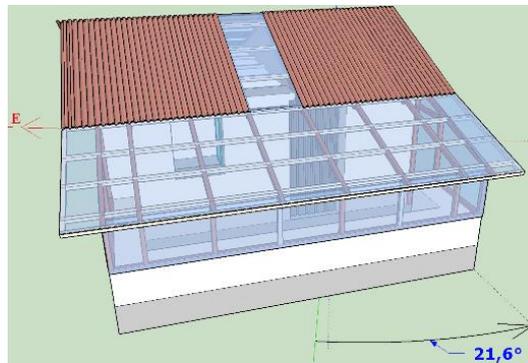
(a)



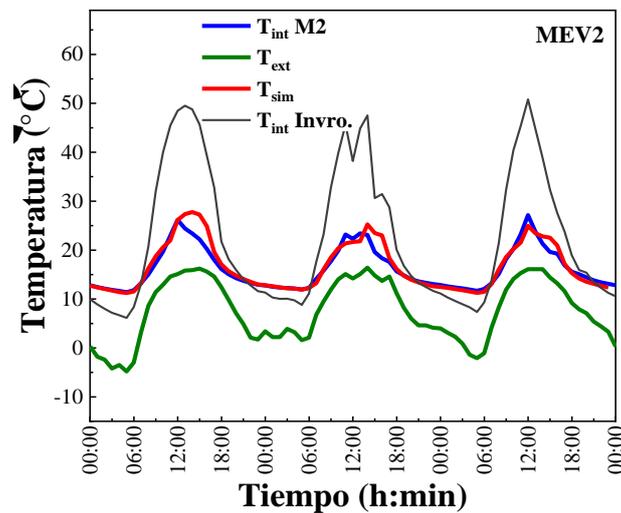
(b)

Fig. 67. Imagen del MEV2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en su estado final en *SketchUp*, con puerta abierta y ventana cerrada, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, T_{Invro} (línea negra sólida), del 07 al 09 de diciembre.

En la figura 68 se presentan los valores simulados y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del MEV2, la temperatura exterior y la temperatura en el ambiente interior del invernadero, del 10 al 12 de diciembre (figura 68b), con una configuración de puerta cerrada y ventana abierta del MEV2 (figura 68a) en el horario de 8:00 a 16:00 horas, en promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 16,2 °C y la simulada 16,5 °C, con una diferencia promedio diario de 0,3 °C entre lo experimental y simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de 7,6 °C y temperatura promedio del aire interior del invernadero de 22,6 °C. La temperatura promedio entre las 9:00 y 18:00 horas al interior del MEV2 fue de 20,5 °C, y en el exterior fue de 14,1 °C, con lo cual se tiene una diferencia promedio de 6,4 °C. La diferencia más notoria se presenta entre las 24:00 y las 8:00 horas, específicamente alrededor de las 5:00 horas, en el cual la diferencia promedio de temperaturas fue de 13,4 °C para el MEV2. El ángulo de rotación del MEV2 y el invernadero adosado en su pared norte es de 21,6° en dirección oeste, observándose en la imagen, tanto la puerta y la ventana del MEV2 abiertas.



(a)



(b)

Fig. 68. Imagen del MEV2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado: (a) representación del MEV2 en su estado final dibujado en *SketchUp*, con puerta cerrada y ventana abierta, y (b) temperatura horaria en el interior del módulo, T_{int} (línea sólida azul), temperatura simulada, T_{sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{ext}

(línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, T_{Invro} (línea negra sólida), del 10 al 12 de diciembre.

Análisis de la temperatura en las cámaras.

MEV1

Los espacios generados en el ático son tres: el del centro está conformado por muros de triplay en dirección este y oeste, y tanto en la parte del techo que tiene dos caídas, una en dirección norte y la otra en dirección sur, y la parte inferior que es la base, son de material de policarbonato alveolar traslúcido, la cámara formada en los extremos está conformada por un muro de adobe con enlucido de yeso y el otro muro de triplay, cada una con base de triplay. En dos de estas cámaras se registraron las temperaturas del aire utilizando sensores Pt100, colocadas en el centro del interior de las cámaras (en la figura 69c encerrados en un círculo de color turquesa). En la figura se muestra la distribución de las tres cámaras formadas en el ático (figura 69c), en circunferencias de color turquesa los sensores de temperatura cubiertos con papel de aluminio en forma de cono (figura 69c), los sensores colocados se protegieron de la radiación solar con papel de aluminio en forma de un cono (figura 69a) y estos fueron conectados a un registrador de datos (figura 69b).

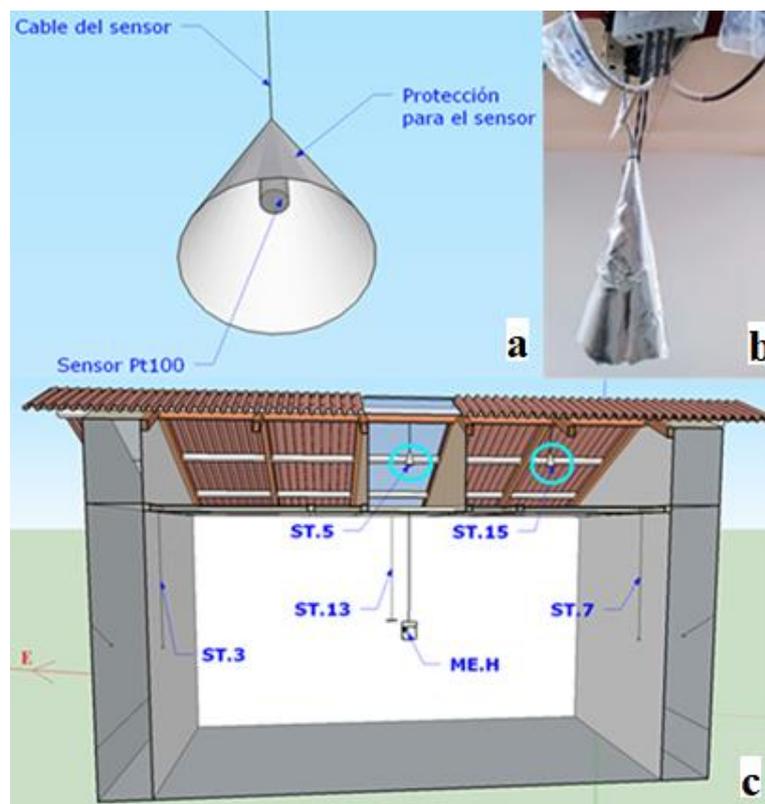


Fig. 69. Ubicación de los ST. y protección del sensor de la radiación solar.

La figura 70 muestra el comportamiento térmico del aire en el interior de la cámara de policarbonato (T_{int} Cám. Policarbonato, desde ahora línea sólida morada), cámara de triplay (T_{int} Cám. Triplay, desde ahora línea sólida amarilla), interior del MEV1 (T_{int} M1) y la temperatura en el exterior (T_{ext}). El registro de medida fue del 10 al 18 de diciembre, en promedio diario horario la temperatura en el interior de la cámara de policarbonato fue de 12,4 °C, para el de triplay fue de 8,8 °C, para el interior del módulo fue de 10,9 °C,

siendo mayor la temperatura de la cámara de policarbonato en 3,6 °C con respecto al de la cámara de triplay, y en 1,5 °C con respecto al del MEV1, con una temperatura promedio diario horario del aire exterior de 5 °C; presentándose en promedio diario horario entre las 9:00 y 18:00 horas una temperatura en el aire interior de las cámaras en el ático y el módulo, de 23,4 °C para la cámara de policarbonato, 18,3 °C para la cámara de triplay y 13,6 °C para MEV1, con una temperatura promedio exterior de 9,4 °C, superior a la exterior en 14 °C para la cámara de policarbonato, superior a la exterior en 8,9 °C para la cámara de triplay y superior a la exterior en 4,2 °C para el MEV1. La diferencia que más se notó se dio entre las 24:00 y 7:00 horas, con una diferencia promedio diario horario de temperatura entre el aire interior de las cámaras, módulo y el exterior, de -0,03 °C para la cámara de policarbonato, -1,5 °C para la de triplay y 8,8 °C para MEV1, de ocurrencia entre las 4:00 y 5:00 horas.

La diferencia promedio horario diario entre la temperatura en el exterior y la temperatura en el interior de la cámara de triplay fue de 1,4 °C, durante la noche, entre las 23:00 horas del día anterior y las 6:00 del día siguiente. El promedio horario diario de la temperatura en el exterior fue de 0,7 °C mayor con respecto al promedio horario de temperatura en el interior de la cámara de policarbonato, durante la noche, entre las 22:00 horas del día anterior y las 4:00 o 5:00 horas del día siguiente. Prácticamente las temperaturas en el interior de las cámaras del ático son menores o iguales con respecto a la temperatura del aire exterior, en el horario desde las 23:00 horas del día anterior hasta las 5:00 horas del día siguiente. Los promedios horarios para los máximos de temperatura se dieron entre las 12:00 y las 14:00 horas, con valores promedio de 35,4 °C, 29,4 °C, 16,7 °C para el interior de la cámara de policarbonato, triplay, interior del módulo respectivamente y de 12,7 °C para el exterior, siendo la temperatura en el interior de la cámara de policarbonato, triplay mayor en 18,7 °C y 12,7 °C respectivamente con respecto al interior del módulo, y la temperatura en el interior del módulo en 4 °C mayor a la exterior.

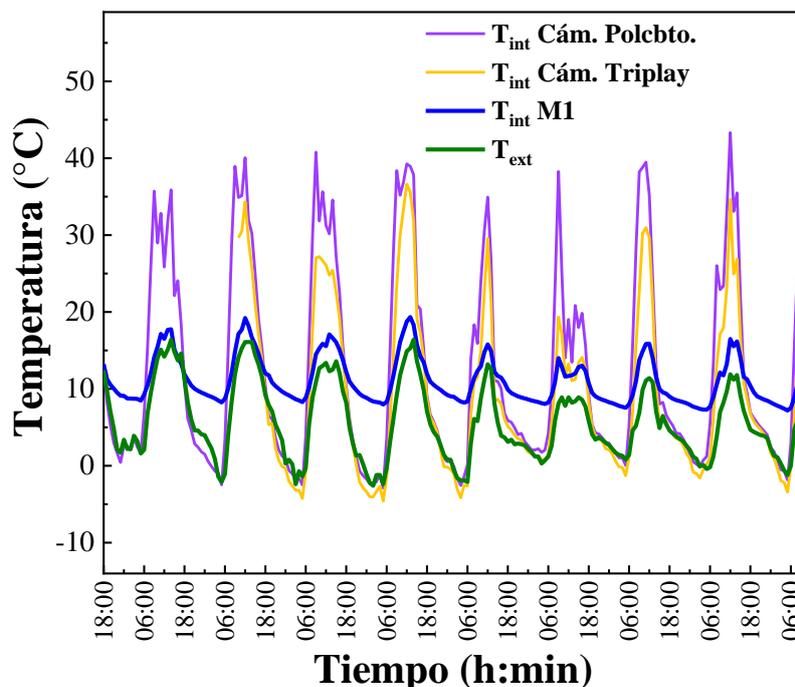


Fig. 70. Comportamiento térmico de las cámaras en el ático del MEV1: temperatura en el interior de la cámara de policarbonato, T_{int} Cám. Polcbto. (línea sólida morada),

temperatura en el interior de la cámara de triplay, $T_{\text{int}} \text{Cám. Triplay}$ (línea sólida amarilla), temperatura en el interior del módulo 1, $T_{\text{int}} \text{M1}$ (línea sólida azul) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 10 al 18 de diciembre.

MEV2

Al igual que en el MEV1, las mediciones se hicieron para el MEV2, la diferencia fue que se consideró el invernadero.

La figura 71 muestra el comportamiento térmico del aire en el interior de la cámara de policarbonato ($T_{\text{int}} \text{Cám. Policarbonato}$), cámara de triplay ($T_{\text{int}} \text{Cám. Triplay}$), invernadero (T_{Invro} , línea sólida negra), interior del MEV2 ($T_{\text{int}} \text{M2}$) y la temperatura en el exterior (T_{ext}). El registro de medida fue del 09 al 18 de diciembre, en promedio diario horario la temperatura en el interior de la cámara de policarbonato fue de $13,6 \text{ }^\circ\text{C}$, para el de triplay fue de $10,3 \text{ }^\circ\text{C}$, para el invernadero fue de $18,7 \text{ }^\circ\text{C}$, para el interior del módulo fue de $15,2 \text{ }^\circ\text{C}$, siendo mayor la temperatura de la cámara de policarbonato en $3,3 \text{ }^\circ\text{C}$ con respecto al de la cámara de triplay, y menor en $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ al MEV2, la temperatura en el invernadero fue de $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ mayor al MEV2, con una temperatura promedio diario horario del aire exterior de $5,4 \text{ }^\circ\text{C}$; obteniéndose en promedio diario horario entre las 9:00 y 18:00 horas una temperatura en el aire interior de las cámaras en el ático, invernadero y el módulo, de $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$ para la cámara de policarbonato, $20,6 \text{ }^\circ\text{C}$ para la cámara de triplay, $29,4 \text{ }^\circ\text{C}$ para el invernadero y $19,2 \text{ }^\circ\text{C}$ para MEV1, con una temperatura promedio exterior de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, superior a la exterior en $14,8 \text{ }^\circ\text{C}$ para la cámara de policarbonato, superior a la exterior en $10,5 \text{ }^\circ\text{C}$ para la cámara de triplay, superior a la exterior en $19,3 \text{ }^\circ\text{C}$ para el invernadero y superior a la exterior en $9,2 \text{ }^\circ\text{C}$ para el MEV2. La diferencia más relevante se dio entre las 24:00 y 7:00 horas, teniéndose una diferencia promedio diario horario de temperatura entre el aire interior de las cámaras, invernadero, módulo y el exterior, de $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ para la cámara de policarbonato, $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ para la de triplay, $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ para el invernadero y $12,4 \text{ }^\circ\text{C}$ para MEV2, de ocurrencia a las 5:00 horas. La diferencia promedio horario entre la temperatura en el exterior y la temperatura en el interior de la cámara de triplay fue de $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$, durante la noche, entre las 22:00 horas del día anterior y las 5:00 del día siguiente. El promedio horario de la temperatura en el exterior fue de $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ menor con respecto al promedio horario de temperatura en el interior de la cámara de policarbonato, durante la noche, entre las 21:00 horas del día anterior y las 5:00 horas del día siguiente. El comportamiento que se observa en la gráfica al igual que en el MEV1 la temperatura en el interior de la cámara de triplay es menor o igual con respecto a la temperatura del aire exterior, entre las 23:00 horas del día anterior hasta las 5:00 horas del día siguiente. A diferencia del caso de MEV1, ahora la temperatura en el interior de la cámara de policarbonato es mayor o igual a la exterior entre las 21:00 horas del día anterior y las 5:00 horas del día siguiente. El promedio horario para los máximos de temperatura se dieron alrededor de las 12:00 horas, con valores de $36,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $31,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $40,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $24,7 \text{ }^\circ\text{C}$ para el interior de la cámara de policarbonato, triplay, interior del invernadero y el interior del módulo respectivamente y de $12,7 \text{ }^\circ\text{C}$ para el exterior, siendo la temperatura en el interior de la cámara de policarbonato, triplay, invernadero mayor en $11,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $7 \text{ }^\circ\text{C}$, $15,8 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente, mayor con respecto al interior del módulo, y la temperatura en el interior del MEV2 en $12 \text{ }^\circ\text{C}$ mayor a la exterior.

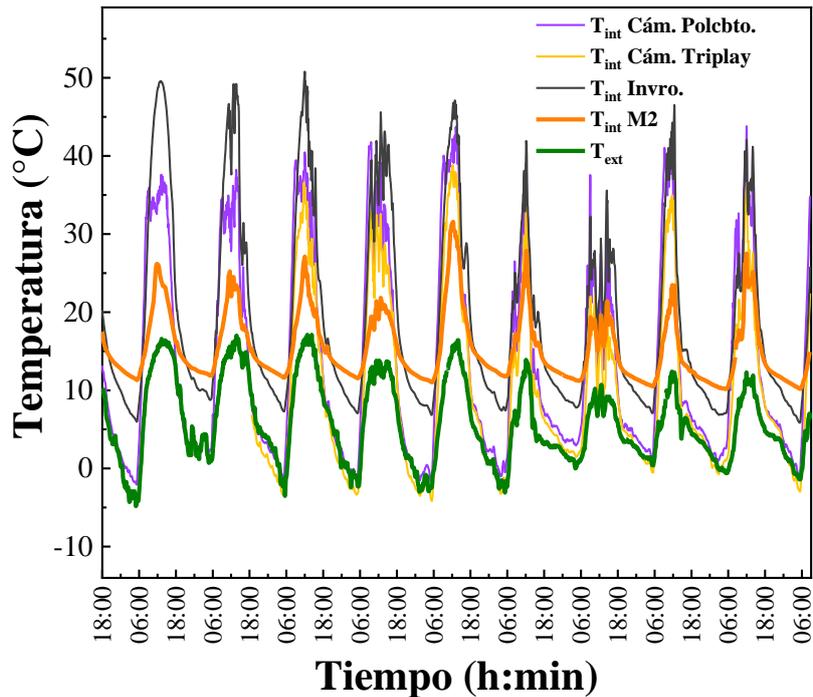
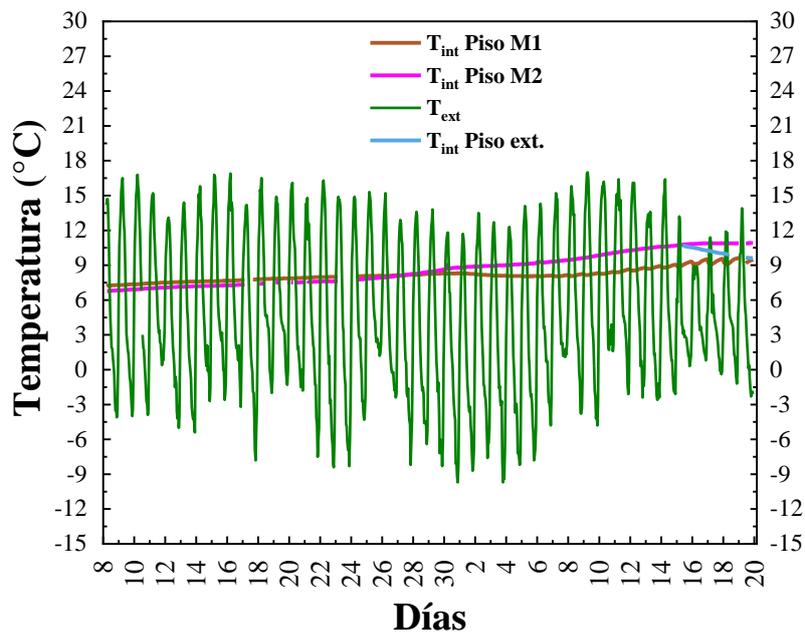


Fig. 71. Comportamiento térmico de las cámaras en el ático del MEV2: temperatura en el interior de la cámara de policarbonato, T_{int} Cám. Polcbto. (línea sólida morada), temperatura en el interior de la cámara de triplay, T_{int} Cám. Triplay (línea sólida amarilla), temperatura en el interior del invernadero, T_{int} Invro. (línea sólida negra), temperatura en el interior del módulo 2, T_{int} M2 (línea sólida anaranjada) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 10 al 18 de diciembre.

Análisis de la temperatura en el subsuelo de los módulos.

Los hoyos se cavaron en el suelo de tierra en el interior de ambos módulos y en el exterior (ver figura 72 a y b), a una profundidad de 65 cm, en el cual se colocó un sensor de temperatura Pt100 por cada módulo y en el exterior, de forma horizontal y cubiertos por la misma tierra retirada al cavar el hueco. En la figura 72c se observa el comportamiento de los sensores ubicados en el subsuelo durante un periodo de registro desde el 8 de noviembre hasta el 19 de diciembre, para la fecha desde el 8 hasta el 20 de noviembre, se tiene el MEV2 sin invernadero, la temperatura en el subsuelo en ambos módulos se mantiene aproximadamente constante entre 6,7 °C a 7,8 °C. En promedio diario horario la temperatura en el subsuelo fue de 7,5 °C para MEV1, 7,1 °C para MEV2, siendo mayor la temperatura del MEV1 en 0,4 °C con respecto a MEV2, con una temperatura promedio diario horario del aire exterior de 5,8 °C. El promedio diario horario de temperatura en el subsuelo de MEV1 es mayor en 1,7 °C con respecto a la temperatura del aire exterior, para el MEV2 es mayor en 1,3 °C. Para la fecha desde el 23 de noviembre hasta el 19 de diciembre ya se tiene el invernadero adosado al MEV2 en su pared con dirección al norte, la temperatura en el subsuelo en ambos módulos se mantiene aproximadamente constante entre 8 °C a 10,8 °C. En promedio diario horario la temperatura en el subsuelo fue de 8,4 °C para MEV1, 9,4 °C para MEV2, siendo mayor la temperatura del MEV2 en 1 °C con respecto a MEV1, con una temperatura promedio diario horario del aire exterior de 4,5 °C. El promedio diario horario de temperatura en el subsuelo de MEV1 es mayor en 3,9

°C con respecto a la temperatura del aire exterior, para el MEV2 es mayor en 4,9 °C. Para el sensor ubicado fuera del módulo con invernadero (figura) se tiene datos solamente de tres días de medición, en promedio fue de 10,3 °C, 10,9 °C para MEV2, 9,2 °C para MEV1, siendo mayor la temperatura del MEV2 en 0,6 °C con respecto a la temperatura en el subsuelo exterior, la temperatura en el exterior fue mayor en 0,9 °C con respecto a MEV1, la temperatura en MEV2 fue mayor en 1,7 °C con respecto a MEV2, con una temperatura promedio diario horario del aire exterior de 4,7 °C.



(c)

Fig. 72. (a) Hoyo cavado en el suelo en el exterior del MEV, (b) sensor de temperatura instalado en el subsuelo del piso en el interior del MEV, y (c) comportamiento térmico de las temperaturas en el subsuelo (a una profundidad de 65cm) de ambos módulos y fuera del módulo, temperatura en el subsuelo del interior del módulo 1, T_{int} Piso M1 (línea sólida marrón) temperatura en el subsuelo del interior del módulo 2, T_{int} Piso M2 (línea sólida rosada), temperatura en el subsuelo exterior al módulo, T_{int} Piso M1 (línea sólida celeste) y temperatura en el exterior (T_{ext}), desde el 08 de noviembre hasta el 20 de diciembre del 2018.

Análisis para las paredes del MEV

En la figura 73 se observa el comportamiento térmico de las temperaturas en la superficie interior y exterior de la pared orientada al este del módulo típico, es decir esta es la primera construcción (ver detalles en la tabla 2).

El promedio horario para el máximo de temperatura en la superficie exterior fue de 26,6 °C, esto ocurrió alrededor de las 10:00 horas, mientras que el promedio horario para el mínimo en la superficie interior fue de 4,7 °C y esto se mantiene desde las 15:00 hasta las 23:00 horas. El promedio horario para el mínimo de temperatura en la superficie exterior fue -3,8 °C de frecuencia a las 6:00 horas, mientras que para la superficie interior fue 2,7 °C y ocurrió entre las 6:00 a 9:00 horas.

El desfase térmico para la pared varía entre las 5:00 a 13:00 horas. La oscilación térmica para la temperatura de la superficie exterior en promedio horario fue de 30,2 °C, mientras que para la superficie interior fue de 1,8 °C.

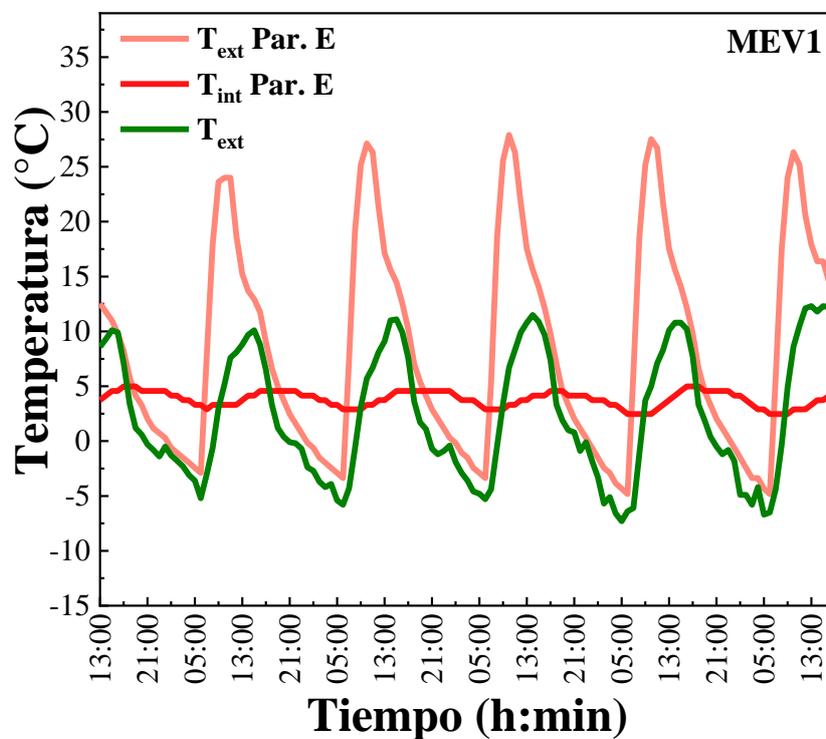


Fig. 73. Temperaturas superficiales en el interior y exterior de la pared del MEV1 orientada hacia el este: temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el Este, T_{ext} Par. E (línea sólida rosada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el Este, T_{int} Par. E (línea roja sólida) y temperatura exterior T_{ext} (línea verde sólida), del 26 al 31 de julio.

La gráfica 74 muestra la temperatura en la superficie exterior de las paredes en dirección hacia el este y sur. La oscilación térmica para la temperatura de la superficie exterior de la pared este, en promedio horario fue de 30,2 °C, mientras que para la pared sur fue de 9,6 °C. Los valores máximos en promedio horario para la temperatura en la superficie exterior de la pared este fue de 26,6 °C, de ocurrencia a las 10:00 horas, mientras que para la pared sur fue de 5,9 °C, con frecuencia entre las 15:00 y 16:00 horas. Los valores mínimos en promedio horario para la temperatura en la superficie exterior de la pared este

fue de 3,8 °C, con frecuencia a las 6:00 horas, en cambio, para la pared sur el mínimo fue de -3,7 °C, de ocurrencia entre las 5:00 y 6:00 horas.

La diferencia en valores de las oscilaciones térmicas es debida a que la pared del este recibe la radiación solar más que la pared del sur, ya que para estas fechas el Sol está orientado más en la dirección del norte y la exposición es menor para la pared sur del módulo y es más para el este, a esto se suma la sombra que le produce el alero a la pared.

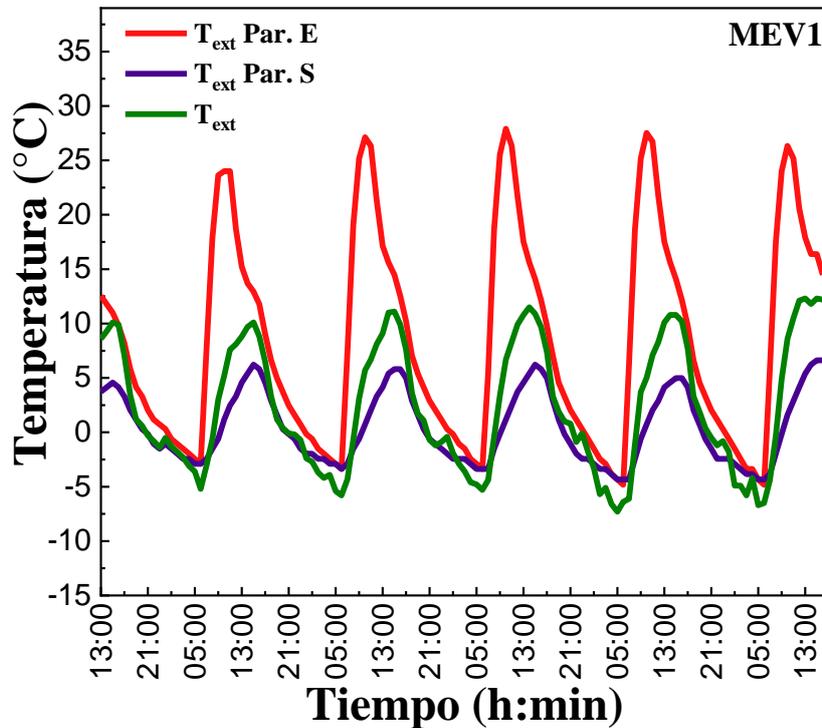


Fig. 74. Temperaturas superficiales en el exterior de las paredes del MEV1: temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este T_{ext} Par. E (línea sólida roja), temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el Sur T_{ext} Par. S (línea sólida morada) y temperatura exterior T_{ext} (línea verde sólida), del 26 al 31 de julio.

MEV1

En la figura se muestra los valores de temperatura en la superficie interior de las paredes del MEV1.

El promedio horario diario de valores de temperatura en la superficie interior de las paredes fue 7,4 °C, 7,3 °C, 7,4 °C y 7,3 °C para las paredes en dirección norte, este, sur y oeste respectivamente, con una temperatura promedio horario del aire exterior de 4,9 °C, estos promedios fueron tomados para los días del 2 al 12 de diciembre. La tabla 8 muestra los valores de las oscilaciones térmicas por día, desde el 2 al 12 de diciembre, así como el promedio para las oscilaciones térmicas de cada pared durante los días de medición 2,6 °C, 2,6 °C, 2,6 °C y 2,3 °C para las paredes con orientación norte, este, sur y oeste respectivamente. Siendo el menor valor en promedio de oscilaciones térmicas para la pared orientada al oeste.

Tabla 8. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes.

Fechas	Norte	Este	Sur	Oeste
2	2,5	2,5	2,9	2,5
3	2,9	2,5	2,5	2,5
4	2,5	2,5	2,5	2,1
5	2,9	2,9	2,9	2,9
6	2,5	2,5	2,5	2,1
7	3,2	2,8	2,8	2,4
8	2,8	2,8	2,8	2,4
9	2,8	2,8	2,4	2,4
10	2,4	2,8	2,4	2,4
11	2,4	2	2,4	2
12	2,4	2,4	2,4	2
Promedio	2,6	2,6	2,6	2,3

En la gráfica 75 se muestra el comportamiento de las temperaturas en la superficie interior de las paredes, se observa un claro incremento de los valores a partir de día 7 hasta el 12 de diciembre, tanto en los mínimos y los máximos. El promedio horario para los máximos de temperatura en la superficie interior fue de 8,9 °C, de ocurrencia entre las 13:00 y 15:00 horas, mientras que el promedio para los mínimos fue de 5,9 °C, de frecuencia entre las 5:00 y 7:00 horas.

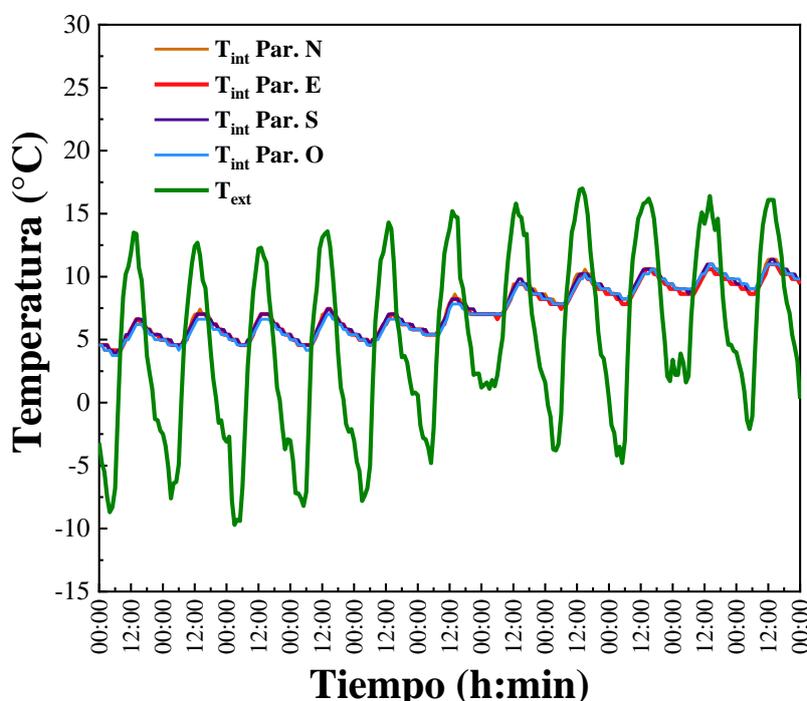


Fig. 75. Temperaturas superficiales en el interior de las paredes del MEV1: temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el norte T_{int} Par. N (línea sólida anaranjada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este T_{int} Par. E (línea sólida roja), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia

el sur $T_{\text{int Par. S}}$ (línea sólida morada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el oeste $T_{\text{int Par. N}}$ (línea sólida celeste) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 2 al 12 de diciembre.

El promedio horario diario de valores de temperatura en la superficie exterior de las paredes fue 4,5 °C, 5,3 °C, 5,8 °C y 5 °C para las paredes en dirección norte, este, sur y oeste respectivamente, con una temperatura promedio horario del aire exterior de 4,9 °C, estos promedios fueron tomados para los días del 2 al 12 de diciembre. En la tabla 9 se indican los valores de las oscilaciones por día, desde el 2 hasta el 12 de diciembre, y el promedio para cada pared durante los días de medición, los cuales fueron 12,2 °C, 11,9 °C, 11,6 °C y 14,4 °C para las paredes con orientación norte, este, sur y oeste respectivamente.

Tabla 9. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes.

Fechas	Norte	Este	Sur	Oeste
2	13,9	14	13,2	15
3	12,5	12,8	11,7	13,8
4	13,6	13,9	12,8	15,8
5	14,1	13,8	13,3	16,3
6	14	14,3	13,2	13,9
7	12,4	11,4	11,5	14,9
8	9,2	8,7	8,4	10,7
9	12,3	11,5	11,9	16,3
10	12,1	10,9	11,1	17,2
11	9,8	8,8	9,4	12,4
12	10,8	10,8	10,8	12,5
Promedio	12,2	11,9	11,6	14,4

En la figura 76 se muestra el comportamiento de las temperaturas promedio horarias en la superficie exterior de las paredes en las cuatro direcciones Este, Sur, Norte y Oeste. Se observa un claro incremento de los valores a partir de día 7 hasta el 12 de diciembre.

El promedio horario para el máximo de temperatura en la superficie exterior fue de 13,3 °C, de ocurrencia entre las 13:00 y 16:00 horas, mientras que el promedio horario para el mínimo fue de -1,3 °C y esto se da entre las 5:00 y 6:00 horas. Al igual que los valores de temperatura en la superficie interior de las paredes, en este caso también se muestra el efecto del incremento de los valores desde el 7 al 12 de diciembre, tanto en los mínimos como en los máximos. Los valores de temperatura de la pared del oeste presentan los mayores valores en los picos de los máximos.

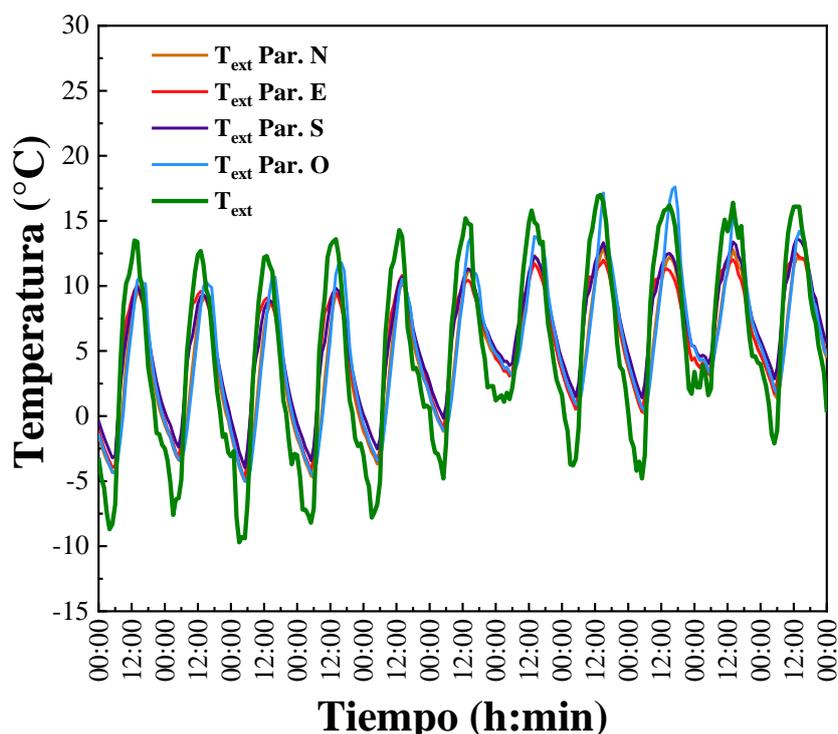


Fig. 76. Temperaturas superficiales en el exterior de las paredes del MEV1: temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el norte T_{ext} Par. N (línea sólida anaranjada), temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el este T_{ext} Par. E (línea sólida roja), temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el sur T_{ext} Par. S (línea morada sólida), temperatura en la superficie exterior de la pared orientada hacia el oeste T_{ext} Par. N (línea sólida celeste) y temperatura exterior T_{ext} (línea verde sólida), del 2 al 12 de diciembre.

MEV2

Las tablas muestran los valores para las oscilaciones térmicas por día, desde el 2 hasta el 12 de diciembre, de acuerdo a las diferentes configuraciones de puerta y ventana comunes al MEV y el invernadero (ver tabla).

En la tabla 10 se indican los valores de las oscilaciones por día, del 2 al 4 de diciembre, el promedio para cada pared durante los días de medición fueron 2,5 °C, 2,7 °C, 2,1 °C y 2,6 °C para las paredes con orientación este, sur, oeste y norte respectivamente. Siendo el menor y mayor valor para las paredes orientadas al oeste y sur respectivamente. La configuración de puerta y ventana comunes al módulo y el invernadero se mantuvieron ambas cerradas todo el día.

Tabla 10. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes, para los días del 2 al 4 de diciembre.

Fechas	Este	Sur	Oeste	Norte
2	2,8	2,4	2	2,3
3	2,4	2,8	2,4	2,7
4	2,4	2,8	2	2,7
Promedio	2,5	2,7	2,1	2,6

En la tabla 11 se indican los valores de las oscilaciones por día, del 5 al 6 de diciembre, el promedio para cada pared durante los días de medición fueron 4,5 °C, 3,9 °C, 3,4 °C y 3,9 °C para las paredes con orientación este, sur, oeste y norte respectivamente. Siendo el menor y mayor valor para las paredes orientadas al oeste y este respectivamente. La puerta y ventana se mantuvieron abiertas en el horario de 8:00 a 16:00 horas.

Tabla 11. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes, para los días del 5 al 6 de diciembre.

Fechas	Este	Sur	Oeste	Norte
5	5,1	4,3	4	4,7
6	3,9	3,5	2,8	3,1
Promedio	4,5	3,9	3,4	3,9

En la tabla 12 se indican los valores de las oscilaciones por día, del 7 al 9 de diciembre, el promedio para cada pared durante los días de medición fueron 4 °C, 4 °C, 3,2 °C y 3,7 °C para las paredes con orientación este, sur, oeste y norte respectivamente. Siendo el menor y mayor valor para las paredes orientadas al oeste, y este o sur respectivamente. La ventana se mantuvo cerrada y la puerta abierta en el horario de 8:00 a 16:00 horas.

Tabla 12. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes, para los días del 7 al 9 de diciembre.

Fechas	Este	Sur	Oeste	Norte
7	3,9	4,3	3,1	3,9
8	3,9	3,9	3,5	3,5
9	4,2	3,9	3,1	3,8
Promedio	4	4	3,2	3,7

En la tabla 13 se indican los valores de las oscilaciones por día, del 5 al 6 de diciembre, el promedio para cada pared durante los días de medición fueron 2,4 °C, 2,4 °C, 1,8 °C y 2,2 °C para las paredes con orientación este, sur, oeste y norte respectivamente. Siendo el menor y mayor valor para las paredes orientadas al oeste, y este o sur respectivamente. La puerta se mantuvo cerrada y la ventana abierta de 8:00 a 16:00 horas.

Tabla 13. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie interior de las paredes, para los días del 10 al 12 de diciembre.

Fechas	Este	Sur	Oeste	Norte
10	2,7	2,7	1,6	2,3
11	2,3	2,3	1,9	1,9
12	2,3	2,3	1,9	2,3
Promedio	2,4	2,4	1,8	2,2

En la gráfica 77 se muestra el comportamiento de las temperaturas en la superficie interior de las paredes, donde es notorio el incremento de temperatura en la pared orientada hacia el norte, desde el 2 hasta el 12 de diciembre. El promedio horario para los máximos de temperatura en la superficie interior de la pared norte fue de 14,7 °C, de ocurrencia entre

las 14:00 y 16:00 horas, mientras que el promedio para los mínimos fue de 11,7 °C, de frecuencia entre las 4:00 y 8:00 horas. El promedio horario para los máximos de temperatura en la superficie interior de las otras paredes fue de 12,7 °C, de ocurrencia entre las 14:00 y 16:00 horas, mientras que para el mínimo fue de 9,2 °C, de frecuencia entre las 4:00 y 8:00 horas.

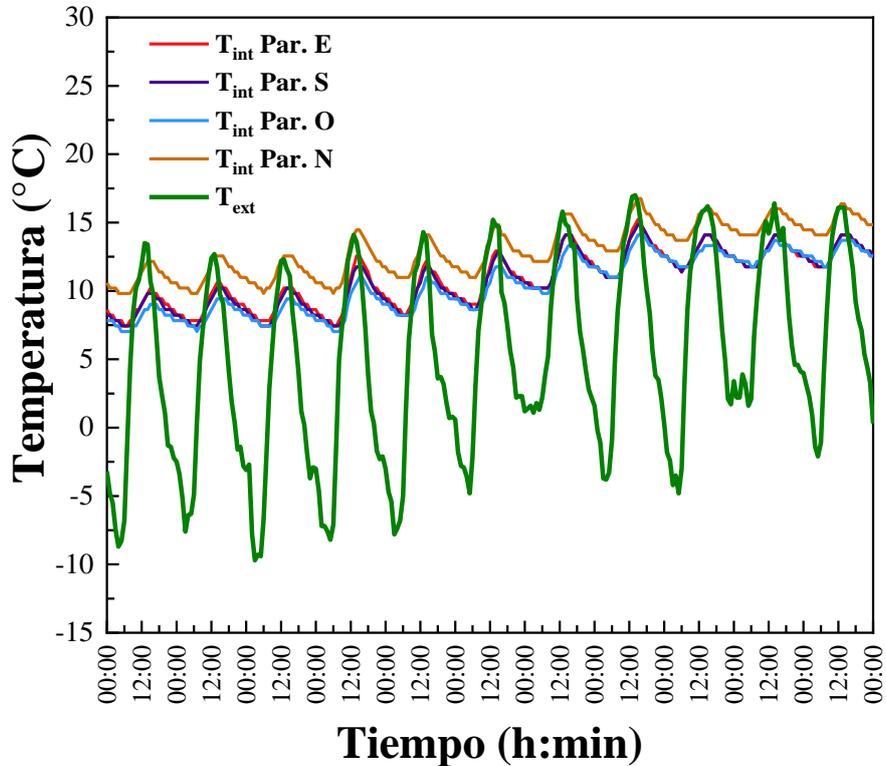


Fig. 77. Temperaturas superficiales en el interior de las paredes del MEV2: temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este, T_{int} Par. E (línea sólida roja), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el sur T_{int} Par. S (línea sólida morada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el oeste, T_{int} Par. O (línea sólida celeste), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el norte, T_{int} Par. N (línea marrón sólida) y temperatura exterior T_{ext} (línea verde sólida), del 2 al 12 de diciembre.

En la tabla 14 se presentan los valores de las oscilaciones por día, del 2 al 4 de diciembre, el promedio para cada pared durante los días de medición fueron 14 °C, 12,2 °C, 11,1 °C y 12,9 °C para las paredes con orientación este, sur, oeste y norte respectivamente. Siendo el menor y mayor valor para las paredes orientadas al oeste y este respectivamente. La configuración de puerta y ventana comunes al módulo y el invernadero se mantuvieron ambas cerradas todo el día.

Tabla 14. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes, para los días del 2 al 4 de diciembre.

Fechas	Este	Sur	Oeste	Norte
2	14,4	12,6	10,9	12,8
3	13	11,3	10,5	12,3
4	14,6	12,8	11,9	13,5
Promedio	14	12,2	11,1	12,9

En la tabla 15 se indican los valores de las oscilaciones por día, del 5 al 6 de diciembre, el promedio para cada pared durante los días de medición fueron 14,5 °C, 12,7 °C, 13,1 °C y 10 °C para las paredes con orientación este, sur, oeste y norte respectivamente. Siendo el menor y mayor valor para las paredes orientadas al norte y este respectivamente. La puerta y ventana se mantuvieron abiertas en el horario de 8:00 a 16:00 horas.

Tabla 15. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes, para los días del 5 al 6 de diciembre.

Fechas	Este	Sur	Oeste	Norte
5	14,1	12,7	12,6	12
6	14,8	12,6	13,5	8,1
Promedio	14,5	12,7	13,1	10

En la tabla 16 se indican los valores de las oscilaciones por día, del 7 al 9 de diciembre, el promedio para cada pared durante los días de medición fueron 10,3 °C, 10,3 °C, 10,1 °C y 12 °C para las paredes con orientación este, sur, oeste y norte respectivamente. Siendo el menor y mayor valor para las paredes orientadas al oeste y norte respectivamente. La ventana se mantuvo cerrada y la puerta abierta en el horario de 8:00 a 16:00 horas.

Tabla 16. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes, para los días del 7 al 9 de diciembre.

Fechas	Este	Sur	Oeste	Norte
7	11,6	11,4	11	13,8
8	8,4	7,9	7,9	10,3
9	11	11,6	11,5	11,9
Promedio	10,3	10,3	10,1	12

En la tabla 17 se indican los valores de las oscilaciones por día, del 10 al 12 de diciembre, el promedio para cada pared durante los días de medición fueron 10,1 °C, 10,1 °C, 9,6 °C y 11,3 °C para las paredes con orientación este, sur, oeste y norte respectivamente. Siendo el menor y mayor valor para las paredes orientadas al oeste, y norte respectivamente. La puerta se mantuvo cerrada y la ventana abierta de 8:00 a 16:00 horas.

Tabla 17. Oscilaciones térmicas para la temperatura en la superficie exterior de las paredes, para los días del 10 al 12 de diciembre.

Fechas	Este	Sur	Oeste	Norte
10	11	10,9	13,1	12,6
11	8,4	9,1	9,1	10,7
12	10,9	10,4	6,7	10,7
Promedio	10,1	10,1	9,6	11,3

El promedio horario para el máximo de temperatura en la superficie exterior fue de 13,3 °C, de ocurrencia entre las 13:00 y 16:00 horas, mientras que el promedio horario para el mínimo fue de -1,3 °C y esto se da entre las 5:00 y 6:00 horas. Al igual que los valores

de temperatura en la superficie interior de las paredes, en este caso también se muestra el efecto del incremento de los valores desde el 7 al 12 de diciembre, tanto en los mínimos como en los máximos.

En la gráfica 78 se muestra el comportamiento de las temperaturas en la superficie exterior de las paredes, al igual que los valores de temperatura en la superficie interior de la pared orientada al norte, es notorio el incremento de temperatura en dicha pared, desde el 2 hasta el 12 de diciembre. El promedio horario para los máximos de temperatura en la superficie exterior de la pared norte fue de 19,7 °C, de ocurrencia entre las 14:00 y 15:00 horas, mientras que el promedio para los mínimos fue de 9,8 °C, de frecuencia entre las 5:00 y 6:00 horas. El promedio horario para los máximos de temperatura en la superficie exterior de las otras paredes fue de 12,7 °C, de ocurrencia entre las 14:00 y 15:00 horas, mientras que para el mínimo fue de -0,6 °C, de frecuencia entre las 5:00 y 6:00 horas.

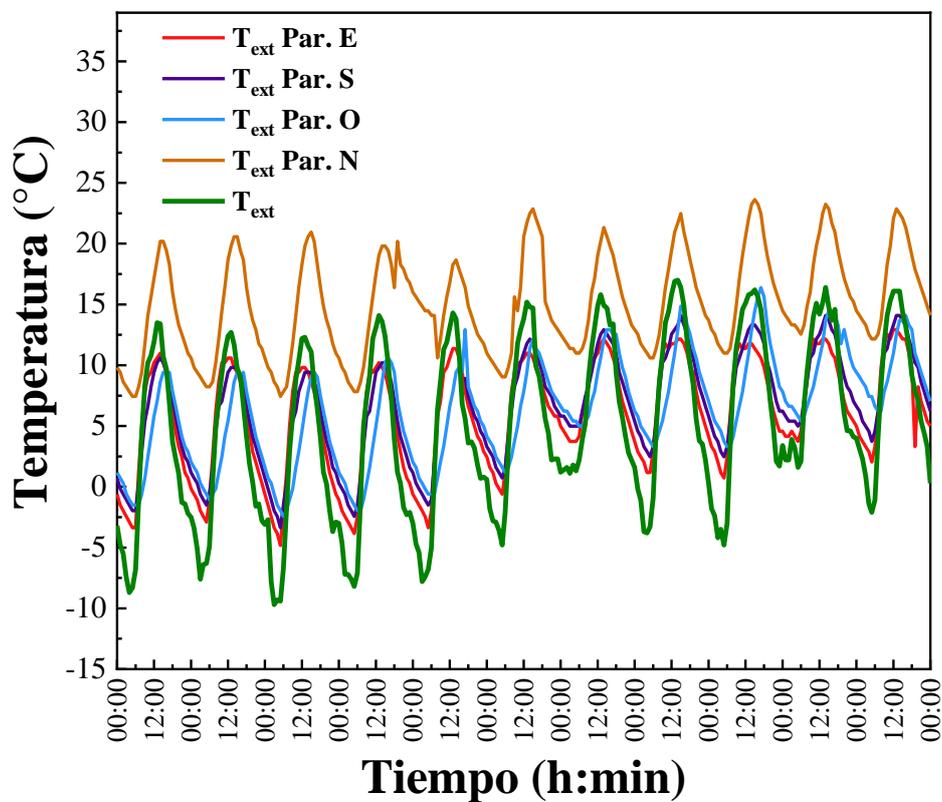


Fig. 78. Temperaturas superficiales en el interior de las paredes del MEV2: temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el este, $T_{\text{int Par. E}}$ (línea sólida roja), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el sur, $T_{\text{int Par. S}}$ (línea sólida morada), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el oeste, $T_{\text{int Par. O}}$ (línea sólida celeste), temperatura en la superficie interior de la pared orientada hacia el norte, $T_{\text{int Par. N}}$ (línea sólida marrón) y temperatura exterior T_{ext} (línea sólida verde), del 2 al 12 de diciembre.

7.2 Análisis energético de las diferentes configuraciones en las envolventes de los MEVs.

Los resultados para la estimación de la demanda de energía de calefacción según las diferentes modificaciones sucesivas realizadas en las envolventes de los módulos experimentales, de acuerdo con las diferentes fechas, y teniendo en cuenta mantener una temperatura constante de 15 °C, según modelo adaptativo de Humphreys y Nicol. Dicho valor se obtuvo a partir de los datos de temperatura del SENAMHI, de los cuales se calculó la temperatura promedio anual de 2,8 °C, y luego la temperatura neutra (T_n) de bienestar térmico, según la ecuación (1).

En la tabla 18 se muestran los datos calculados por el programa de simulaciones *EnergyPlus* para la energía de calefacción requerida de acuerdo a las diferentes modificaciones en las envolventes de los MEVs, en períodos de tiempo cuyas fechas se muestran en la tabla 5 y tabla 6. En la fecha inicial del 26 al 31 de julio, la energía requerida de calefacción para el módulo típico fue de 38,7 kWh·día⁻¹ para mantener a una temperatura constante de 15 °C, para la segunda configuración desde el 7 al 14 de agosto, con cambio en el techado con planchas de fibrocemento y la inclusión de claraboya en el MEV2, se obtuvo que la energía requerida fue de 85 kWh·día⁻¹ para el MEV2 y de 48,5 kWh·día⁻¹ para el MEV1, siendo mayor la EMEV1 en 36,5 kWh·día⁻¹ sobre la EMEV2, esto es debido a que en el día aumentó la temperatura en el interior del ambiente en los máximos, pero en las noches el comportamiento térmico del MEV2 tuvo valores de temperatura por debajo del MEV1 por varias horas, para la configuración con el yeso enlucido en la pared de adobe y cambio en el techado con fibrocemento y claraboyas en el MEV1, en la fecha del 23 al 31 de agosto, el MEV1 requirió de 69 kWh·día⁻¹ de energía en comparación con el MEV2 que fue de 45,2 kWh·día⁻¹, siendo mayor la EMEV1 en 23,8 kWh·día⁻¹, es decir que requiere mayor energía para elevar la temperatura del ambiente interior, esto es debido al enlucido de yeso en las paredes del MEV1 y el efecto de la humedad en la noche hace que se tenga valores de temperatura menores al MEV2, ya que para esta fecha todavía no secaba el yeso. Desde el 14 al 22 de setiembre se tiene la configuración del falso techo y separación de las cámaras en el ático para el MEV1, la energía requerida de calefacción fue de 41,1 kWh·día⁻¹ y para el MEV2 fue de 32,2 kWh·día⁻¹, siendo mayor la EMEV1 en 8,8 kWh·día⁻¹, para la configuración con poliestireno expandido usado para aislar el falso techo en el MEV1, desde el 31 de octubre hasta el 03 de noviembre, se coloca sobre el falso techo de triplay del MEV1 poliestireno expandido para su aislamiento térmico, pero en el MEV2 no, y se obtuvo una diferencia de 7,9 kWh·día⁻¹ mayor del EMEV2 sobre el EMEV1, esto fue debido al aporte térmico del poliestireno expandido sobre la base de triplay del falso techo en las cámaras laterales. En los primeros días de diciembre del 2 al 4 se tiene el invernadero adosado al MEV2, y una configuración de puerta y ventana que comunican el interior del módulo y el invernadero, se mantienen cerradas, el MEV1 obtuvo una demanda de 14,5 kWh·día⁻¹ y el MEV2 fue de 10,4 kWh·día⁻¹, del 5 al 6 de diciembre con la configuración de ventana y puerta abiertas de 8:00 a 16:00 horas, en el MEV2, la energía que se obtuvo fue de 14,2 kWh·día⁻¹ para MEV1 y del MEV2 fue de 10,2 kWh·día⁻¹, del 7 al 9 de diciembre, con una configuración de puerta abierta de 8:00 a 16:00 horas y ventana cerrada todo el día, se obtuvo que la EMEV1 fue de 11,5 kWh·día⁻¹ y la EMEV2 fue de 8,2 kWh·día⁻¹, del 10 al 12 de diciembre se mantuvo la puerta cerrada y la ventana abierta en el horario de 8:00 a 16:00 horas, obteniéndose la EMEV1

de $8,9 \text{ kWh}\cdot\text{día}^{-1}$ y la EMEV2 de $7,2 \text{ kWh}\cdot\text{día}^{-1}$, en todos los casos en el mes de diciembre los valores de energía requerida de calefacción fueron menores para el MEV2 en comparación con el MEV1.

Tabla 18. Valores de la demanda energética de calefacción para los MEVs.

Periodo de tiempo	EMEV1 (kWh·día⁻¹)	EMEV2 (kWh·día⁻¹)
26 – 31 jul.	38,7	--
7 – 14 ago.	48,5	85
23 – 31 ago.	69	45,2
14 – 22 set.	41,1	32,3
31 oct. - 03 nov.	13,5	21,4
2 – 4 dic.	14,5	10,4
5 – 6 dic.	14,2	10,2
7 – 9 dic.	11,5	8,2
10 – 12 dic	9,5	7,2

VIII. CONCLUSIONES

Se evaluó experimentalmente y por simulaciones energéticas, el comportamiento térmico de dos MEVs, ubicados en Imata a 4 519 msnm, a los cuales se les realizaron cambios secuenciales en sus envolventes por medio de diferentes técnicas de aislamiento térmico y captación pasiva de energía solar.

El diseño de la instrumentación en los MEVs, para la toma de datos de temperatura y humedad, permitió registrar satisfactoriamente el comportamiento térmico de ambos MEVs durante todo el proceso de cambio de sus envolventes (aislamiento de las paredes, cambio en el techo, instalación de claraboyas y falso techo e instalación de invernadero).

Los MEVs construidos inicialmente con características típicas de la zona (techo a dos aguas de planchas de calamina metálica, paredes de adobe, puerta metálica, y ventana con marco de metal y vidrio simple), condición a la que se denominó “módulo típico”. En esa condición los MEVs registraron una diferencia entre las temperaturas promedio al interior y al exterior de ~ 5 °C, durante las horas donde se dan los mínimos de temperatura al día (5:00 a 6:00 am).

Mediante el uso de técnicas de aislamiento térmico y sistemas de captación pasiva de energía, a través de claraboyas o invernaderos, se obtuvieron incrementos de temperatura, del aire interior del ambiente de los MEVs, de valores de 6,8 °C para el MEV1 y de 11,5 °C para MEV2, con respecto al módulo típico, para valores de irradiación solar promedio diario de $6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$. Por ello se concluye que un invernadero adosado a una vivienda es una técnica eficiente, económica y sostenible para contribuir con la energización térmica de las viviendas expuestas a temperaturas extremadamente bajas en las zonas Altoandinas del Perú.

En la configuración del MEV2, que contó con el invernadero, es indispensable hacer un uso adecuado (regular y cotidiano) de los vanos donde se ubican la puerta y la ventana, para optimizar el aporte energético del invernadero al interior del MEV2. Así, la configuración de uso de puerta y ventana que presentó un mayor ahorro energético en la demanda de calefacción para alcanzar al interior una temperatura de 15 °C, fue cuando la puerta y la ventana se mantuvieron abiertas de 8:00 a 16:00 horas, requiriéndose $10,2 \text{ kWh}\cdot\text{día}^{-1}$, mientras para el MEV1 la demanda energética fue de $14,2 \text{ kWh}\cdot\text{día}^{-1}$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SENAMHI-FAO, “Atlas de heladas del Perú: Convenio de Cooperación Técnica Interinstitucional Senamhi - FAO (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y alimentación), Lima - Perú.” 2010.
- [2] Presidencia del Consejo de Ministros, “Plan Multisectorial Ante Heladas Y Friaaje 2019 - 2021,” *Decreto Supremo N° 015*, pp. 1–135, 2019, [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/pcm/campañas/56-plan-multisectorial-ante-heladas-y-friaaje-2019-2021>.
- [3] SENAMHI, *Atlas Solar - Proyecto PER/98/G31: Electrificación rural a base de energía fotovoltaica en el Perú*. Lima, 2003.
- [4] L. India, “Energy and climate change in cold regions of Asia,” 2009.
- [5] “EnergyPlus,” 2021. <https://energyplus.net/>.
- [6] R. L. Espinoza Paredes, “Evaluación experimental de la performance de dos componentes bioclimáticas de calentamiento aplicadas en un módulo de vivienda de San Francisco de Raymina - Ayacucho con el propósito de validarlas como técnicas de estrategias bioclimáticas para viviendas ,” Universidad Nacional de Ingeniería, 2014.
- [7] J. R. Molina Castillo, “Evaluación bioclimática de una vivienda rural Altoandina de la comunidad de San Francisco de Raymina de Ayacucho,” Universidad Nacional de Ingeniería, 2016.
- [8] J. O. Molina Fuertes, “Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda Altoandina para lograr el confort térmico con energía solar,” Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- [9] G. A. Abanto, M. Karkri, G. Lefebvre, M. Horn, J. L. Solis, and M. M. Gómez, “Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 6, pp. 177–191, 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.02.001.
- [10] MVCS, “EM. 110 Confort térmico y lumínico con eficiencia energética,” *El Peru.*, vol. 1, p. 50, 2014, [Online]. Available: <http://www.construccion.org/normas/rne2012/rne2006.htm>.
- [11] “Elements | Big Ladder Software.” <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>.
- [12] J. O. Molina, G. Lefebvre, M. Horn, and M. M. Gómez, “Design of an experimental bioclimatic module obtained from the analysis of thermal simulations for the community of Imata (4519 m A.S.L.), located in Arequipa, Perú,” *Inf. Tecnol.*, vol. 31, no. 2, pp. 173–185, 2020, doi: 10.4067/S0718-07642020000200173.
- [13] SOLCAST, “Histórico y TMY - Datos y especificaciones,” 2021. <https://solcast.com/>.
- [14] SENAMHI, “Datos Hidrometeorológicos,” 2020. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>.

- [15] A. D. González, “Estudio de la temperatura en un invernadero adosado con orientación norte en la patagonia andina,” vol. 16, pp. 35–42, 2012.
- [16] F. A. Huaylla Roque, “Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda Altoandina del Perú,” Universidad Nacional de Ingeniería, 2010.
- [17] L. Harman, “Confort térmico en viviendas Altoandinas... un enfoque integral,” *Care, Perú*, p. 28, 2010, [Online]. Available: <https://www.congreso.gob.pe/>.
- [18] R. Prieto Sánchez, J. Quispe Cárdenas, and G. Orezza Alvarez, “Soluciones constructivas para elevar la tempertuara interior en viviendas rurales ubicadas en zonas Altoandinas,” *Minist. Vivienda Construcción y Saneam.*, p. 27, 2013, [Online]. Available: <https://www.gob.pe/vivienda>.
- [19] A. Flores Condori, “Simulación del desempeño térmico en viviendas Altoandinas sostenibles con climatización pasiva en la provincia de ‘El Collao’, 2016,” Universidad Nacional del Altiplano, 2018.
- [20] Senamhi, “Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030: Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático.,” *Resum. técnico. Serv. Nac. Meteorol. e Hidrol. (SENAMHI)*, Lima, p. 26 pp., 2009, [Online]. Available: https://www.senamhi.gob.pe/usr/cmn/pdf/Resumen_Nacional.pdf.
- [21] B. D. Romero Verástergui, “Propuesta metodológica para evaluar la eficiencia energética de edificaciones. Estudio caso: Laboratorio de Microbiología y Biotecnología – Unalm,” Universidad Nacional Agraria la Molina, 2016.
- [22] D. G. M. Rayter Arnao, “Guía de aplicación de arquitectura bioclimática en locales educativos,” *Minist. Educ. Viceministerio Gestión Inst.*, p. 114, 2008, [Online]. Available: [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A45F1BED1AB7C6705257CCA00550ABD/\\$FILE/GuiaBioclimática2008.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A45F1BED1AB7C6705257CCA00550ABD/$FILE/GuiaBioclimática2008.pdf).
- [23] R. Ejecutivo, “Climas del Perú,” 2020, [Online]. Available: https://idesepe.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/api/records/9f18b911-64af-4e6b-bbef-272bb20195e4/attachments/Resumen_ejecutivo_Climas_del_Peru.pdf.
- [24] B. Uta and D. Adison, “Las regiones Geográficas del Perú, clasificación y teorías diversas,” 2019.
- [25] D. J. Marchena, “Acondicionamiento térmico de las viviendas utilizando energía solar pasiva para los caseríos de Cuispes-Bongara-Amazonas,” 2018, [Online]. Available: <http://tesis.usat.edu.pe/handle/usat/1676>.
- [26] M. M. Gómez, R. Espinoza, and M. Horn, *Guía hacia un futuro energético sustentable para las Américas*. México, 2016.
- [27] *Solargis*, “Mapas de recursos solares y datos GIS para más de 180 países,” 2021. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/world>.
- [28] A. Godoy Muñoz, “El confort térmico adaptativo, aplicación en la edificación en España,” Cataluña, 2012.
- [29] “ISO - ISO 7730:1994 - Moderate thermal environments — Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.”

<https://www.iso.org/standard/14567.html>.

- [30] N. Djongyang, R. Tchinda, and D. Njomo, “Thermal comfort: A review paper,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9. Elsevier Ltd, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.040.
- [31] H. Critchfield, “Climate and human”, *General CLimatology*, Prentice-H. 1974.
- [32] E. S. Han and A. goleman, daniel; boyatzis, Richard; Mckee, “Abrigando hogares,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [33] J. . Molina, “Uso del programa Energyplus para la simulación del consumo energético de un módulo bioclimático ubicado en Imata, Arequipa a 4519 msnm,” Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.
- [34] “Capítulo 5. Zona Variable de Confort Térmico, Modelo propuesto. La habitación del artista en Arles, Vicent Van Gogh.,” 2016. [Online]. Available: <https://docplayer.es/18457471-Capitulo-5-zona-variable-de-confort-termico-modelo-propuesto-la-habitacion-del-artista-en-arles-vincent-van-gogh.html>.
- [35] J. O. Molina Fuertes, “Juan Omar Molina Fuertes,” 2019. <http://alternativarenovable.blogspot.com/>.
- [36] G. Gómez-Azpeitia, G. B. Morales, and R. P. R. Torres, “El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados/*Thermal comfort: two confronted theoretical focuses*,” *Palapa*, vol. 2, no. 1, pp. 45–57, 2007, [Online]. Available: <http://revistasacademicas.ucol.mx/index.php/palapa/article/view/43>.
- [37] “Tema 3. Arquitectura bioclimática,” 2013. [Online]. Available: <http://eadic.com/wp-content/uploads/2013/09/Tema-3-Confort-Ambiental.pdf>.
- [38] L. Groat and D. Wang, *Architectural research methods*, Jhon Wiley. New York, 2002.
- [39] J. C. Martínez Rincón and V. Fuentes, “Estimación del Confort Térmico a partir de la Cconfrontación de sus dos Enfoques de Estudio Caso Aplicado,” *Estud. Arqit. bioclimática*, vol. XII, no. April 2020, pp. 1–86, 2016, [Online]. Available: <https://books.google.cl/books?id=IIE-AQAACAAJ>.
- [40] I. Marincic, J. M. Ochoa, and J. A. Del Río, “Confort térmico adaptativo dependiente de la temperatura y la humedad,” *Archit. City Environ.*, vol. 7, no. 20, pp. 26–46, 2012, doi: 10.5821/ace.v7i20.2572.
- [41] J. Molina Fuertes and M. M. Horn, “Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda Altoandina para lograr el confort térmico con energía solar,” *Univ. Nac. Ing.*, no. December, 2016, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/311900214>.
- [42] R. Espinoza, J. Molina, M. Horn, and M. M. Gómez, “Conceptos bioclimáticos y su aplicabilidad a la zona rural altoandina: caso comunidad San Francisco de Raymina (SFR)-Ayacucho,” *Tecnia*, vol. 25, no. 2, pp. 5–12, 2015, [Online]. Available: <http://revistas.uni.edu.pe/ojs/index.php/tecnia/article/download/45/68>.
- [43] S. Rodriguez *et al.*, “Manual del promotor técnico para la construcción de la vivienda Altoandina segura y saludable,” *Programa de transferencia tecnológica para la inclusión social - CONCYTEC*, 2016.

https://issuu.com/centrotierra/docs/1._manual_del_promotor_tecnico.

- [44] S. Larrain, S. Onnis, M. Wieser, and J. Vargas, “Vivienda Altoandina con confort térmico y sismo resistencia,” *“Viviendas y Esc. climáticamente Acond. ante heladas y friaje,”* pp. 1–6, 2019, [Online]. Available: <https://investigacion.minam.gob.pe/observatorio/>.
- [45] C. y S. Ministerio de Vivienda, “Esto es lo que debes saber sobre las viviendas bioclimáticas Sumaq Wasi,” 2020. <https://fb.watch/7NDEIaCyMf/>.
- [46] J. R. Molina, C.-J. Pe, and R. E. Paredes, “Análisis De Operatividad De Una Vivienda Bioclimática Altoandina,” *XXII Simp. Peru. Energía Sol. y del Ambient.*, no. 11, pp. 17–21, 2015, [Online]. Available: <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2016/07/Analisis-de-Operatividad-de-una-Vivienda-II-Jessica-Molina.pdf>.
- [47] M. Wieser, S. Rodríguez-Larraín, and S. Onnis, “Estrategias bioclimáticas para clima frío tropical de altura. Validación de prototipo de vivienda. Puno, Perú.,” *Estoa*, vol. 10, no. 19, pp. 9–19, 2021, doi: 10.18537/est.v010.n019.a01.
- [48] A. Miralles, C. Schilder, and G. Solórzano, *Manual para la mejora del confort térmico de la vivienda Altoandina*. Lima, 2015.
- [49] M. Ponce Gonzales, J. Molina Fuertes, M. Horn Mutschler, and M. Gómez León, “Evaluación térmica de modificaciones en las envolventes de módulos experimentales ubicados en el centro poblado de Imata (4519 msnm), Arequipa,” *Tecnia*, vol. 21, no. 1, 2021, doi: 10.21754/tecnica.v21i1.1106.
- [50] K. Pena Gayo, “Diseño bioclimático en Galicia: ahorro energético y confort,” *Escola Superior Gallaecia*, 2016.
- [51] P. Zanabria Pacheco, “Invernaderos sostenibles para la producción de hortalizas en zonas Altoandinas del Cusco,” *Universidad de Piura*, 2015.
- [52] F. M. Consuegra, “Sistemas de ganancia aislada: Invernaderos adosados,” 2008. [Online]. Available: <https://arquieficiencia.wordpress.com/>.
- [53] J. J. Estrada, ““Guía para la construcción de invernaderos o fitotoldos”, FAO,” *Bolivia*, 2012.
- [54] R. Céspedes Flores, “Universidad Andina Del Cusco,” p. 192, 2014.
- [55] A. Novoa and M. Horn, “Matriz energética en el Perú y energías renovables,” no. 511, p. 45, 2010, [Online]. Available: <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/peru/07880.pdf>.
- [56] J. D. Auccatinco and A. S. Torcello, “Guía de construcción y manejo de invernaderos para la producción de hortalizas y frutas en zonas Altoandinas,” p. 68, 2016, [Online]. Available: <https://www.cbc.org.pe/wp-content/uploads/2020/03/guiadeinvernaderos.pdf>.
- [57] F. Incropera, *Fundamentos de Transferencia de Calor y de Masa*, vol. 4, no. 3. 1392.
- [58] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*, 4th ed., vol. 4, no. 3. México D.F.: The McGraw-Hill Interamericana, 2011.

- [59] S. K. Alghoul, H. G. Rijabo, and M. E. Mashena, “Energy consumption in buildings: A correlation for the influence of window to wall ratio and window orientation in Tripoli, Libya,” *J. Build. Eng.*, vol. 11, pp. 82–86, 2017, doi: 10.1016/j.jobbe.2017.04.003.
- [60] J. Molina Fuertes, M. Horn Mutschler, J. Rojas Menéndez, and A. Aranda Morales, “Modelación térmica de un módulo experimental de vivienda Altoandina utilizando Openstudio y Energyplus,” *XXIV Simp. Peru. Energía Sol. y del Ambient.*, no. 13-17 November, p. 13, 2017, [Online]. Available: <http://www.perusolar.org/>.
- [61] J. O. Molina, M. Ponce, M. Horn, and M. M. Gómez, “Towards a sustainable bioclimatic approach for the Peruvian high Andean rural area: Evaluation of the thermal contribution of a greenhouse attached to a dwelling,” *Proc. ISES Sol. World Congr. 2019 IEA SHC Int. Conf. Sol. Heat. Cool. Build. Ind. 2019*, pp. 355–364, 2020, doi: 10.18086/swc.2019.08.07.
- [62] INEI, “Resultados Definitivos de los Censos Nacionales 2017,” 2017. <http://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/>.
- [63] Wikipedia, “Departamento de Arequipa,” 2021. https://es.wikipedia.org/wiki/Departamento_de_Arequipa.
- [64] “Google Earth,” 2021. <https://www.google.com/intl/es/earth/>.
- [65] J. 22) La República (2018, “Arequipa: Piden ayuda en Imata por intensas heladas y nevadas | La República,” Jul. 22, 2018. <https://larepublica.pe/sociedad/1283475-arequipa-piden-ayuda-imata-intensas-heladas-nevadas/>.
- [66] <https://www.weblakes.com/>, “Rosa de vientos,” 2021. <https://www.weblakes.com/>.
- [67] <https://www.sunearthtools.com/>, “Posición del sol,” 2021. <https://www.sunearthtools.com/>.
- [68] GERESA, “Informe de Gestión I SEM 2016 1 Gerencia regional de salud Arequipa,” pp. 1–30, 2016, [Online]. Available: <http://www.saludarequipa.gob.pe/>.
- [69] P. W. Instruments and O. Comercial, “Hoja técnica de la nueva estación mteorológica,” 2017.

ANEXOS

ANEXO 1. Fichas técnicas de los instrumentos utilizados

Sensor de Temperatura TMCx-HD

ONSET

HOBO[®] TMCx-HD Sensor

Air/Water/Soil Temperature

The TMC temperature probe, for use in air, soil, or water, works with the HOBO UX120-006M, MX1100, ZW series, or U-Series data loggers.



Key Advantages:

- Accuracy and resolution vary according to attached logger model
- Measurement range is -40° to 100°C (-40° to 212°F)
- **Response time in air:** 2 min. typical to 90% in air moving 1 m/sec (2.2 mph)
- **Response time in stirred water:** 30 sec. typical to 90%
- Sensor is attached to a 0.3 m (1 ft), 1.8 m (6 ft), 6.1 m (20 ft), or 15.2 m (50 ft) cable

HOBO TMCx-HD Sensor Specifications

Measurement range: -40° to 50°C (-40° to 122°F) in water; -40° to 100°C (-40° to 212°F) in air

Accuracy:

w/U12: ±0.25°C from 0° to 50°C (±0.45°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum;
w/ZW: ±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum;
w/UX120-006M, MX1104, and MX1105: ±0.15°C from 0° to 70°C (±0.27°F from 32° to 158°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum;

Resolution:

w/U12: 0.03° at 20°C (0.05° at 68°F);
w/ZW: 0.02°C at 25°C (0.04°F at 77°F);
w/UX120-006M, MX1104, and MX1105: 0.002° at 25°C (0.003° at 77°F);

Drift: <0.1°C (<0.2°F) per year

Response time in air: 2 min. typical to 90% in air moving 1 m/sec (2.2 mph)

Response time in stirred water: 30 sec. typical to 90%.

Operating range: Sensor tip and cable immersion in fresh water up to +50°C (122°F) for 1 year

Housing: Copper-plated sensor tip

Dimensions: 5.1 x 33 mm (0.2 x 1.3 inches)

Weight: 34 g (1.1 oz)

Contact Us

Sales (8am to 5pm ET, Monday through Friday)

- ▶ Email sales@onsetcomp.com
- ▶ Call 1-508-759-9500
- ▶ In U.S. toll free 1-800-564-4377
- ▶ Fax 1-508-759-9100

Technical Support (8am to 6pm ET, Monday through Friday)

- ▶ Contact Product Support www.onsetcomp.com/support/contact
- ▶ Call 1-508-759-9500
- ▶ In U.S. toll free 1-877-564-4377

Onset Computer Corporation
470 MacArthur Boulevard
Bourne, MA 02532

Copyright© 2021 Onset Computer Corporation. All rights reserved. Onset, HOBO, HOBOware are registered trademarks of Onset Computer Corporation. Other products and brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective owners. Patented technology (U.S. Patent 6,826,664)

Hobo Onset U12-012 (micro estación)

ONSET

HOBO[®] U12-012 Data Logger

Temperature/Relative Humidity/Light/External

Measure temperature, relative humidity, light intensity, and more with the HOBO U12-012. With 12-bit resolution measurements, this data logger gathers a range of recorded data and stores 43,000 measurements.



Key Advantages:

- 12-bit resolution provides high accuracy
- Large memory for long-term deployments or fast sampling
- Programmable and push button start
- Direct USB interface for fast data offload
- Compatible with Onset's HOBO U-Shuttle for convenient data transport
- Compatible with HOBOWare and HOBOWare Pro for logger setup, graphing and analysis

HOBO U12-012 Data Logger Specifications

Measurement Range

Temperature: -20° to 70°C (-4° to 158°F)

RH: 5% to 95% RH

Light intensity: 1 to 3000 footcandles (lumens/ft²) typical; maximum value varies from 1500 to 4500 footcandles (lumens/ft²)

Analog channels: 0 to 2.5 Vdc (w/CABLE-2.5-STEREO); 0 to 5 Vdc (w/CABLE-ADAP5); 0 to 10 Vdc (w/ CABLE-ADAP10); 4-20 mA (w/CABLE-4-20MA)

Accuracy

Temperature: ± 0.35°C from 0° to 50°C (± 0.63°F from 32° to 122°F), see Plot A in manual

RH: ± 2.5% from 10% to 90% RH typical, to a maximum of ±3.5% including hysteresis at 25°C (77°F); below 10% and above 90% ±5% typical, see Plot B in manual

Light intensity: Designed for indoor measurement of relative light levels, see Plot D in manual for light wavelength response

External input channel (see sensor manual): ± 2 mV ± 2.5% of absolute reading

Resolution

Temperature: 0.03°C at 25°C (0.05°F at 77°F), see Plot A in manual

RH: 0.05% RH

Sample rate: 1 second to 18 hours, user selectable

Drift

Temperature: 0.1°C/year (0.2°F/year)

RH: <1% per year typical; RH hysteresis 1%

Response Time in Airflow of 1 m/s (2.2 mph)

Temperature: 6 minutes, typical to 90%

RH: 1 minute, typical to 90%

Time accuracy: ± 1 minute per month at 25°C (77°F), see Plot C in manual

Operating Temperature

Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F); 0 to 95% RH (non-condensing)

Launch/readout: 0° to 50°C (32° to 122°F), per USB specification

Battery life: 1 year typical use

Memory: 64K bytes (43,000 12-bit measurements)

Weight: 46 g (1.6 oz)

Dimensions: 58 x 74 x 22 mm (2.3 x 2.9 x 0.9 inches)

The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).

Hobo Onset U12-006 *Data Logger* (registrador de datos)

ONSET

HOBO[®] U12-006 Data Logger

4-Channel External

Collect a wide range of energy and environmental data points with the HOBO U12-006 data logger. Equipped with four channels and 12-bit resolution, this product detects greater variability in recorded data and stores up to 43,000 measurements.



Key Advantages:

- 12-bit resolution provides high accuracy
- Large memory for long-term deployments or fast sampling
- Programmable and push button start
- Direct USB interface for fast data offload
- Compatible with Onset's HOBO U-Shuttle for convenient data transport
- Compatible with HOBOWare and HOBOWare Pro software for logger setup, graphing and analysis

HOBO U12-008 Data Logger Specifications

Analog channels:

0 to 2.5 Vdc (w/CABLE-2.5-STEREO); 0 to 5 Vdc (w/CABLE-ADAP5); 0 to 10 Vdc (w/ CABLE-ADAP10); 4-20 mA (w/CABLE-4-20MA)

Accuracy (logger only): $\pm 2 \text{ mV} \pm 2.5\%$ of absolute reading; $\pm 2 \text{ mV} \pm 1\%$ of reading for logger-powered sensors

Resolution: 0.6 mV

Sample Rate: 1 second to 18 hours, user selectable

Time accuracy: ± 1 minute per month at 25°C (77°F), see Plot A

Operating range: -20 to 70°C (-4° to 158°F)

Operating temperature:

Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F); 0 to 95% RH (non-condensing)

Launch/readout: 0° to 50°C (32° to 122°F), per USB specification

Humidity range: 0 to 95% RH, non-condensing

Battery life: 1 year typical use

Memory: 64K bytes (43,000 12-bit measurements)

Weight: 46 g (1.6 oz)

Dimensions: 58 x 74 x 22 mm (2.3 x 2.9 x 0.9 inches)

The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).

Contact Us

Sales (8am to 5pm ET, Monday through Friday)

- ▶ Email sales@onsetcomp.com
- ▶ Call 1-508-759-9500
- ▶ In U.S. toll free 1-800-564-4377
- ▶ Fax 1-508-759-9100

Technical Support (8am to 6pm ET, Monday through Friday)

- ▶ Contact Product Support www.onsetcomp.com/support/contact
- ▶ Call 1-508-759-9500
- ▶ In U.S. toll free 1-877-564-4377

Onset Computer Corporation
470 MacArthur Boulevard
Bourne, MA 02532

Copyright© 2021 Onset Computer Corporation. All rights reserved. Onset, HOBO, HOBOWare are registered trademarks of Onset Computer Corporation. Other products and brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective owners. Patented technology (U.S. Patent 6,826,664)

Estación Davis Vantage Pro 2 Plus

DAVIS International Perú S.A.
Precision Weather Instruments



DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS



Oficina Comercial
Mariscal Miller 2598 Lince – Lima 14 PERÚ
Tel. (51) 1 4222002
E-mail: davisinter@davisperu.com
Web: www.davisperu.com



HOJA TÉCNICA DE LA NUEVA ESTACIÓN METEOROLÓGICA VANTAGE PRO 2 PLUS

Esta nueva versión de DAVIS para monitoreo del clima, Vantage Pro 2 Plus, de tecnología innovadora y exactitud excepcional, amplía las opciones de uso de sus centrales automáticas, volviéndolas más versátiles y cómodas para sus diversas aplicaciones. Implementando un nuevo sistema de sensores integrados (ISS), que agrupa a los sensores de Temperatura, Humedad Relativa, Radiación Solar y Rayos Ultravioletas, además Anemómetro y Pluviómetro.

En esta ESTACIÓN AUTOMÁTICA Y COMPACTA, existen dos versiones: Inalámbricas y Cableada.

-La Vantage Pro 2 Plus Inalámbrica, transmite y recibe los datos del ISS telemáticamente, contiene un panel solar para su alimentación por lo tanto funciona con su propia energía solar y un sistema de radio transmisión UHF con una cobertura de hasta 300 metros (con línea e vista) lo que mejora las posibilidades de su uso.

-La Vantage Pro 2 Plus Cableada, se usa generalmente en lugares donde haya demasiada interferencia radial, la transmisión de los datos del ISS es por medio físico (cable de 30 metros, incluido)

Ambos modelos pueden trabajar en ubicaciones extremas o en lugares muy remotos, o aislados, para aquellos casos ofrecemos un sistema especial con gabinetes (se vende por separado) para proteger a la consola y equipados con Panel Solar (se vende por separado) y Batería recargable (incluido con el panel solar) trabajando de forma independiente autoabasteciéndose de la energía necesaria para su correcto funcionamiento y proporcionando datos climatológicos exactos.

VANTAGE PRO 2 PLUS
CABLEADA



VANTAGE PRO 2 PLUS
INALÁMBRICA



CONJUNTO INTEGRADO DE SENSORES: ISS

- ✦ Anemómetro: Dirección de viento, Rosa de los vientos, Velocidad, Dirección de alta velocidad y reocrido del viento.
- ✦ Temperatura y Humedad externa: localizados dentro del protector contra radiación que protege los sensores de la radiación solar y de otras fuentes de calor radiado y reflejado.
- ✦ Radiación Solar: Para medir la radiación solar y la energía del sol, el elemento difusor y el gabinete están diseñados con sumo cuidado para lograr una respuesta de coseno exacto. El gabinete de dos piezas minimiza el calentamiento por radiación, permite el enfriamiento por convección del sensor e impide que queden agua o polvo atrapados.
- ✦ Radiación Ultravioleta: mide la porción del espectro ultravioleta que causa quemaduras en la piel. Le permite mostrar el índice ultravioleta, el índice de dosis y la dosis diaria y acumulada. Un filtro de varias capas provee una respuesta espectral muy aproximada al espectro de acción de eritema. El gabinete de dos piezas cumple la misma función que en el caso de la radiación solar.
- ✦ Pluviómetro de Balancín: El colector de lluvia cumple con todos los lineamientos de área de recolección establecidos por la OMM (Organización Meteorológica Mundial). Lee cantidades de precipitación en incrementos de 0.2mm. El cubo medidor de nuestro colector de lluvia está recubierto con aluminio, se vacía automáticamente, es resistente a la corrosión y se fabrica calibrado con láser para lograr una exactitud excepcional.

Oficina Comercial
Mariscal Miller 2598 Lince – Lima 14 PERÚ
Tel. (51) 1 4222002
E-mail: davisinter@davisperu.com
Web: www.davisperu.com



CONSOLA Y WEATHERENVOY/TRANSIMISOR-RECEPTOR



CONSOLA: Tiene la función de recibir teleméricamente los datos recolectados por el ISS, para almacenarlos (en el datalogger) y procesarlos.

De moderno diseño y fácil visualización, tiene una gran pantalla (9 x 15cm) de LCD retroiluminado que le permite ver los datos en la oscuridad, con teclado indicativo de todos los factores climáticos y donde podrá ver los datos gráficamente y con valores de las últimas 24 horas, meses o años, se muestra también pronósticos de clima, fases de la luna, tendencias de lluvia, así como máximas y mínimas con hora de ocurrencia.

La consola puede recibir inforamción de hasta 8 diferentes estaciones de sensores independientes. La base de datos se almacena en el Weatherlink.



WEATHERENVOY: cumple la misma función que la consola, se usa en caso de no ser necesario la visualización de los datos, por lo tanto no cuenta con pantalla LCD ni teclado.

Ambas pueden ser alimentadas con un adaptador de energía eléctrica AC (incluido) o con baterías (3 pilas tipo C alcalinas, no incluidas). Para los sistemas remotos contamos con Paneles Solares (se vende por separado) para dar energía a la consola o weatherenvoy.





WETHERLINK PARA VANTAGE PRO 2
Datalogger

Una memoria no volátil (no pierde la información que se ha almacenado hasta ese momento a pesar de una eventual falta de fluido eléctrico) que contiene la base de datos de última generación viene preparada para interactuar con una PC y proporcionar al usuario una amplia gama de información climatológica. Se puede almacenar datos hasta 6 meses en la memoria, dependiendo del intervalo de archivo que programe. Con esto se obtiene un gran archivo histórico personalizado y pormenorizado pudiéndose graficar diferentes comparaciones en todas las lecturas. Permite interactuar en una Web Site ya que cuenta con los sistemas FTP y HTML.

El kit incluye el software en CD ROM compatible con Windows 95/98/2000/XP/Vista/Windows7. Un datalogger con cable y conector (USB o Serial) para conexión a la PC. Requiere una computadora con 5MB de espacio libre en el disco y 4MB de memoria RAM.



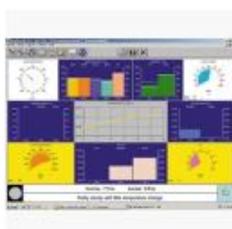
DATALOGGER SERIAL



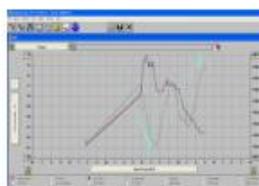
DATALOGGER USB



DATALOGGER IP



TIEMPO REAL EN LA PC



CUADRO DE GRÁFICOS

BOLETLN DE DATOS ALAMCENADOS



ESPECIFICACIONES TECNICAS

FUNCIÓN		RESOLUCIÓN	LÍMITES	EXACTITUD +/-
PRESIÓN BAROMÉTRICA	Límite de altitud: -600 a +4570m	0.1 mm Hg 0.1 mbar	+10 a 820 mm Hg 540 a 1100 mbar o hPa	0.8 mm Hg 1.0 mbar o Hpa
	Humedad al aire libre	1%	0% a 100%	3%
HUMEDAD	Punto de rocío	1 °C	-76 °C a +54 °C	1.5 °C
	Precipitación	0.2 mm	0 a 6553 mm	4%
PRECIPITACIÓN	Índice de Precipitación	0.1 mm	0 a 2438 mm/h	5% ≤ 127 mm/h
	Radiación Solar	1 W/m2	0 a 1800 W/m2	5%
SOLAR Y ULTRAVIOLETA	Energía Solar	0.1 Ly	1999.9 Ly	5%
	Dosis de radiación Ultravioleta	0.1 MED	0 a 199 MED	5%
	Índice Ultravioleta	0.1	0 a 16	5%
	Temperatura al aire libre	0.1 °C	+40 °C a +65 °C	0.5 °C
TEMPERATURA	Índice de calor al aire libre	1 °C	+40 °C a +74 °C	1.5 °C
	Índice de temperatura, humedad, sol y viento	1 °C	+68 °C a +74 °C	2 °C
	Sensación térmica	1 °C	+79 °C a +57 °C	1 °C
	Hora	1 minuto	12 / 24 horas	8 s/mes
HORA Y FECHA	Fecha	Día/mes	Año bisiesto	8 s/mes
	Salida y puesta de sol	1 minuto	24 horas	1 minuto
	Dirección del viento	1°	0° a 360°	3°
VIENTO	Rosa de vientos	22.5	16 puntos cardinales	
	Velocidad del viento	0.1 m/s 1 Km/h	1 a 80 m/s 3 a 290 Km/h	5%
	Dirección de alta velocidad	22.5	16 puntos cardinales	
	Recorrido de viento	0.01 m/s 0.01 Km/h	Ilimitado	5%

ESTACIONES OPCIONALES

La consola de la Estación Vantage Pro 2 Plus puede interactuar hasta con 8 estaciones:

- Estación de Temperatura y Humedad de Suelo*
- Estación de Temperatura (aires o agua)
- Estación de Temperatura y Humedad Ambiente
- Estación de Humedad de Hoja (versión agrícola)*
- Kit transmisor para Anemómetro

*Se tiene la opción de medir la Temperatura y Humedad del suelo hasta en 4 niveles de profundidad.

Colocando 2 ó más estaciones se tiene como resultado un sistema que puede estar disperso en el área donde más se necesite monitorear estos factores.

Estas Estaciones de Sensores cuentan con un panel solar (excepto la Estación de Temperatura y Humedad Ambiente que funciona con pilas no incluidas) y un radio transmisor con una cobertura de hasta 300 metros con línea de vista. Los datos son enviados a la consola y mostrados conjuntamente con los datos provenientes del ISS y archivados en el Weatherlink para luego ser almacenados en el software de la PC.



ESTACION DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DE SUELO Y HUMEDAD DE HOJA



SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO



SENSOR DE HUMEDAD DE HOJA



SENSOR DE TEMPERATURA DE SUELO DE ACERO INOXIDABLE

Oficina Comercial
 Mariscal Miller 2598 Lince – Lima 14 PERÚ
 Tel. (51) 1 4222002
 E-mail: davisinter@davisperu.com
 Web: www.davisperu.com



**ESTACIÓN DE
TEMPERATURA Y
HUMEDAD AMBIENTE**



**ESTACIÓN DE TEMPERATURA
(AIRE O AGUA)**



**KIT TRANSMISOR PARA
ANEMÓMETRO**

ACCESORIOS PARA INSTALACIÓN REMOTAS E INDEPENDIENTES

Use una combinación de estos accesorios para dotar de protección y asegurar el funcionamiento de manera autónoma de su Estación Meteorológica Automática DAVIS.



**PANEL SOLAR PARA
ESTACIONES CABLEADAS**



**PANEL SOLAR PARA CONSOLA O
ENVÍO INALÁMBRICO**



**GABINETE DE PROTECCIÓN PARA
CONSOLA VANTAGE PRO 2**



**GABINETE DE PROTECCIÓN
PARA ENVÍO**

INFORMACIÓN

La Estación Vantage Pro 2 Plus le proporciona la siguiente información:

1. PRESIÓN BAROMÉTRICA
2. TEMPERATURA INTERNA
3. TEMPERATURA EXTERNA
4. SENSACIÓN TÉRMICA
5. HUMEDAD RELATIVA INTERNA
6. HUMEDAD RELATIVA EXTERNA
7. ÍNDICE DE CALOR
8. PUNTO DE ROCÍO
9. PRECIPITACIÓN POR MINUTO, HORA, DÍA, MES, AÑO Y TORMENTA
10. PRECIPITACIÓN EN LAS ÚLTIMAS 24 HORAS
11. PROMEDIO DE LLUVIA POR MINUTO, HORA, DÍA Y MES
12. VIENTO: DIRECCIÓN Y VELOCIDAD
13. MARCA LOS 16 ÚLTIMOS PUNTOS DE INCIDENCIA
14. RADIACIÓN SOLAR, INTENSIDAD (HORAS LUZ REALES)
15. ENERGÍA SOLAR, HORA, DÍA, MES Y AÑO
16. EVAPOTRANSPIRACIÓN, DÍA, MES Y AÑO
17. RAYOS ULTRAVIOLETA, ÍNDICE Y DOSIS
18. HORAS FRÍO
19. HORAS CALOR
20. GRADOS DÍA, INFORMACIÓN DE CICLOS
21. ÍNDICE DE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA, SOL Y VIENTO
22. PRONÓSTICO DE CLIMA
23. FASES DE LA LUNA
24. HORA, DÍA, MES Y AÑO
25. HORA DE SALIDA Y PUESTA DE SOL
26. HORAS LUZ (LATITUD Y LONGITUD)

Oficina Comercial
Mariscal Miller 2598 Lince – Lima 14 PERÚ
Tel. (51) 1 4222002
E-mail: davisinter@davisperu.com
Web: www.davisperu.com



- 27. GRÁFICOS DE TODOS LOS PARÁMETROS
- 28. INFORMACIÓN DE SALIDA Y PUESTA DE SOL, DÍA, MES Y AÑO (LATTUD Y LONGITUD) NOAA*
- 29. INFORMACIÓN DEL CLIMA, EN CIEN MENSAJES DIFERENTES DE LECTURA DIRECTA
- 30. RESÚMENES MENSUALES Y ANUALES EN FORMATO DE LA NOAA
- 31. RESÚMENES DE LOS VALORES PLUVIOMÉTRICOS
- 32. 70 ALARMAS PARA MÚLTIPLES FUNCIONES SIMULTANEAMENTE

OPCIONALES:

- ✚ HUMEDAD DE LA SUPERFICIE DE LA HOJA(2 diferentes lugares y hasta 61 metros de distancia con cable adicional)
- ✚ TEMPERATURA DEL SUELO(4 profundidades diferentes y hasta 260 metros de distancia con cable adicional)
- ✚ HUMEDAD DEL SUELO (4 profundidades diferentes y hasta 300 metros de distancia con cable adicional)
- ✚ TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTE
- ✚ TEMEPRATURA AMBIENTE

Solicite Soporte Técnico a:

logistica1@davisperu.com

logistica2@davisperu.com

Nextel: 415*0588

Para mayor información y ventas comuníquese a:

davisinter@davisperu.com

Nextel: 401*1723

412*4994

Central: 01-4470497

Vísitenos en nuestra página web:

www.davisperu.com

O en nuestra oficina comercial:

Calle Berlín 438 Of. 101 Miraflores-Lima

Oficina Comercial

Mariscal Miller 2588 Lince – Lima 14 PERÚ

Tel. (51) 1 4222002

E-mail: davisinter@davisperu.com

Web: www.davisperu.com

ANEXO 2. Secuencia del uso del programa *EnergyPlus* en la simulación.

Se mencionó anteriormente que, primero se hace el diseño en *SketchUp* y se crean las zonas térmicas, en la figura A2.1 se muestra el MEV dibujado en 3D, así como la zona térmica, el cual es un cubo de color azul que encierra al módulo, las sombras también se toman en cuenta ya que van a influir sobre el cálculo de temperatura, energía demandada de calefacción, refrigeración, radiación solar, etc., se observa el otro módulo, el tanque que se encuentra muy cerca así como el tanque de agua, los cuales se representan en volúmenes de color morado que son las sombras más cercanas al módulo en estudio.

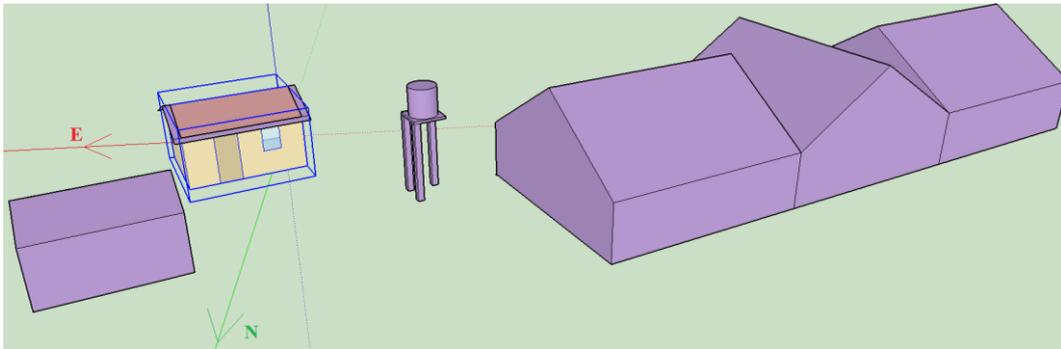


Fig. A2.1. Representación del módulo en *SketchUp*, con las sombras más cercanas.

La figura A2.2 muestra la designación para la pared con dirección norte (cuadro en rojo) del MEV creado en *SketchUp*, nombrando así a todas las superficies, algunas, por ejemplo, paredes, techos, puertas, ventanas, piso, etc., también se indica si tienen exposición a la radiación del sol, aquí también se nombra la zona térmica de trabajo, luego se guarda en un archivo con extensión .idf, el cual es la entrada para el *EnergyPlus*.

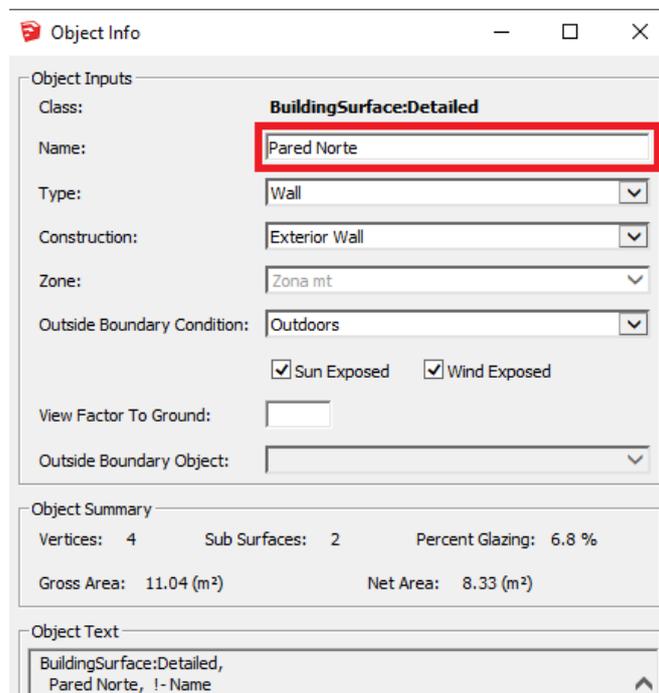


Fig. A2.2. Cuadro con información básica del objeto.

Para poder entrar al *OpenStudio*, se abre el archivo creado anteriormente el cual aparece como *EP-Launch*, como se puede observar en la figura 14, al hacer clic en el *Edit – IDF Editor* (ver el recuadro rojo en la figura A2.3), lleva directamente a otra ventana (ver figura A2.4) donde aparecen diferentes funciones, se mencionan algunas como, la versión del *EnergyPlus*, la construcción del edificio, materiales de la construcción, ubicación del sitio en estudio, período de ejecución del programa, horarios de ejecución, zonas de infiltración, variables de salida, etc. En la ventana del *EP-Launch* también se muestra la entrada para el archivo de clima el cual se carga dentro del apartado de nombre *Weather File*.

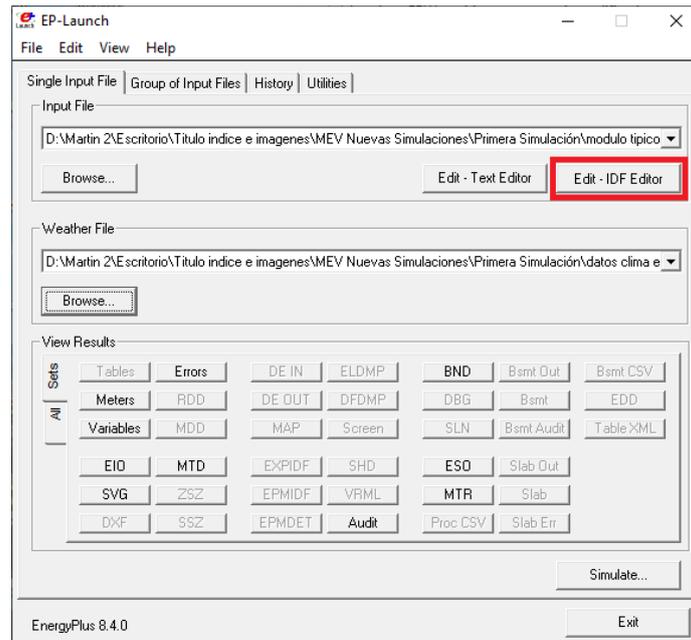


Fig. A2.3. Ventana del *EP-Launch*.

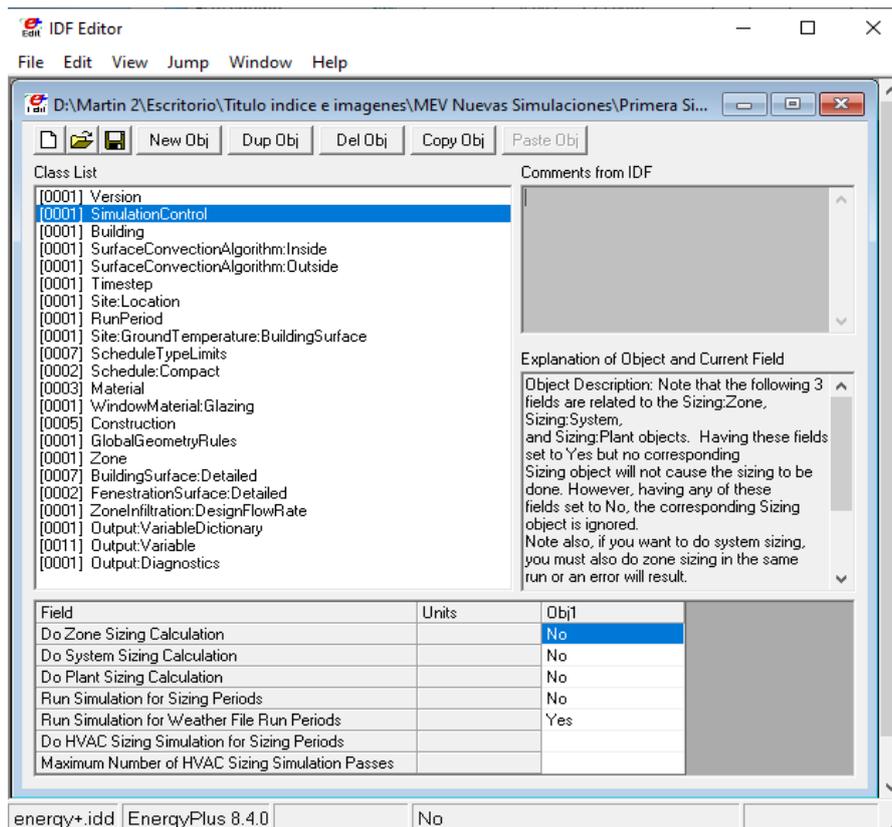


Fig. A2.4. Entrada del *IDF Editor*.

Dentro los parámetros para la simulación se muestran algunos básicos a considerar, los cuales se muestran a continuación.

- i. Control de simulación con el uso del archivo de clima.

En la figura A2.5 se observa la activación (Yes) para la ejecución de la simulación para los diferentes periodos del archivo meteorológico creado.

Field	Units	Obj1
Do Zone Sizing Calculation		No
Do System Sizing Calculation		No
Do Plant Sizing Calculation		No
Run Simulation for Sizing Periods		No
Run Simulation for Weather File Run Periods		Yes
Do HVAC Sizing Simulation for Sizing Periods		
Maximum Number of HVAC Sizing Simulation Passes		

Fig. A2.5. Activación del campo de ingreso para el archivo de clima.

- ii. Entorno de datos para el edificio.

Para este apartado se muestran algunos parámetros (figura A2.6), se nombra la edificación, ángulo de orientación respecto al eje del norte, en este caso en la figura geométrica generada en el *SketchUp* ya se giró un ángulo de 21,6 ° con dirección oeste respecto del eje del norte (ver figura A2.1), para el tipo de terreno se elige de forma general (country), y la distribución solar se toma la opción de reflexión tanto en el interior como en el exterior. Algunos datos de entrada se generan por defecto por el programa mismo pero que no tienen relevancia en la simulación.

Field	Units	Obj1
Name		MT calamina
North Axis	deg	0
Terrain		Country
Loads Convergence Tolerance Value		0.04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0.4
Solar Distribution		FullInteriorAndExteri
Maximum Number of Warmup Days		25
Minimum Number of Warmup Days		

Fig. A2.6. Parámetros usados para el edificio.

iii. Ubicación del módulo.

En esta sección (figura A2.7) se ingresan los datos como el nombre del lugar en estudio, sus coordenadas geográficas como latitud y longitud, la zona horaria y la altitud.

Field	Units	Obj1
Name		IMATA
Latitude	deg	-15.83859
Longitude	deg	-71.09124
Time Zone	hr	-5
Elevation	m	4469

Fig. A2.7. Ingreso de datos para la localización del MEV.

iv. Periodo de funcionamiento de la simulación.

Para este campo (figura A2.8) Se especifica el rango de fechas en el cual se realizará la simulación, como el inicio y la finalización de los días o meses, para este caso no se tomó en cuenta los días especiales o días de vacaciones de fin de semana, ni días de ahorro de luz.

Field	Units	Obj1
Name		Annual
Begin Month		7
Begin Day of Month		26
End Month		7
End Day of Month		31
Day of Week for Start Day		UseWeatherFile
Use Weather File Holidays and Special Days		No
Use Weather File Daylight Saving Period		No
Apply Weekend Holiday Rule		No
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		Yes
Number of Times Runperiod to be Repeated		1
Increment Day of Week on repeat		Yes
Start Year		

Fig. A2.8. Datos para el tiempo de simulación.

v. Temperatura del suelo.

Para este entorno (figura A2.9) se ingresaron los datos hallados en promedio para cada mes, de acuerdo con el archivo de clima del programa *Meteonorm*, hallado para estas condiciones de clima.

Field	Units	Obj1
January Ground Temperature	C	5
February Ground Temperature	C	5
March Ground Temperature	C	5
April Ground Temperature	C	5
May Ground Temperature	C	5
June Ground Temperature	C	5
July Ground Temperature	C	4
August Ground Temperature	C	4
September Ground Temperature	C	4
October Ground Temperature	C	4
November Ground Temperature	C	4
December Ground Temperature	C	5

Fig. A2.9. Datos de temperatura promedio mensual para el suelo.

vi. Materiales

En la figura A2.10 se muestran los diferentes materiales utilizados en la construcción del MEV, como el adobe, la calamina metálica, la tierra, etc., así como, algunas propiedades físicas, térmicas y ópticas, como la rugosidad, el espesor, conductividad térmica, densidad, calor específico, absorptancia térmica y solar.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		adobe	calamina	tierra
Roughness		MediumRough	MediumSmooth	MediumRough
Thickness	m	0.4	0.0005	0.1
Conductivity	W/m-K	0.349	237	0.52
Density	kg/m3	1600	2702	2000
Specific Heat	J/kg-K	920	903	1840
Thermal Absorptance		0.92	0.03	0.88
Solar Absorptance		0.65	0.09	0.7
Visible Absorptance				

Fig. A2.10. Datos para las propiedades de los diferentes materiales.

vii. Construcción

Estas construcciones (figura A2.11) se generan con los materiales ingresados previamente, en el cual se designan los diferentes tipos, como paredes, techos, pisos, puertas, ventanas, etc., en algunos casos lagunas construcciones usan más de un material para su función, por ejemplo, las paredes enlucidas con yeso usan aparte del adobe el yeso o el poliestireno expandido incorporado sobre el falso techo, en todos los casos el ingreso de materiales se hace desde la capa exterior hacia la capa interior.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Paredes	Techo	Piso	Puerta	Ventana
Outside Layer		adobe	calamina	tierra	calamina	Clear 3mm
Layer 2						

Fig. A2.11. Construcciones creadas.

viii. Superficies de construcción

En esta sección (figura A2.12), se detalla cada superficie creada con su nombre, tipo, construcción, zona a la que pertenece, la condición de frontera y la exposición de la superficie a la radiación solar, condiciones de frontera y si está expuesta o no al viento, así tenemos el piso, las paredes, los techos, mas no se detallan las subsuperficies como puertas y ventanas.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Piso cuarto	Pared Oeste	Pared Norte	Pared Sur	Techo calamina Sur	Pared Este	Techo calamina Norte
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Wall	Roof	Wall	Roof
Construction Name		Piso	Paredes	Paredes	Paredes	Techo	Paredes	Techo
Zone Name		Zona mtc	Zona mtc	Zona mtc				
Outside Boundary Condition		Ground	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object								
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		NoWind	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed
View Factor to Ground		0						

Fig. A2.12. Superficies del módulo.

ix. Subsuperficies

Las subsuperficies creadas como puertas y ventanas se muestran en la figura A2.13, donde se menciona el nombre de la superficie, tipo, construcción, superficie a la cual pertenece.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Puerta Norte	Ventana Norte
Surface Type		Door	Window
Construction Name		Puerta	Ventana
Building Surface Name		Pared Norte	Pared Norte
Outside Boundary Condition Object			
View Factor to Ground			

Fig. A2.13. Superficies de puertas y ventanas.

x. Zona de infiltraciones

Los datos a ingresar en esta ventana, se muestran en la figura A2.14, se empieza por el nombre, la zona al cual pertenece la construcción, el horario establecido anteriormente para la ocurrencia de dichas infiltraciones y los intercambios de aire por hora (ACH).

Field	Units	Obj1
Name		Infiltracion MTC 1
Zone or ZoneList Name		Zona mtc
Schedule Name		HORARIOS MTC
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s	
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2	
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2	
Air Changes per Hour	1/hr	2
Constant Term Coefficient		1

Fig. A2.14. Infiltraciones de aire.

xi. Variables de salida

En este apartado se tienen gran cantidad de variables de salida, para el caso de estudio, se tomará la temperatura en el ambiente interior, energía de demanda de calefacción tomada para cierto valor de temperatura (figura A2.15), la frecuencia de datos es horaria.

Field	Units	Obj1	Obj2
Key Value		*	*
Variable Name		Zone Mean Air Temperature	Zone Air System Sensible Heating Energy
Reporting Frequency		Hourly	Hourly
Schedule Name			

Fig. A2.15. Variables de salida para la simulación.

ANEXO 3. Archivo fotográfico.

Se muestran imágenes donde se aprecia el trabajo realizado en la instrumentación de los sensores de temperatura sobre las paredes, interiores y exteriores del módulo, estación del Senamhi instalada en Imata,

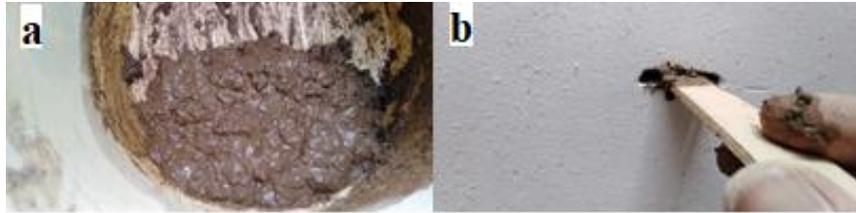


Fig. A3.1. Detalles del procedimiento para la instrumentación del sensor de temperatura en la pared: (a) preparación del barro con ichu y agua para rellenar los orificios, y (b) relleno previo con el barro preparado para colocar el sensor de temperatura en los orificios hechos en la pared.



Fig. A3.2. Detalles dentro del MEV: (a) vista del interior de la unión de las planchas de fibrocemento en la cumbrera (parte más alta) del MEV, (b) escarchado sobre la plancha de fibrocemento, archivado a las 6:00 horas en el interior del módulo, (c) vista interior de las separaciones de las bases del falso techo de las cámaras del ático, (d) pared de adobe con el enlucido de yeso en ambos lados y al medio el marco de madera de la puerta, y (e) tapado de los huecos formados en la unión entre la plancha de fibrocemento y el techo de policarbonato del invernadero adosado, con material llamado “diablo” el cual es una mezcla de cemento y yeso.



Fig. A3.3. (a) Compartición de información entre compañeros de la UNI de diferentes proyectos en los MEVs, y (b) vista interior de la ventana de vidrio simple con marco de metal del MEV1.



Fig. A3.4. (a) Detalle de la capa de hielo formado sobre el techo del invernadero adosado al MEV2 en un día de caída de nevada, en Imata, y (b) estación meteorológica del SENAMHI instalada en el centro poblado de Imta, Arequipa.



Fig. A3.5. (a) Niños con máscaras y disfraces solicitando caramelos en un kiosco ubicado en la avenida principal de Imata, el 31 de octubre, (b) chocolatada realizada previo a la navidad, con el apoyo del proyecto 04-2018-FONDECYT BM-IADT-MU, realizada en el albergue, para los adultos mayores, (c) desfile cívico patriótico con participación de niños de centros educativos, celebrando el aniversario de la creación de San Antonio de Chuca, la segunda semana de noviembre, y (d) padre Franz Windischhofer de nacionalidad austriaca a cargo del albergue y de la iglesia de Imata.

ANEXO 4. Publicación 1: ISES Solar World Congress 2019

Towards a sustainable bioclimatic approach for the Peruvian high Andean rural area: Evaluation of the thermal contribution of a greenhouse attached to a dwelling

Juan O. Molina, Martin Ponce, Manfred Horn and Mónica M. Gómez

Faculty of Sciences/Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Rimac, Lima (Peru)

Abstract

This study includes the evaluation and validation of two experimental housing modules built in Imata, Arequipa, Peru, at 4500 meters above sea level (masl) and with a very cold climate. The modules are similar, differing only in that one of them has a greenhouse attached to the north wall. The design and materials used in the module envelopes are similar to what is mostly used locally. For the simulation work and the validation of the energetic behavior, both modules were equipped for the acquisition of the temperatures in the interior, and for the simulation, the EnergyPlus software was used. The exchange of air between the module with the greenhouse and its greenhouse was controlled by means of opening and closing the door and window that connected them, using different configurations. When the door and the window are open during daytime, the temperature inside the module can increase 5.7 °C with respect to the module without the greenhouse, and in relation to the external temperature, up to 12.1 °C during the day and up to 16 °C during the night. The data obtained with simulation are in excellent agreement with the data measured inside the two modules for all the proposed configurations. These results strengthen the proposal to use attached greenhouses to obtain sustainable heating for rural high Andean homes which, for the most part, do not have any heating.

Keywords: thermal comfort, solar energy, energy efficiency, attached greenhouse

1. Introduction

In recent years, attention has been prioritized in Peru on the most vulnerable population sectors (due to their social status, age, nutritional status and geographical location) (Presidency of the Council of Ministers, 2019). A particular case is the population settled in the south of the country in the high Andean region located more than 4000 meters above sea level (masl); the health of this population is at risk due to the very cold climate, which has caused the deaths of hundreds of inhabitants. Given this problem, pilot projects of bioclimatic housing construction have been carried out from the government, academia and the private sector to improve the habitability conditions by applying a series of bioclimatic techniques and strategies, prioritizing heat isolation and the use of passive solar systems for heating, such as attached greenhouses (GIZ-MVCS, 2015). Passive solar heating is particularly advantageous when considering that in these areas, the solar resource is abundant (above 6 kWh m⁻² day⁻¹) (SENAMHI, 2003). These projects focused the studies on determining the temperature inside the house, as a result of the whole envelope, but did not quantify the thermal or energy contribution of each implemented technique. The present study is based on the determination of the thermal energy contribution of a greenhouse attached to an experimental housing module in an Altoandina area.

Although greenhouses are better known in agriculture for the production of vegetables in regions where open field production is not possible because of the climate (Theurl et al., 2017; Li et al., 2017), greenhouses attached to homes are also used in cold climates as a passive heating system with the objective to reduce the demand for active heating. Some studies made in Europe are given here: A comparison of different technological options evaluated in the winter season (Chiesa et al., 2017); a determination of the thermal efficiency of a greenhouse (Schoenau et al., 1990; Bataineh and Fayez, 2011); a determination of solar gain from environments adjacent to an attached greenhouse (Oliveti et al., 2012); contribution to energy efficiency as an efficient strategy for saving

energy (Ignjatović et al., 2015); a contribution to thermal comfort in the main spaces (Bakos and Tsagas, 2000); use of dynamic simulation software to determine its energy efficiency (Asdrubali et al., 2012; Mihalakakou, 2002); and a validation of results calculated using simulation software with registered experimental data (Mottard and Fissore, 2007).

In the Latin American region, similar studies have also been developed as part of the design and strategies of passive solar homes, similar to the case study in Chile where by comparison, using simulations for complete houses with and without an attached greenhouse, the positive effect of the greenhouse was inferred in the interior environments of the houses (Müller, 2008). In Andean Patagonia, in a cold climate, the temperature was measured over a year in an attached greenhouse during the winter, spring and autumn (González, 2012).

Regarding Peru, some work was done with attached greenhouses in the design of bioclimatic houses to determine their thermal contribution using dynamic simulations (Ramos et al., 2013). These studies were done mostly at the National University of Engineering (UNI), mainly in the framework of undergraduate and graduate thesis, summarized in the thesis of Molina (2016), and focused on solving and looking for alternatives to improve thermal conditions in houses located at more than 3000 masl, with very cold climates (Molina et al., 2019a; Gómez et al., 2016). Likewise, the dynamic simulation program EnergyPlus (U.S. Department of Energy's, n.d.) has been used at UNI for the last ten years as a calculation engine for the analysis of heat transfer in a transient state (Molina, 2018). These works considered the use of solar energy, abundant in the Andean areas, passive heating strategies and the use of local materials, such as adobe (Abanto et al., 2017), complemented with industrial products with good thermal performance. Peru has a technical standard, EM.110: "Thermal and light comfort with energy efficiency", which emphasizes compliance with maximum thermal transmittance in walls, ceilings and floors (MVCS, 2014). However, this standard considers only the insulation property of materials, but not their character as a heat storage material (thermal inertia), a consideration that should be taken into account in climates with high solar radiation and significant daily thermal oscillations.

In the present study, two habitable experimental modules (ME) were built in the village of Imata, in the region of Arequipa, at 4500 masl, at a latitude of 15° 50' South, and a longitude of 71° 5' West, where absolute minimum temperatures of up to -23 °C have been recorded (SENAMHI-FAO, 2010). Prior to the construction of the modules, a diagnosis was made of the housing typology in Imata. There was a predominance of adobe in the construction of walls, a vernacular material of good thermal performance, which little or nothing can help against extremely cold temperatures if the other components of the envelope are not thermally suitable, such as the sheet metal corrugated zinc-iron (known as "calamine" in Peru) to cover the roof (Figure 1a), metal doors and metal frames of single-glass windows (Figure 1b). Due to its high heat conductance, these metal parts of the envelope act as thermal short-circuit, with the result that during the day, the interior of the houses will be overheated and at night they are similar to a refrigerator. If the large infiltrations are added, as a result of badly closing doors and windows, the interior temperature will not be very distant from the outside temperature.

The modules were built with a rectangular base of 3.8 m x 4.8 m each, and only one of them has the greenhouse attached to its north wall that occupies an additional area of 2.4 m x 4.8 m. The construction system used was the traditional method according to the customs of the area, using local materials complemented with other commercial ones. In addition, skylights in the ceiling and false ceilings were implemented, which were constructive elements not typical in the area.

To determine the thermal behavior of the modules, the EnergyPlus software was used, which is a calculation engine based on transient heat transfer models to perform thermal and energy calculations in a house or building (Crawley et al., 2001). The EnergyPlus software is complemented by two other software programs, the SketchUp that provides the structure of the model, i.e., the 3D design; and OpenStudio, which defines spaces, weather and thermal conditions, an interface that uses SketchUp tools for the use of EnergyPlus (Alghoul et al., 2017). Subsequently, the model is validated with real data registered in situ to determine the agreement between real and simulated data.

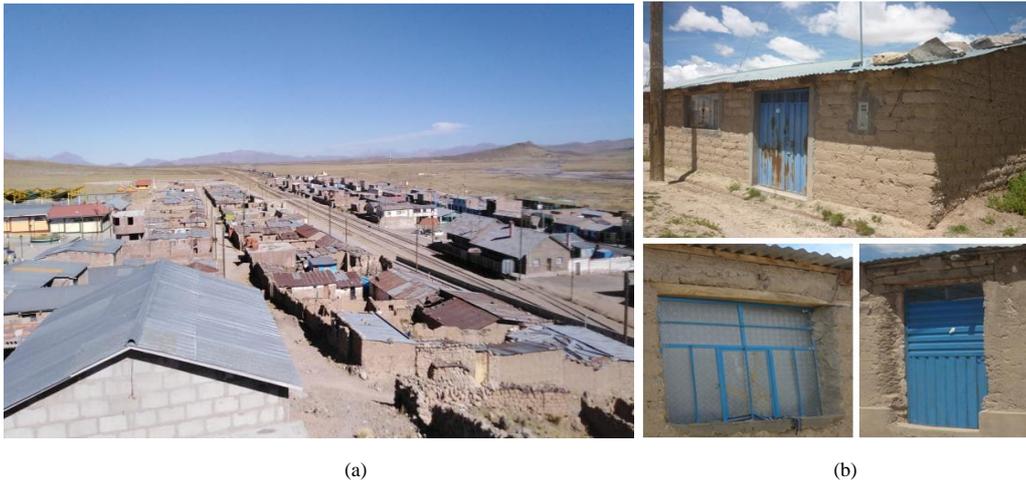


Fig. 1: (a) View of a part of the village of Imata, (b) typical dwelling with a corrugated metal sheet roofing and iron window frame and iron door.

2. Description of the experimental modules and attached greenhouse

The habitable experimental modules (ME) are located in the village of Imata, district of San Antonio de Chuca, Caylloma province, in the Arequipa region, at 4500 masl, in the south of Peru. The modules are 18.24 m² each and they have the same construction elements and dimensions of their enclosure: floor, walls, ceiling, door, window, false ceiling, and skylights in the ceiling and false ceiling. Experimental module 1 (ME1) does not have a greenhouse and experimental module 2 (ME2) has a greenhouse attached to the north-facing wall. Each module has 2.4 m² of skylights in the ceiling and false ceiling, covered with 6 mm thick alveolar polycarbonate sheets, with an UV filter of 3.12. These construction elements do not exist in typical rural houses but are considered to be important passive elements of a bioclimatic house in this region, capable of collecting the solar radiation with the sun at midday near the zenith. The walls are of adobe with a square base of 0.4 m and 0.12 m height (Figure 2a shows the moment of building the walls), with 2 cm thick plaster layers inside and outside. The window has a size of 0.7 m² and has a simple glass and an iron frame; the door, with a wooden frame and galvanized sheet of iron, “calamina”, has a size of 1.89 m², and 5 cm of expanded polystyrene on the inner side; the false ceilings consist of a 4 mm thick plywood, with 5 cm of expanded polystyrene on top. The floor is made of earth that is levelled and rammed, and the roof is made of corrugated red fiber cement sheets, 4 mm thick. Figure 2b shows the moment of tightening of the fiber cement sheets to the wooden structure of the ceiling.

The attached greenhouse in the ME2 occupies an area of 8 m², and 18.68 m² of surface with alveolar polycarbonate sheets. Figure 2c shows the timber structure. The floor is simple concrete 0.1 m high, and the lower part of the walls is of adobe, 0.85 m high and 0.4 m wide. The 1.63 m² door has a wooden frame and alveolar polycarbonate sheet.



Fig. 2: Views of part of the construction process of the experimental modules, (a) adobe walls, (b) fiber cement roofs, and (c) wooden structure of the attached greenhouse (at ME2).

3. Methodology

The methodology of evaluation and thermal analysis of the experimental modules, ME1 without a greenhouse and ME2 with an attached greenhouse, begins with separately modeling both modules using the tools of the OpenStudio installed within the SketchUp environment to create the thermal zones and geometry in 3D, as shown at Figure 3a, with respect to the design of the constructed modules (Figure 3b).

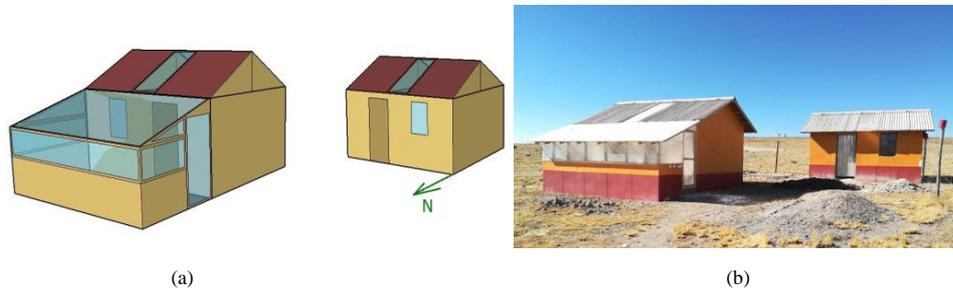


Fig. 3: (a) The designed modules: with (ME2) and without greenhouse (ME1), (b) The constructed modules

The ME1 has one thermal zone less than the ME2, due to the attached greenhouse at ME2 (Figure 4a). The other four thermal zones, equal for both modules, are the space of the modules below the false ceiling, (Figure 4b), and the three spaces generated in the attic: one is in the center formed by the roof skylights, false ceiling and sidewalls that enclose this space (Figure 4c), and the other two are at each side: at the east (Figure 4d) and west (Figure 4e). The green line in each of the figures represents the north. Subsequently, all surfaces are configured according to the construction element of the envelope and the file with the extension .idf, representing the data input file to EnergyPlus, is saved. Finally, the .idf file is opened, and in the EnergyPlus subprogram EP-Launch, the climate file is entered. In our case, that file was generated with the *Elements program* for the days from December 2 to 12, 2018, as a result of the registration of data with a Davis weather station, *Vantage Pro Plus*, installed on-site at Imata. Variables are entered with the IDF-Editor of the Ep-Launch subprogram.

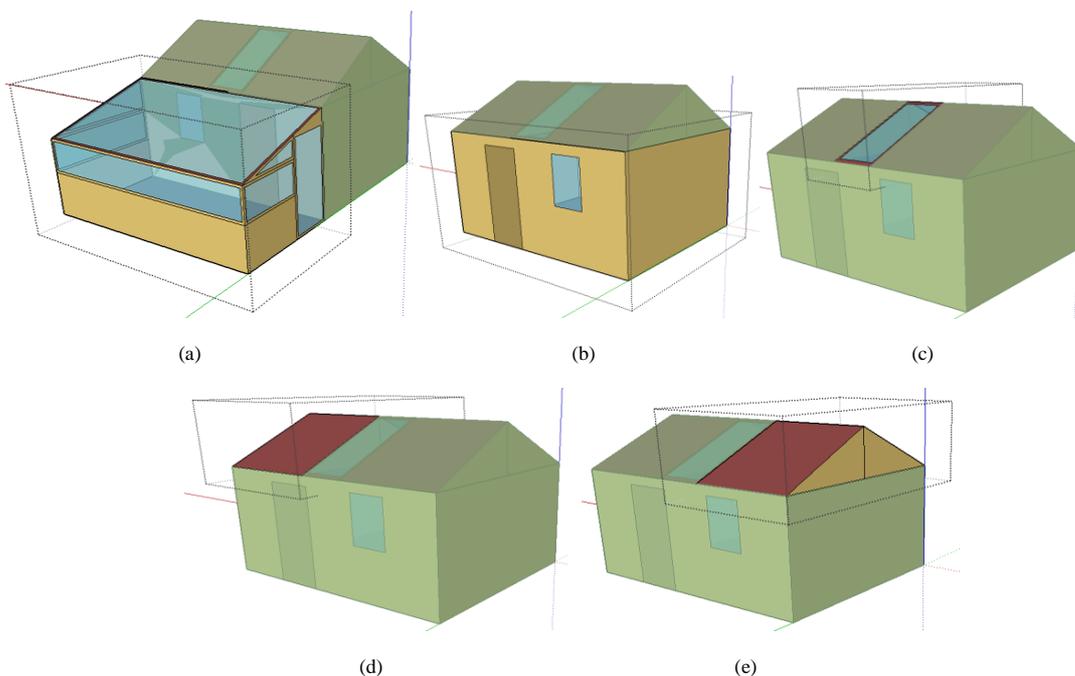


Fig. 4: Thermal zones (in dotted cubes) created in the experimental modules ME1 and ME2. (a): attached greenhouse at ME2; four common thermal zones: (b): interior, (c): center attic, (d): east attic, and (e): west attic. The green line indicates north.

The temperatures inside the experimental modules and the greenhouse were measured every five minutes with Pt100 temperature sensors connected to a four-channel Onset Hobo data logger. To determine, experimentally, the thermal contribution of the greenhouse to the interior temperature of the ME2, the temperature was measured with four different configurations during the days of December 2 to 12, as indicated in Table 1. The entrance door from the outside to the greenhouse remained closed and only opened for the data download, the door and window of ME2 were opened or closed according to the respective configuration, from 8:00 AM to 5:00 PM. ME1 remained closed and only for data download was the door was opened. All these configurations are introduced as input variables to the IDF-Editor of the EnergyPlus, along with the thermophysical properties of the materials, such as density (kg m^{-3}), specific heat ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) and thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$); data taken from Standard EM.110, in addition to solar absorptivity, air exchanges, and infiltrations. Once the output variables have been defined in the IDF-Editor, the EnergyPlus is executed with the EP-Launch using the trial and error methodology, and the results obtained from the simulation are compared hourly with the experimentally recorded data.

Tab. 1: Measurement configurations in the experimental modules (ME) from December 2 to 12, 2018. From 8:00 AM to 5:00 PM the door or window remained open or closed according to the respective configuration.

Dates	Measurement configuration of the experimental modules (ME)	
	ME1 (without greenhouse)	ME2 (with greenhouse)
Dec 2 to 4	Door and window closed	Door and window closed
Dec 5 to 6		Door and window open
Dec 7 to 9		Door open and window closed
Dec 10 to 12		Door closed and window open

4. Results

Figure 5 shows the experimental and simulated data of the indoor air temperature of ME1 and ME2 (hereinafter black dotted line for the experimental data and black solid line for the simulated), along with the outside temperature (hereinafter solid gray line) for the closed door and closed window configuration of the ME2 (represented in the image with black color) for the days from December 2 to 4. On the daily average, the indoor air temperature of ME1 was 8.2 °C and of ME2, 12 °C, i.e., the temperature in ME1 was 3.8 °C lower than in ME2. The average outside air temperature was 2.1 °C and the daily average of the difference between the experimental and the simulated temperature was 0.3 °C. Between 9:00 AM and 6:00 PM, on average, the temperature in ME1 is 2.8 °C higher than the outside temperature (Figure 5a), while for ME2 (Figure 5b), there is an average difference of 7 °C between inside and outside. The most notable difference occurs between midnight and 8:00 AM, specifically approximately 5:00 AM, where the average temperature difference between inside and outside was 12.6 °C for ME1, and 16.3 °C for ME2.

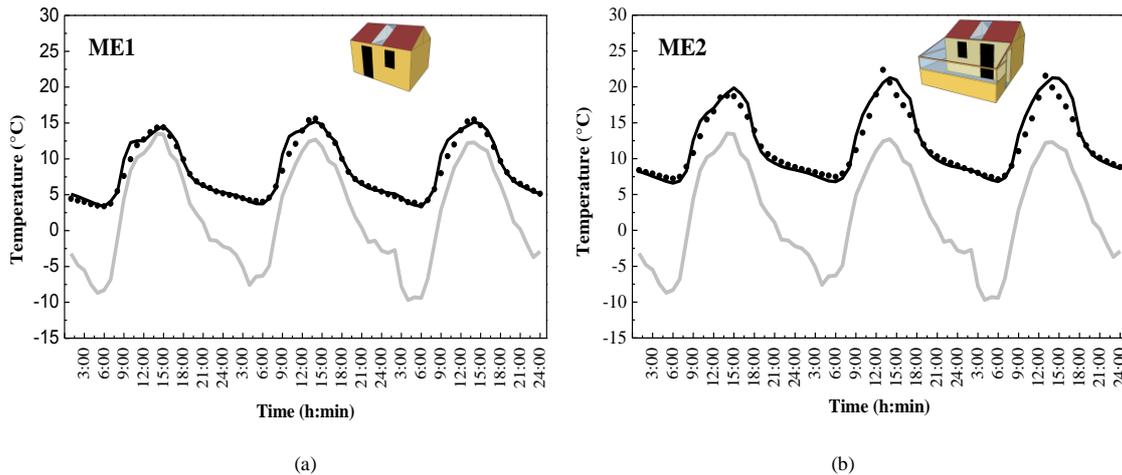


Fig. 5: Hourly temperature in the experimental modules (ME): indoor, simulated (solid black line) and experimental (dotted line), and outdoor (solid gray line); (a) without greenhouse ME1, (b) with greenhouse ME2; from December 2 to 4. The black color on the door and window of the image of ME indicate that they are closed.

Figure 6 shows the experimental and simulated data of the indoor air temperature of ME1 and ME2, along with the outdoor temperature for the open door and window configuration of ME2 from 8:00 AM to 5:00 PM (represented in the image with a white color), for the days from December 5 to 6. On average, the daily indoor air temperature of ME1 was 8.4 °C and of ME2, 14.1 °C, i.e., the temperature in ME1 was 5.7 °C lower than in ME2. The average of the difference between experimental and simulated temperature was 0.4 °C and the average outside temperature was 2.8 °C. For ME1 (Figure 6a), between 9:00 AM and 6:00 PM, the inside temperature was on average 2 °C higher than the outside temperature, while for ME2 (Figure 6b), there was an average difference of 9.8 °C between inside and outside. The most notable difference occurs between 24:00 and 8:00, specifically approximately 5:00 AM, where the average temperature difference between inside and outside was 12.1 °C for ME1, and 16 °C for ME2.

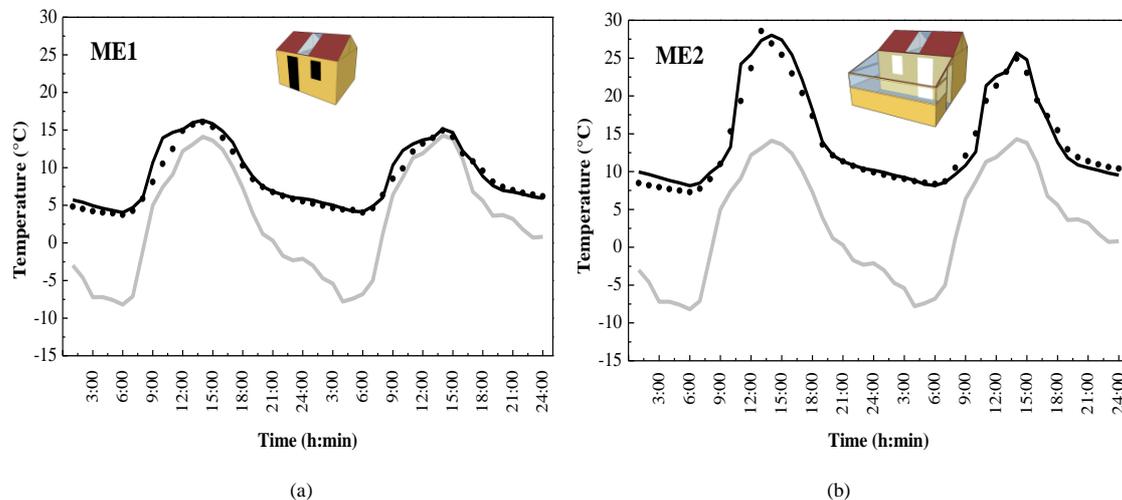


Fig. 6: Hourly temperature in the experimental modules (ME): inside, simulated (solid black line) and experimental (dotted line), and outside (solid gray line); (a) without greenhouse ME1, (b) with greenhouse ME2; from December 5 to 6. The black color on the door and window of the image of ME indicate closed, and white, open.

Figure 7 shows the experimental and simulated data of the indoor air temperature of ME1 and ME2, as along with the outdoor temperature, for the open door and closed window configuration (from 8:00 AM to 5:00 PM) of ME2 (represented in the image, white if open, and black if closed), for the days from December 7 to 9. On average, the daily indoor air temperature of ME1 was 10.7 °C and of ME2, 16.1 °C, i.e., the temperature in ME1 was 5.4 °C lower than in ME2, with an average daily difference of 0.1 °C between the experimental and simulated temperature. The average outdoor air temperature was 6.5 °C. For ME1 (Figure 7a), between 9:00 AM and 6:00 PM, the indoor temperature was, on average, 1.7 °C higher than the outside temperature, while for

ME2 (Figure 7b), there was an average difference of 9.2 °C between inside and outside. The most notable difference was observed between 24:00 and 8:00, specifically approximately 5:00 AM, where the average temperature difference was 9 °C for ME1, and 12.6 °C for ME2 between inside and outside.

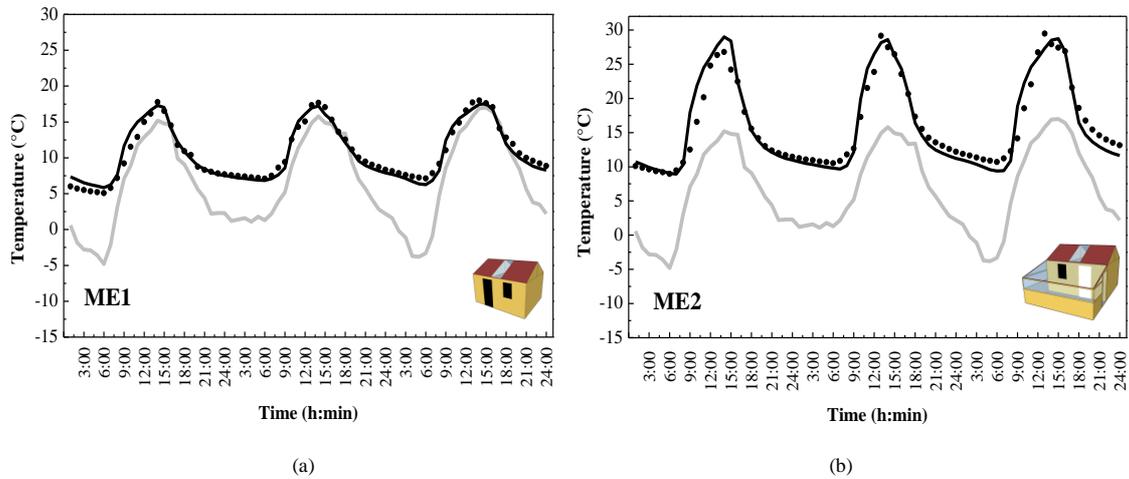


Fig. 7: Hourly temperature in the experimental modules (ME): indoor, simulated and experimental (solid black dotted lines), and outdoor (solid gray line); (a) without greenhouse ME1, (b) with greenhouse ME2; from December 7 to 9. The black color on the door or window of the image of ME indicate closed, and white, open.

Finally, Figure 8 shows the experimental and simulated data of the indoor air temperature of ME1 and ME2, along with the outdoor temperature for the closed door and open window configuration (from 8:00 AM to 5:00 PM) of ME2 (represented in the image with a white color if open, and black, if closed), for the days from December 10 to 12. On a daily average, the indoor air temperature of ME1 was 12.1 °C and for ME2, 16.2 °C; i.e., the temperature in ME1 was 4.1 °C lower than in ME2, with an average daily difference of 0.1 °C between experimental and simulated temperatures. The average outdoor air temperature was 7.6 °C. In the case of ME1 (Figure 8a), between 9:00 AM and 6:00 PM, the indoor temperature was on average 1.8 °C higher than the outside temperature, while for ME2 (Figure 8b), there was an average difference of 6.6 °C between inside and outside. The most notable difference occurs between 24:00 and 8:00, specifically approximately 5:00 AM, where the average temperature difference between inside and outside was 9.8 °C for ME1, and 13.4 °C for ME2.

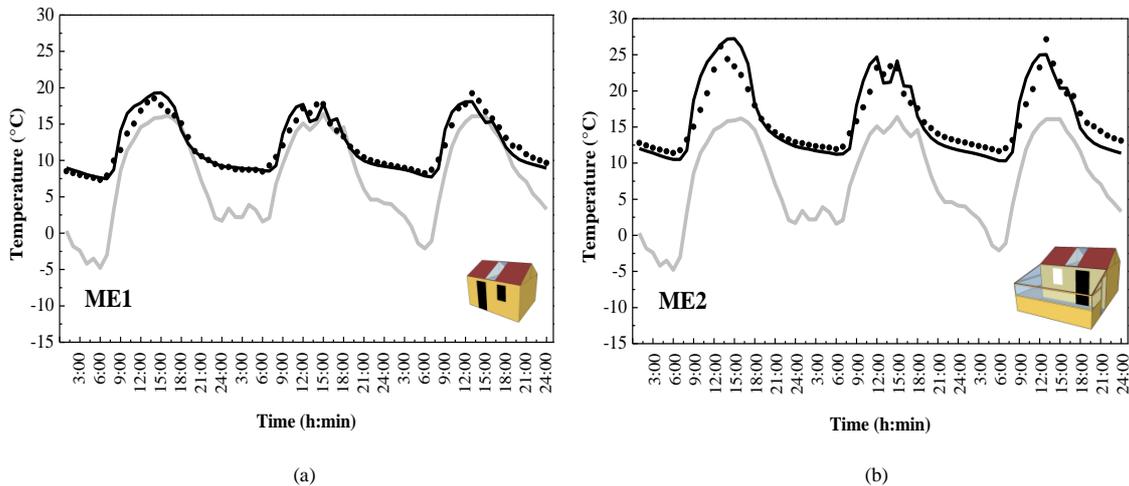


Fig. 8: Hourly temperature in the experimental modules (ME): inside, simulated and experimental (solid black and dotted lines), and outside (solid gray line) (a) without greenhouse ME1, (b) with greenhouse ME2; from December 10 to 12. The black color on the door or window of the image of ME indicates closed, white indicates open.

The EnergyPlus software also allows the determination of the energy required for heating (E_r) in the case that a constant interior design temperature is wanted. For the case under study, a design temperature of 15 °C had been considered, corresponding to an adaptive thermal well-being model for an Altoandina region (Molina et al., 2019b). The results are presented in Table 2.

It is noteworthy that the MEs do not have an active heating facility, so no experimental validation of these simulated data could be done. It is also difficult to compare the results of the different configurations implemented during the evaluation period of December 2 to 12, 2018, in particular because the average outside temperature increased from 2.1 °C to 7.6 °C during that time. In addition, ME1 is a housing module that is improved if compared with the typical houses in Imata, which do not have a suspended ceiling with a skylight. Nevertheless, the data clearly show that the greenhouse results in a significant reduction of the energy needed for heating, of approximately 30 %.

Tab. 2: Required heating energy (Er) in the experimental modules (ME) without and with greenhouse (ME1 and ME2) considering a thermal well-being design temperature of 15 ° C.

Dates	Er ME1 (kWh day⁻¹)	Er ME2 (kWh day⁻¹)
Dec 2-4	47.67	31.41
Dec 5-6	30.89	20.74
Dec 7-9	33.89	24.50
Dec 10-12	26.35	18.64

5. Conclusions

Taking advantage of the abundant solar radiation in the Andean areas of Peru, a greenhouse attached to a house contributes significantly to the thermal well-being inside the house. Comparing different configurations regarding the opening and closing of the window and the door connecting the greenhouse and the housing module, the best results were obtained with the door and window open during the daytime. An average temperature increase of 5.7 °C was obtained experimentally in the housing model due to an attached greenhouse. The same result was obtained with a simulation, validating the simulation model. Energetically, if a constant design interior temperature of 15 °C would have been required, the simulation indicates that the greenhouse would have produced a daily energy saving for heating of approximately 30 %.

6. Acknowledgments

This work was carried out under the auspices of Peruvian National Council for Science and Technology (CONCYTEC) under the contact N° 024-2016-FONDECYT and the Vice-Presidency for Research of the National University of Engineering (VRI-UNI). One of us (J.M.) thanks FONDECYT for a doctoral scholarship within the Agreement No. 05-2018-FONDECYT/World Bank.

7. References

- Abanto, G.A., Karkri, M., Lefebvre, G., Horn, M., Solis, J.L., Gómez, M.M., 2017. Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material. *Case Stud. Constr. Mater.* 6, 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.02.001>
- Alghoul, S.K., Rijabo, H.G., Mashena, M.E., 2017. Energy consumption in buildings: A correlation for the influence of window to wall ratio and window orientation in Tripoli, Libya. *J. Build. Eng.* 11, 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.04.003>
- Asdrubali, F., Cotana, F., Messineo, A., 2012. On the Evaluation of Solar Greenhouse Efficiency in Building Simulation during the Heating Period. *Energies* 5, 1864–1880. <https://doi.org/10.3390/en5061864>
- Bakos, G.C., Tsagas, N.F., 2000. Technology, thermal analysis and economic evaluation of a sunspace located in northern Greece. *Energy Build.* 31, 261–266. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00019-5)

- Bataineh, K.M., Fayez, N., 2011. Analysis of thermal performance of building attached sunspace. *Energy Build.* 43, 1863–1868. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.030>
- Chiesa, G., Simonetti, M., Ballada, G., 2017. Potential of attached sunspaces in winter season comparing different technological choices in Central and Southern Europe. *Energy Build.* 138, 377–395. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.067>
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., Buhl, W.F., Huang, Y.J., Pedersen, C.O., Strand, R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witte, M.J., Glazer, J., 2001. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy Build.*, Special Issue: BUILDING SIMULATION'99 33, 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- GIZ-MVCS, 2015. Abrigando hogares - experiencias con medidas de confort térmico en viviendas rurales altoandinas. Disponible en: <https://issuu.com/melissakatherynpalma/docs/abrigando-hogares> (accessed 7.23.19)
- Gómez, M., Espinoza, R., Horn, M., 2016. Energy for unserved populations, in *Guide towards a sustainable energy future for the Americas*, IANAS, Editor. IANAS-IAP: México. p. 38-61.
- González, A., 2012. Estudio de la temperatura en un invernadero adosado con orientación norte en la Patagonia Andina. *ASADES, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/73519> (accessed 8.1.19)
- Ignjatović, D., Jovanović Popović, M., Kavran, J., 2015. Application of sunspaces in fostering energy efficiency and economical viability of residential buildings in Serbia. *Energy Build.*, *Renewable Energy Sources and Healthy Buildings* 98, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.049>
- Li, A., Huang, L., Zhang, T., 2017. Field test and analysis of microclimate in naturally ventilated single-sloped greenhouses. *Energy Build.* 138, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.047>
- Mihalakakou, G., 2002. On the use of sunspace for space heating/cooling in Europe. *Renew. Energy* 26, 415–429. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00138-0)
- Molina, J.O., 2018. Uso del programa Energyplus para la simulación del consumo energético de un módulo bioclimático ubicado en Imata, Arequipa a 4519 msnm. Tesis de Título. Universidad Nacional de Ingeniería. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/17626> (accessed 6.22.19)
- Molina, J.R., 2016. Evaluación bioclimática de una vivienda rural alto andina de la comunidad de San Francisco de Raymina de Ayacucho. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Ingeniería. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/5327> (accessed 5.10.19)
- Molina, J.O., Espinoza, R.E., Horn, M.J., Gómez, M.M., 2019. Thermal performance evaluation of isolation and two active solar heating systems for an experimental module: A rural Peruvian case at 3700 masl. *J. Phys. Conf. Ser.* 1173, 012003. DOI:10.1088/1742-6596/1173/1/012003
- Mottard, J.M., Fissore, A., 2007. Thermal simulation of an attached sunspace and its experimental validation. *Sol. Energy* 81, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.07.005>
- Müller, E., 2008. Análisis térmico y recomendaciones para el diseño de casas solares pasivas y la difusión de viviendas sustentables. II Congr. Bras. Energ. Sol. E III Conferência Reg. Lat.-Am. ISES - Florianópolis, 18-21 noviembre 2008 - Brasil.
- MVCS, 2014. Norma EM.110 Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética. Reglam. Nac. Edificaciones. Disponible en: <http://www.construccion.org.pe/normas/rne2012/rne2006.htm> (accessed 7.4.19).
- Olivet, G., Arcuri, N., De Simone, M., Bruno, R., 2012. Solar heat gains and operative temperature in attached sunspaces. *Renew. Energy* 39, 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.010>
- Presidencia del Concejo de Ministros, 2019. Plan Multisectorial ante Heladas y Friaaje 2019 - 2021. URL <https://www.gob.pe/institucion/pcm/campa%C3%B1as/56-plan-multisectorial-ante-heladas-y-friaaje-2019-2021> (accessed 7.23.19)
- Ramos, E., Ocupa, D., Molina, J., Natividad, J., Espinoza, R., 2013. Acondicionamiento térmico para edificaciones rurales altoandinas. XX Simposio Peruano de Energía Solar. Tacna, 11-15 noviembre - Perú.

Schoenau, G.J., Lumbis, A.J., Besant, R.W., 1990. Thermal performance of four sunspaces in a cold climate. *Energy Build.* 14, 273–286. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90090-6)

SENAMHI, 2003. Atlas Solar - Proyecto PER/98/G31: Electrificación rural a base de energía fotovoltaica en el Perú. Lima. Disponible en: http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/80bib_arch.pdf (accessed 6.12.19)

SENAMHI-FAO, 2010. Atlas de heladas del Perú - Convenio de Cooperación Técnica Interinstitucional. Lima. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-1.pdf> (accessed 8.1.19)

Theurl, M.C., Hörtenhuber, S.J., Lindenthal, T., Palme, W., 2017. Unheated soil-grown winter vegetables in Austria: Greenhouse gas emissions and socio-economic factors of diffusion potential. *J. Clean. Prod.* 151, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.016>

U.S. Department of Energy's, n.d. EnergyPlus. Disponible en: <https://energyplus.net/> (accessed 3.6.19).

ANEXO 5. Publicación 2: XXVII Simposio Peruano de Energía Solar 2020.

Evaluación Térmica de modificaciones en las envolventes de Módulos de Vivienda Experimentales ubicados en el centro poblado de Imata (4519 msnm), Arequipa

Martín Ponce, Juan O. Molina, Manfred J. Horn, Mónica M. Gómez

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Lima, Perú

Email: mponceg@uni.pe

Resumen — El presente trabajo muestra el diseño y la evaluación de dos módulos de vivienda experimentales, que inicialmente fueron construidos semejantes a las casas existentes en el centro poblado de Imata, Arequipa a 4519 msnm. El objetivo principal fue determinar el aporte térmico y energético de los diferentes cambios introducidos paulatinamente en los módulos. Para este fin se registró la temperatura en el interior de los módulos y los datos meteorológicos en una estación meteorológica. Finalmente, se comparó los resultados obtenidos con los valores obtenidos por simulación con el programa EnergyPlus.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, en las zonas Altoandinas con elevaciones mayores a 4000 msnm, las temperaturas registradas están por debajo de los 0°C en la noche, con valores que pueden llegar hasta los -19°C durante las “heladas” (temperatura por debajo de 0°C) en época de invierno, causando muchas afecciones respiratorias, en su mayoría, a las poblaciones más vulnerables como son los ancianos y niños. Imata es considerada una de las zonas más frías de la región Arequipa, sin embargo recibe una gran irradiación solar que es, en promedio, mayor a 6 kWh.m⁻².día⁻¹ [1]. En el presente estudio se determinó el aporte térmico y energético de diferentes cambios realizados paulatinamente en las envolventes de dos módulos experimentales de vivienda, por medio de la simulación con el software EnergyPlus.

II. METODOLOGÍA

El método empleado comprendió el análisis térmico de dos módulos de vivienda experimentales M1 y M2, que fueron construidos con el mismo tipo de envoltorio, representativo de la zona, es decir compuesta de paredes de adobe, techo de calamina metálica, ventana de un solo vidrio con un marco metálico y puerta metálica. El diseño y modelamiento de estos módulos ha sido previamente publicado (artículo del CIT) [1]. En el presente trabajo se reporta la construcción y la cuantificación energética de las variaciones sucesivas de los componentes constructivos realizadas en cada uno de los módulos. El modelamiento de los módulos se realizó con el programa EnergyPlus, con el apoyo de los programas OpenStudio y SketchUp [2]. Los datos del clima se obtuvieron usando el programa Element con los datos registrados de la estación meteorológica Davis (Vantage Pro Plus), instalada en la azotea de la municipalidad de Imata.

La instrumentación de los módulos consistió en sensores de temperatura Pt100 empotrados a 3 cm de las superficies interiores y exteriores de las paredes, subsuelo y cámaras de aire en el ático. Para el registro de la temperatura en el ambiente

interior de los módulos se empleó una microestación, marca Hobo. Para las simulaciones, las propiedades termofísicas de los materiales, como el calor específico, densidad y conductividad térmica se tomaron de la Norma Técnica Peruana EM.110.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Figura 1 muestra la representación actual (dibujada en Sketchup) de la disposición relativa de ambos módulos de vivienda experimentales, cerca al Tambo de Imata. La temperatura promedio diario del aire interior del M1 al inicio de su construcción fue de 3.5 °C; después de hacer varios cambios en su envoltorio, su temperatura fue de 10.3 °C, siendo la temperatura promedio del aire exterior 3.7 °C, evidenciando un aporte térmico de 6.8 °C en el ambiente interior del módulo. En tanto para el M2, su temperatura fue de 3.4 °C al inicio, luego de los cambios, fue 14.6 °C, con un aporte de 11.2 °C en su ambiente interior y con 4.3 °C por encima de M1, debido al aporte del invernadero adosado.

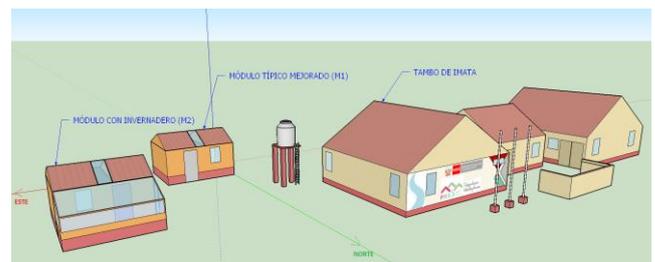


Fig. 1 Módulo típico (M1) y módulo con invernadero (M2) (izquierda), Tambo de Imata (derecha).

REFERENCIAS

- [1] Molina, J. O., Lefebvre, G., Horn, M., & Gómez, M. M. (2020). Design of an experimental bioclimatic module obtained from the analysis of thermal simulations for the community of Imata (4519 masl), located in Arequipa, Perú. *Información Tecnológica*, 31(2), 173–185.
- [2] Molina Fuertes, J. O. (2018). Uso del programa Energyplus para la simulación del consumo energético de un módulo bioclimático ubicado en Imata, Arequipa a 4519 msnm. Universidad Nacional de Ingeniería. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/17626>.

Palabras clave: energía solar, envolventes, simulación térmica.

ANEXO 6. Publicación 3: Revista TECNIA, 2021.

EVALUACIÓN TÉRMICA DE MODIFICACIONES EN LAS ENVOLVENTES DE MÓDULOS EXPERIMENTALES UBICADOS EN EL CENTRO POBLADO DE IMATA (4519 MSNM), AREQUIPA

THERMAL EVALUATION OF THE MODIFICATIONS IN THE ENVELOPES OF EXPERIMENTAL MODULES LOCATED IN THE COMMUNITY OF IMATA (4519 MASL), AREQUIPA

Martin Ponce-Gonzales ¹, Juan Molina-Fuertes ¹

Manfred Horn-Mutschler ^{1*}, Mónica Gómez-León ¹

¹Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido (Received): 01 / 03 / 2021 Aceptado (Accepted): 18 / 06 / 2021

RESUMEN

Este trabajo analiza los diferentes aportes térmicos y energéticos dinámicos de las diferentes propuestas de modificaciones realizados en las envolventes de dos módulos experimentales de vivienda construidos en el centro poblado de Imata, Arequipa a 4519 msnm. Los módulos fueron construidos con características constructivas del lugar y diseño típico, posteriormente se realizaron modificaciones como cambiar el material de cubierta del techo, enlucido de las paredes de adobe con yeso, colocación de claraboyas en el techo y falso techo, aislamiento del falso techo, y construcción de un invernadero adosado en uno de los módulos. El registro de datos consistió en medir la temperatura del aire interior de los módulos e invernadero adosado, además, del registro de datos meteorológicos exteriores, utilizando una estación Davis ubicada en lo alto de la municipalidad de Imata. La temperatura media diaria del aire interior del módulo sin invernadero (M1) inicialmente fue de 3,1 °C, siendo la temperatura media diaria exterior 0,61 °C; con las modificaciones de las envolventes, la temperatura media del aire interior de M1 fue 10 °C, aportando en promedio al interior 6,9 °C; para el módulo con invernadero (M2), la temperatura media del aire interior fue de 14,6 °C, aportando en promedio al interior 11,5 °C con una diferencia promedio de 5,17 °C por encima de M1. Los resultados obtenidos demuestran el aporte de las modificaciones y técnicas bioclimáticas implementadas como el caso del invernadero adosado que para las zonas Altoandinas por su potencial solar se presentan idóneos y eficaces.

Palabras Clave: Energía Solar, Envolventes, Simulación térmica, Módulos experimentales.

ABSTRACT

This paper analyzes the different thermal and dynamic energy contributions of the different proposals for modifications made in the envelopes of two experimental housing modules built in the town of Imata, Arequipa at 4519 meters above sea level. The modules were built with constructive characteristics of the place and typical design, later modifications were made such as changing the roof covering material, plastering the adobe walls with plaster, placing skylights on the ceiling and false ceiling, insulation of the false ceiling, and construction of a greenhouse attached to one of the modules. The data recording consisted of measuring the indoor air temperature of the modules and attached greenhouse, in addition to the outdoor meteorological data recording using a Davis station located at the top of the Imata municipality. The average daily indoor air temperature of the module without greenhouse (M1) was initially 3.1 °C, the average daily outdoor temperature being 0.61 °C; With the modifications of the envelopes, the average temperature of the interior air of M1 was 10 °C, contributing an average of 6.9 °C to the interior; For the module with greenhouse (M2), the mean indoor air temperature was 14.6 °C, contributing an average of 11.5 °C indoors with an average difference of 5.17 °C above M1. The results obtained demonstrate the contribution of the bioclimatic modifications and techniques implemented, such as the case of the attached greenhouse, which are suitable and effective for the High Andean areas due to their solar potential.

Keywords: Solar energy, Envelopes, Thermal simulation, Experimental modules.

¹ Corresponding author.:
E-mail: mhorn@uni.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

En las zonas Altoandinas de Perú, con altitudes mayores a 4000 msnm, se dan climas muy particulares,

con promedios de oscilaciones térmicas anuales mayores a 15 °C, promedios de temperaturas mínimas bajo 0 °C situaciones conocidas como heladas y un potencial solar incidente promedio anual mayor a 6 kWhm⁻²día⁻¹ [1]. Todos los años estos fenómenos climatológicos ocurren entre los meses de abril a setiembre y se ven afectadas las poblaciones Altoandinas en alto riesgo (niños menores de 5 años y adultos mayores de 65 años), sea por la condición social de pobreza y pobreza extrema, la nutrición o ubicación geográfica, actividades como la agricultura, ganadería y educación, por esto el Gobierno Peruano ha priorizado la inclusión y protección de las poblaciones más vulnerables a estos fenómenos [2].

El 2016, la población en alto riesgo frente a las heladas fue más del 30% según el Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI) [3], el 2017 hubo 312 personas fallecidas a causa de las bajas temperaturas, Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) [4] y para la Defensoría del Pueblo el 2018 hubo 182 personas fallecidas por las heladas y friaje [5].

Las mayores ganancias de calor al interior de las viviendas es debida por la combinación de los efectos del clima y las características termo-físicas de los materiales que componen la envolvente [6], se considera también criterios bioclimáticos como la ubicación, orientación, distribución y geometría [7], estos factores contribuyen en obtener un ambiente saludable para alcanzar el bienestar térmico dentro de la vivienda. En las zonas Altoandinas la elección de los materiales no es la idónea, como es el caso de la “calamina metálica” que, por sus propiedades de buen conductor del calor no genera protección térmica, sin embargo, por a su bajo costo, fácil acceso, transporte e instalación, su uso se ha masificado.

En este aspecto, este trabajo aborda propuestas de modificaciones de la envolvente de dos módulos experimentales de viviendas Altoandinas con y sin invernadero adosado utilizando previamente la simulación térmica con *EnergyPlus*, para el análisis de su comportamiento térmico, siendo la evaluación del incremento de temperatura en el interior del módulo de acuerdo a diferentes configuraciones realizadas en diferentes períodos, el principal objetivo. Los datos se registraron utilizando una estación meteorológica Vantage DAVIS Pro Plus, datos logger y sensores de temperatura Pt100. Finalmente, los resultados analíticos del modelamiento y simulación de los módulos utilizando *EnergyPlus* fueron validados con la experimentación tomando como referencia la temperatura del aire interior.

2. ANTECEDENTES

Desde el 2009 en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), la Facultad de Ciencias y el Centro de Energías Renovables (CER-UNI), se desarrollan trabajos de investigación relacionado al diseño Bioclimático y bienestar térmico, enfocados en mejorar las condiciones térmicas de habitabilidad de las poblaciones Altoandinas con el objetivo de lograr incrementos de la temperatura del aire interior a partir de la evaluación y análisis de prototipos de viviendas y módulos experimentales construidos *in situ, a alturas*, mayores de los 3500 msnm priorizando el aprovechamiento del potencial solar de dichas zonas. Varios de estos estudios en su etapa de diseño se apoyan en la modelación y simulación térmica-energética utilizando el *EnergyPlus* y sus complementos el *SketchUp* y *OpenStudio*.

El 2014 el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS), promulgó la Norma Técnica Peruana EM.110 “Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética” [8], refiriendo su aplicación voluntaria a las nuevas construcciones y la remodelación, refacción y acondicionamiento de edificaciones existentes según la ley establecida 29090, para el ámbito rural y urbano del país. La norma establece parámetros técnicos de diseño para el confort térmico y lumínico de acuerdo a criterios bioclimáticos para la construcción; su elaboración ha sido adaptada al medio local tomando como referencias normas extranjeras de Argentina, México y España. Se dispone que la zonificación bioclimática del Perú consiste en nueve zonas e infiere para cada uno de ellas el cumplimiento de transmitancias térmicas máximas para piso, paredes, y techo, de no ser así, el proyecto será considerado no viable. El mismo año se publicó el libro “Abrigando hogares” del MVCS-GIZ cuya finalidad es que los pobladores rurales adopten determinadas técnicas y puedan replicarlas en su vivienda como el restaurar y mejorar su envolvente con materiales de la zona; estas actividades engloban a las autoridades locales, regionales y gobierno central que conjuntamente con la academia y la población, se alcancen los objetivos necesarios de mejorar la calidad de vida del poblador Altoandino [9].

El estudio precedente de los módulos experimentales de vivienda fue el trabajo realizado en el año 2018 [10], donde, se realizó el estudio de 5 configuraciones de módulos diferentes utilizando *EnergyPlus*, añadiendo diferentes componentes bioclimáticos al diseño inicial. Se realizaron simulaciones para obtener los diferentes comportamientos óptimos de temperatura, energía e intercambios de aire, a partir de data del clima para Imata de un año típico meteorológico generado con el programa *Meteonorm*. Dos de las configuraciones de

módulos se construyeron el mismo año de su estudio, la cual sirvió de base para el presente estudio. Otro precedente más actual es el trabajo presentado al congreso mundial de energía solar de la ISES (*International Solar Energy Society*), desarrollado en Chile (2019), referente al estudio de evaluación por comparación y validación del aporte térmico del invernadero adosado para calentar el aire interior del módulo experimental [11].

2.1 DETALLES DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES (M1 Y M2)

Los módulos de vivienda experimentales sin invernadero (M1) y con invernadero (M2) fueron construidos en el centro poblado de Imata a 4519 msnm (latitud de 15° 50' 18,92" Sur y longitud de 71° 5' 28,46" Oeste), distrito de San Antonio de Chuca, provincia de Caylloma, región Arequipa, a una, al sur del Perú. Los módulos tienen las mismas dimensiones interiores de 3 m x 4 m x 2,3 m, con una superficie exterior de 18,24 m² por cada módulo; los componentes constructivos de cada módulo son los mismos con la diferencia que uno lleva un invernadero adosado, las paredes son de adobe enlucidos por el interior y exterior con yeso, el piso es de tierra, la puerta lleva marco de madera y hoja de calamina metálica, las ventanas son de marco de metal y vidrio simple (3 mm), techo de fibrocemento de 4 mm, falso techo de triplay de 4mm con poliestireno expandido de 0,05 m de espesor, claraboyas de policarbonato alveolar de 6 mm con filtro UV de 3,12 a ambos lados de las alas del techo y falso techo los cuales conforman un solo sistema de ganancia de calor solar directa, y un invernadero adosado a M2 sobre su pared norte, ver figura 1, adicional al falso se colocó poliestireno expandido detrás de la puerta metálica para eliminar el puente térmico, el ático cuenta con tres espacios de aire, una central que contiene las claraboyas del techo y falso techo, y dos laterales a la misma. El invernadero adosado a M2 es de un ala y de base rectangular de 4,8 m x 2 m, y altura de 1,65 m en la parte baja y 2.2 m en la parte alta, lleva una puerta de marco de madera y hoja de policarbonato de 1,26 m² la cual a la vez es la puerta de ingreso principal a M2. El material de cubierta del invernadero es de policarbonato alveolar cuya área traslucida es de 18,84 m², el piso de concreto de 0,10 m de espesor, y la altura del muro lateral que lo conforma es de 0,85 m, de adobe y enlucido con yeso 1,5 cm de espesor.



Fig. 1. Módulos experimentales de vivienda, M1 sin invernadero (atrás), M2 con invernadero (adelante).

3. METODOLOGÍA

La metodología comprende el análisis del estado inicial del módulo experimental denominado módulo típico, al cual posteriormente se le va adicionando en diferentes tiempos configuraciones de mejoras en su envolvente, tanto en paredes y techos, como el incluir un invernadero adosado a su pared norte y claraboyas en el techo. El invernadero contribuirá en la mejora del incremento de temperatura del aire interior del módulo típico. Para cada configuración de modificación realizada se determina su aporte térmico y energético utilizando simulación dinámica.

El procedimiento para la evaluación y análisis térmico de dos módulos de vivienda experimentales M1 y M2, referente a la parte energética, se inicia con el modelamiento en 3D de ambos módulos utilizando los programas *SketchUp* y *OpenStudio*, que son los complementos del programa de simulación *EnergyPlus*, creando las zonas térmicas y configurando las superficies de cada componente constructivo para finalmente crear el archivo de la arquitectura de los módulos con extensión IDF de entrada al programa *EnergyPlus*. Asimismo, modificando una plantilla del programa *Elements* a partir del ingreso de variables meteorológicas registradas, se generó un archivo de clima EPW de entrada al *EnergyPlus*, estos dos archivos son la base para el inicio de la simulación dinámica utilizando *EnergyPlus* [12]. La data meteorológica se registró con una estación Davis Vantage Pro Plus, instalada en la azotea de la municipalidad. Adicionalmente para las fechas en la cual la estación no registró datos, se consideró los datos generados por el programa *Solcast*, y el registro de datos *in situ* del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). El *EnergyPlus* es un programa de simulación energética de código abierto y uso gratuito, de propiedad del Departamento de Energía de los Estados Unidos, su entorno se basa en el desarrollo de modelos físico-matemáticos de balances energéticos que involucran flujos de masa y calor en estado dinámico, siendo el cálculo de la temperatura interior una de las variables de salida más solicitadas para el análisis del rendimiento térmico de edificios, además, del cálculo de las demandadas de energía de calefacción y refrigeración de un edificio. Su metodología de trabajo es por ensayo y error. Sus resultados tienen que ser validados con la parte experimental para posteriormente extrapolar los resultados a otras escalas de tiempo y análisis, e incluso realizar modificaciones respecto a adicionar o cambiar algún componente constructivo. En la tabla I se muestra el campo de entrada de las variables para las propiedades termo-físicas de los materiales utilizados en la

construcción de los módulos, así como, valores de las propiedades ópticas para la simulación en *EnergyPlus*.

TABLA I
Propiedades termo-físicas y ópticas de los materiales para la simulación.

Materiales	k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	ρ (kgm ⁻³)	Ce (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	ε	α
Adobe	0,349	1600	920	0,92	0,65
Calamina	237	2702	903	0,03	0,09
Tierra	0,52	2000	1840	0,88	0,70

Nota: k: conductividad térmica, ρ: densidad, Ce: calor específico, ε: emitanancia, α: absorptancia solar.

El registro de datos de temperatura del aire interior se realizó con sensores de temperatura Pt100 conectados a Datas loggers Onset Hobo de cuatro canales. También se utilizó Micro estaciones de la misma marca ubicándose aproximadamente en el centro geométrico del interior del módulo. Los módulos inicialmente fueron construidos con características similares en su envolvente, asemejándose a una vivienda de construcción típica actual de Imata, es decir, con paredes de adobe, techo de calamina metálica, ventana de un solo vidrio con un marco de metal, y puerta de calamina metálica con marcos de madera. A partir de este diseño inicial, paulatinamente se realizaron cambios en la envolvente de los módulos experimentales M1 y M2, siendo el primer cambio el techo, utilizando fibrocemento y policarbonato para la claraboya, se consideró un falso techo con una parte transparente y otra opaca, en la primera se utiliza policarbonato, y en la segunda triplay sobre el cual lleva poliestireno expandido; el cambio se realizó primero en el M1, mientras que el M2 no contenía el poliestireno expandido, siendo esta la única diferencia con M1, del registro datos y mediciones, se determina el aporte térmico del material aislante. En otra configuración se tiene el invernadero adosado a M2 en su pared norte, mientras que M1 no cuenta con invernadero, para los intercambios de aire entre el invernadero y el interior de M2, se realizaron algunas configuraciones de medida para diferentes estados de la puerta y la ventana que colindan con el invernadero, ambas abiertas o cerradas por completo; y ambas abiertas de 8:00 a 17:00 horas. Estas configuraciones se disponen como variables de entrada del *EnergyPlus*, así como las propiedades termo-físicas de los materiales usados durante todas las configuraciones de las envolventes de los módulos, como el calor específico (Jkg⁻¹K⁻¹), la conductividad térmica (Wm⁻¹K⁻¹) y la densidad (kgm⁻³). Para los valores de estos parámetros se tomaron de la Norma Técnica Peruana EM.110 "Confort térmico y lumínico con eficiencia energética", resaltando la importancia de cumplir con las transmitancias térmicas máximas en el techo, paredes y piso. Se simuló las configuraciones de los módulos experimentales, todas basadas en mejoras de aislamiento, captación de energía solar, y reducción de infiltraciones, de acuerdo con las técnicas

consideradas durante el proceso de cambios en la envolvente con la finalidad de alcanzar un óptimo bienestar térmico interior.

La tabla II muestra los períodos de mediciones de los módulos experimentales de acuerdo a los cambios realizados en las envolventes. En la etapa inicial se representa al módulo típico con techo de calamina metálica, puerta con marco de madera y hoja de calamina metálica, así como las paredes de adobe (M1T). En el período intermedio el módulo inicial presenta cambios en el techo, ahora es de fibrocemento y lleva claraboya de policarbonato alveolar, la puerta es de marco de madera y hoja de calamina metálica, las paredes son de adobe con enlucido de yeso en su interior, y el falso techo sobre la superficie opaca lleva poliestireno expandido (M1FP); en tanto que el segundo módulo presenta las mismas características del módulo descrito anteriormente pero sin la inclusión del poliestireno expandido (M2FSP), y el módulo con invernadero adosado en su pared norte representa el módulo 2 (M2I).

TABLA II
Etapas de medidas en los módulos experimentales.

Estados	Modificaciones en las envolventes	Fecha
Inicial	M1T	26-31 jul.
Intermedio	M1FP, M2FSP	31-oct. 06-nov.
Final	M2I	02-06 dic.

Nota: Por cada configuración efectuada se evaluó el incremento de la temperatura al interior del módulo.

La figura 3 muestra los instrumentos utilizados en la medición y registro de datos de temperatura del aire al interior del módulo y del invernadero, así como, la estación meteorológica Davis Vantage Pro Plus. Los datos se registraron cada 15 minutos como, temperatura del aire (°C), irradiancia solar (Wm⁻²), humedad relativa (%), dirección (°) y velocidad del viento (ms⁻¹). La letra (a) muestra el data logger Hobo (registrador de datos de 4 canales), la letra (b) muestra la estación meteorológica modelo Davis Vantage Pro Plus instalada en el cuarto nivel de la municipalidad de Imata y la letra (c) muestra una especie de cono hacia abajo y envuelto con papel reflectante el cual alberga un sensor de temperatura de aire Pt100 en su interior, con la finalidad que no le llegue la radiación solar y altere las mediciones.

Siendo el parámetro principal de análisis la temperatura en el interior de los módulos experimentales de vivienda, en la simulación y validación de la misma no se tomó en cuenta la simulación del invernadero para el estudio.

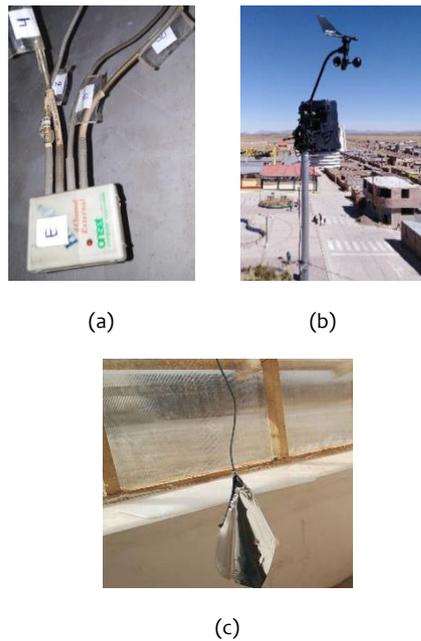


Fig. 3. Dispositivos de medidas. (a) Registrador de datos de temperatura, (b) Estación meteorológica, (c) Sensor de temperatura Pt100 protegido de la radiación solar.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presenta el análisis de los resultados de las etapas de medida según metodología de experimentación por comparación de los módulos experimentales. Se valida los datos analíticos de la simulación con data experimental *in situ* mediante comparación gráfica obteniendo buenos acuerdos entre lo medido y simulado. También se presenta el análisis de las condiciones meteorológicas externas para Imata según data del SENAMHI que cuenta con una estación en el propio lugar de parámetros como, la temperatura del aire, la humedad relativa, y la dirección y velocidad del viento. La irradiancia solar se analiza con data del programa Solcast.

4.1 TEMPERTAURA DEL AIRE EXTERIOR

La figura 4 resume los valores de la temperatura del aire promedio mensual correspondiente al año 2018 para el centro poblado de Imata, datos registrados por el SENAMHI que cuenta con una estación ubicada en el lugar de estudio [13]. Se muestra que desde el mes de mayo hasta setiembre la temperatura media presenta valores por debajo a 2 °C, siendo estos meses de heladas o bajas temperaturas, intensificándose en junio y julio, época de estiaje.

La figura 5 muestra la irradiancia solar promedio mensual para un año (2018) en Imata. Los valores analizados corresponden a la empresa de servicios de datos solares Solcast, que proporciona datos de energía e irradiancia solar reales y pronosticados, a nivel

mundial, utilizando satélites y mediciones de superficie [14], esta data se utilizó dada la carencia de datos *in situ* de este parámetro. Para asegurar el uso de la data del Solcast, esta se comparó con data registrada por la estación Davis que registra irradiancia solar global sobre superficie horizontal, resultando diferencias promedio no mayor de 8 Wm⁻², esto asegura una buena aproximación y representación de la incidencia solar en el propio lugar, por tal motivo, esta misma data se utilizó como parte de los parámetros meteorológicos requeridos para generar un archivo de clima EPW de entrada al EnergyPlus. Con estas consideraciones se representó la irradiancia solar anual, promedio mensual de Imata, observándose que para el mes de noviembre el promedio supera los 7 kWhm⁻²día⁻¹, con mínimos de 4,64 kWhm⁻²día⁻¹ para el mes de junio.

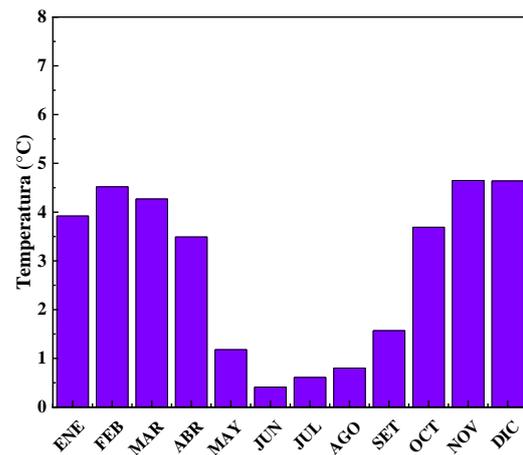


Fig. 4. Temperatura media mensual de Imata según datos del SENAMHI para el año 2018.

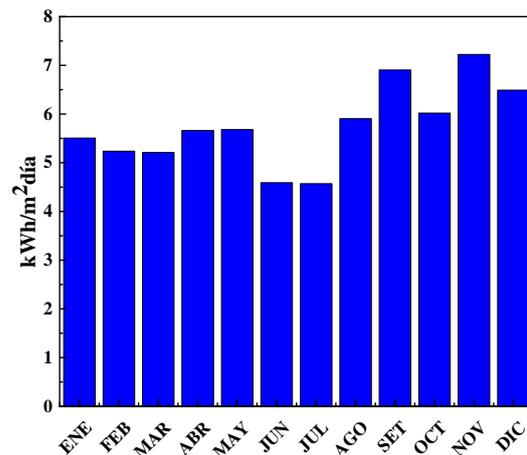


Fig. 5. Irradiancia solar media diaria mensual (kWhm⁻²día⁻¹) para Imata según archivo de Solcast para el año 2018.

La Tabla III resume los valores mensuales de temperaturas del año 2018, se muestra la temperatura diaria mensual, la media (T_m), media máxima (T_{máxm}), y media mínima (T_{mínm}); temperatura extrema mensual, máxima y mínima, donde, el mes que registra la temperatura más baja es julio, con una media de 1,2 °C, y temperaturas extremas mínimas de hasta -15,3 °C para el mes de setiembre, mientras que el mes de

diciembre presenta las temperaturas más altas con una media de 5,3 °C, y temperaturas extremas diarias mensuales de -10,9 °C y 17,5 °C. La oscilación térmica promedio anual fue de 16,2 °C. La temperatura media anual fue de 3,7 °C, las mínimas temperaturas se registraron entre las 4:00 y 5:30 horas del día y las máximas entre las 12:00 y 15:00 horas del día. Respecto

a las temperaturas mínimas extremas e incluso temperaturas medias mínimas, la problemática de las heladas para Imata se presentan durante todo el año y no solo en los meses de mayo a setiembre. Intensificándose en este caso para el año 2018, en los meses de agosto a setiembre y las temperaturas máximas no superan los 18 °C.

TABLA III
Temperatura del aire exterior para el centro poblado de Imata.

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Prom.
Tmáxm (°C)	10,8	11,2	11,0	12,4	11,5	9,2	9,2	10,7	13	13,2	15,3	13,9	11,8
Tmínm (°C)	-0,5	0,6	0,2	-3,0	-7,4	-6,3	-6,8	-8,0	-9,4	-4,5	-4,8	-3,3	-4,4
Tm (°C)	5,1	5,9	5,6	4,7	2,1	1,4	1,2	1,4	1,8	4,4	5,3	5,3	3,7
Temp. Máx. Extrema (°C)	13,9	13,9	13,3	14,5	14,3	11,7	13,7	12,4	15,5	16,1	17,1	17,5	14,5
Temp. Mín. Extrema (°C)	-3,9	-3,9	-4,8	-6,0	-13,2	-13,1	-11,1	-13,5	-15,3	-9,5	-9,3	-10,9	-9,5
Oscilación Térmica (°C)	11,3	10,7	10,9	15,4	18,8	15,5	16,0	18,7	22,4	17,7	20,0	17,1	16,2

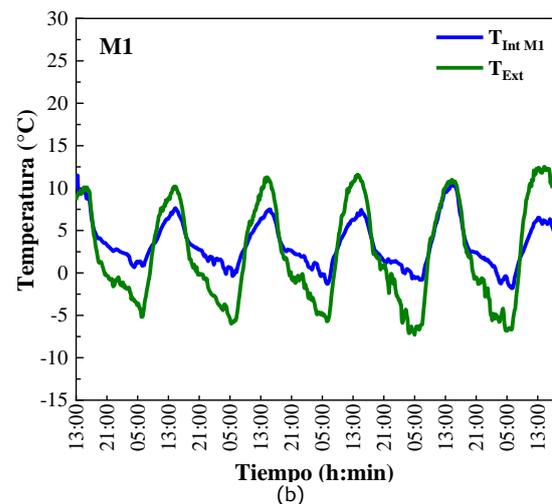
Nota: Temperaturas medias diarias (Tm), temperatura promedio máximo (Tmáxm), temperatura promedio mínimo diario (Tmínm), temperatura máxima extrema (Temp. Máx. Extrema) y temperatura mínima extrema (Temp. Mín. Extrema) mensuales para el año 2018.

4.2 COMPARACIÓN TÉRMICA DE M1 Y M2

La figura 6 muestra el comportamiento de la temperatura del aire interior (T_{Int}) de M1 (en todas las figuras, línea sólida azul), y la temperatura exterior (T_{Ext} , desde ahora línea sólida verde), en su diseño inicial, denominado módulo típico. Se muestra en la imagen (figura 6a), la forma y disposición de los materiales empleados como, paredes de adobe, techo de calamina, puerta con marco de madera y hoja de calamina metálica, y ventana de vidrio simple con marco metálico. La figura 6b corresponde a la etapa de medida del 26 al 31 de julio, donde, en promedio diario la temperatura del aire interior fue de 3,29 °C, con una temperatura promedio del aire exterior de 1,91 °C; presentándose en promedio, entre las 9:00 y 18:00 horas, una temperatura del aire interior, inferior al exterior en 2,5 °C. La diferencia más notoria se da durante las 24:00 y 8:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 5,3 °C, de ocurrencia alrededor de las 5:00 horas, la envolvente del módulo amortigua en promedio 3,5 °C de la temperatura interior con respecto de la exterior para el máximo que se dio entre las 14:30 y 15:30 horas para esos días de medición, mientras que para el mínimo la envolvente amortigua en 5,6 °C con respecto a la temperatura en el exterior, esto ocurrió entre las 5:00 y 6:30 horas.



(a)



(b)

Fig. 6. Imagen del M1T y su comportamiento térmico. (a) M1T en su estado inicial. (b) Temperatura horaria en el interior del M1, T_{IntM1} (línea sólida azul), temperatura del aire exterior T_{Ext} (línea sólida verde).

La figura 7 muestra el comportamiento de la temperatura del aire interior de M1 (T_{IntM1}) y M2 (T_{IntM2} , desde ahora línea sólida anaranjada), y la temperatura exterior (T_{Ext}). La figura 7a muestra el interior del ático de M1 cuya base lleva poliestireno expandido sobre

tableros de triplay configurando el falso techo, y la figura 7b una vista del falso techo del interior del módulo, mientras que M2 cuenta con falso techo solo de triplay. Para este caso el registro de medida fue del 31 de octubre al 3 de noviembre (figura 7c), donde, en promedio diario la temperatura del aire interior para M1 fue de 8,73 °C, y para M2 8,06 °C, siendo mayor la temperatura de M2 en 0,67 °C con respecto a M1, esta diferencia puede inferirse que es el aporte del poliestireno expandido de 0,05 m de espesor, con una temperatura promedio del aire exterior de 4,64 °C; presentándose en promedio entre las 9:00 y 18:00 horas una temperatura en el aire interior, superior a la exterior en 2,17 °C para M1, y 2,04 °C para M2, la diferencia más relevante se da entre las 3:00 y 6:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 7,8 °C para M1, y 6,46 °C para M2, de ocurrencia alrededor de las 5:00 horas.

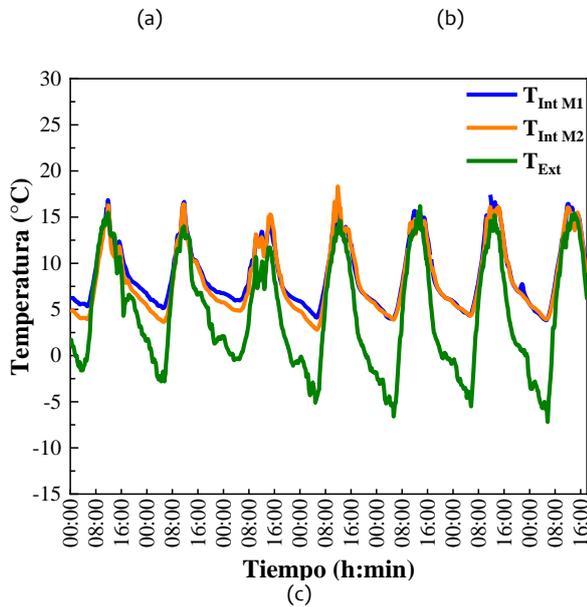


Fig. 7. Falso techo de los módulos y su comportamiento térmico. (a) Falso techo con divisiones de triplay y policarbonato, (b) Poliestireno expandido sobre falso techo, (c) Temperatura horaria en el interior de los módulos: $T_{Int M1}$ (línea sólida azul) y $T_{Int M2}$ (línea sólida anaranjada), temperatura exterior T_{Ext} (línea sólida verde), del 31 de octubre al 06 de noviembre.

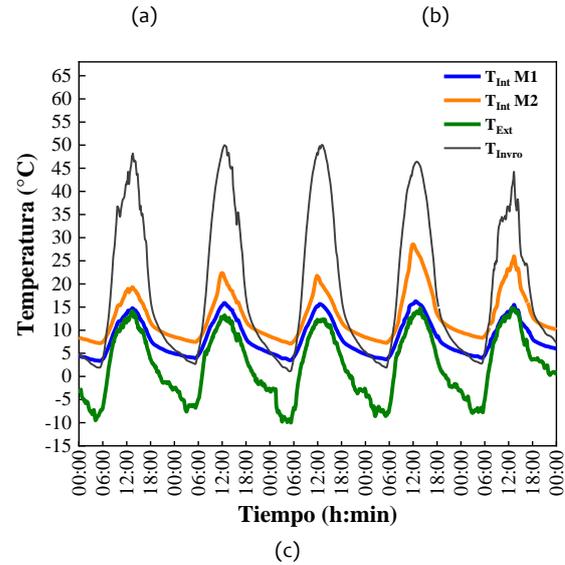


Fig. 8. Interior del invernadero y comportamiento térmico del invernadero y de los módulos. (a) Puerta y ventana que comunican el módulo y el invernadero, (b) ambiente del invernadero, (c) Temperatura horaria en el interior de los módulos, $T_{Int M1}$ (línea sólida azul) y $T_{Int M2}$ (línea sólida anaranjada), temperatura del invernadero T_{Invro} (línea sólida negra), temperatura exterior T_{Ext} (línea sólida verde), del 02 al 06 de diciembre.

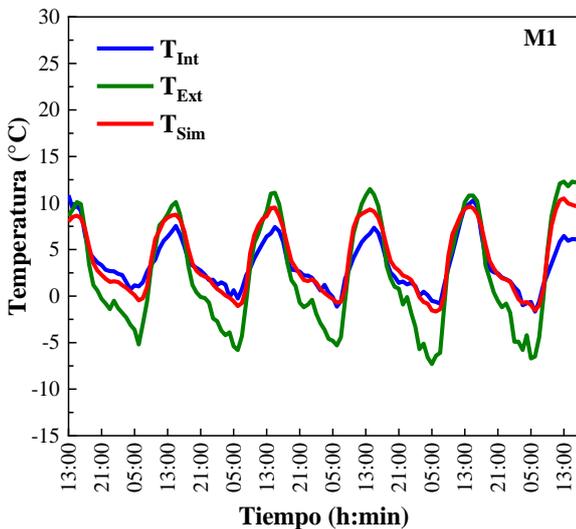
La figura 8 muestra el comportamiento de la temperatura del aire interior de M1 ($T_{Int M1}$) y M2 ($T_{Int M2}$), la temperatura exterior (T_{Ext}), y la temperatura del aire en el invernadero. La figura 8a muestra parte del interior de M2, que cuenta con el invernadero adosado en su pared norte (figura 8b). La data de esta modificación corresponde del 2 al 4 de diciembre (figura 8c), donde, en promedio diario la temperatura del ambiente interior de M1 fue de 8,2 °C, y de M2 12,02 °C, siendo la temperatura del aire de M2 mayor en 3,82 °C que M1, con temperatura promedio del aire exterior de 4,7 °C; presentándose en promedio entre las 8:00 y 18:00 horas, una temperatura del aire interior para M1 superior a la exterior en 2,9 °C, y para M2 en 6,97 °C, la diferencia más notoria se da entre las 3:00 y 6:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 12,78 °C para M1, y 16,45 °C para el M2, estos valores promedios se dan aproximadamente cerca de las 5:00 horas. Del 5 al 6 de diciembre, en promedio diario, la temperatura del aire interior de M1 fue 8,47 °C, y para M2 14,11 °C, de acuerdo a ello, se tiene que la temperatura del aire interior en M2 es mayor en 5,64 °C que M1, con una temperatura promedio del aire exterior de 2,89 °C. Para temperaturas promedio entre las 8:00 y 18:00 horas, el aire interior de M1 es superior al aire exterior en 2,13 °C, y para M2 en 9,92 °C, la diferencia más notoria se da

entre las 3:00 y 6:00 horas con una diferencia promedio de temperatura de 12,09 °C para M1 y 16,03 °C para M2, estos valores promedios se dan aproximadamente alrededor de las 5:00 horas, la temperatura máxima en el interior del invernadero en promedio diario fue de 47,1 °C, esto se dio entre las 13:0 y 14:00 horas, y la temperatura mínima fue de 2,1 °C en promedio diario dándose entre las 5:00 y 5:30 horas; en el cuarto y quinto día la temperatura en el interior del M2 aumenta tanto en los mínimos como en los máximos, esto es debido a que la puerta y la ventana que comunican el invernadero y la habitación del módulo están abiertas (ver figura 8a) en el horario de 8:00 a 17:00 horas.

4.3 VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN



(a)

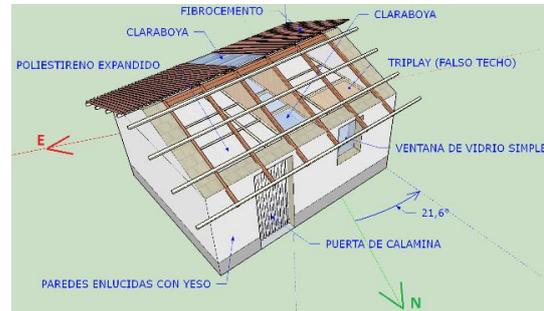


(b)

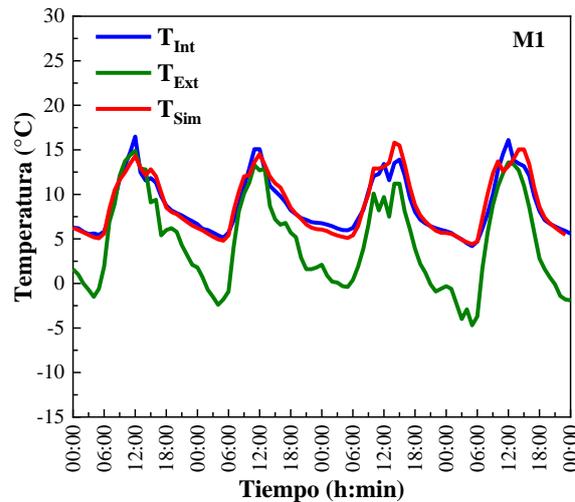
Fig. 9. Imagen del M1 típico y su comportamiento térmico simulado. (a) Representación del M1 en su estado inicial en SketchUp, (b) Temperatura horaria en el interior del módulo, T_{Int} (línea sólida azul), Temperatura simulada, T_{Sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{Ext} (línea sólida verde), del 26 al 31 de julio.

En la figura 9 se presentan los valores simulados y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del módulo M1 (desde ahora línea azul para los valores experimentales y roja para la simulada) y la temperatura exterior (desde ahora línea verde sólida), inicialmente representa el módulo tradicional, para los días del 26 al 31 de julio, en promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de

3,29 °C y la simulada 4,23 °C, con una diferencia promedio diario de 0,94 °C entre lo experimental y lo simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de 1,91 °C. Para el módulo M1 se muestra la orientación con respecto al eje del norte con un ángulo de rotación de 21,6 ° en dirección oeste.



(a)



(b)

Fig. 10. Imagen del M1 mejorado y su comportamiento térmico simulado. (a) Representación del M1 en su estado intermedio en SketchUp, (b) Temperatura horaria en el interior del módulo, T_{Int} (línea sólida azul), Temperatura simulada, T_{Sim} (línea sólida roja) y temperatura exterior T_{Ext} (línea sólida verde), del 31 de octubre al 03 de noviembre.

La figura 10 presenta los valores simulados y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del módulo M1, la temperatura exterior, del 31 de octubre al 3 de noviembre, el módulo presenta en su configuración el falso techo con el poliestireno expandido incorporado sobre la base del falso techo, en promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 8,75 °C y la simulada 9,11 °C, con una diferencia promedio diario de 0,36 °C entre lo experimental y lo simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de 4,65 °C. El ángulo de rotación del M1 respecto del norte es 21,6° en dirección oeste, observándose en la imagen (diseño en SketchUp) parte del ático con la construcción del falso techo y la incorporación del poliestireno expandido sobre la base de triplay.

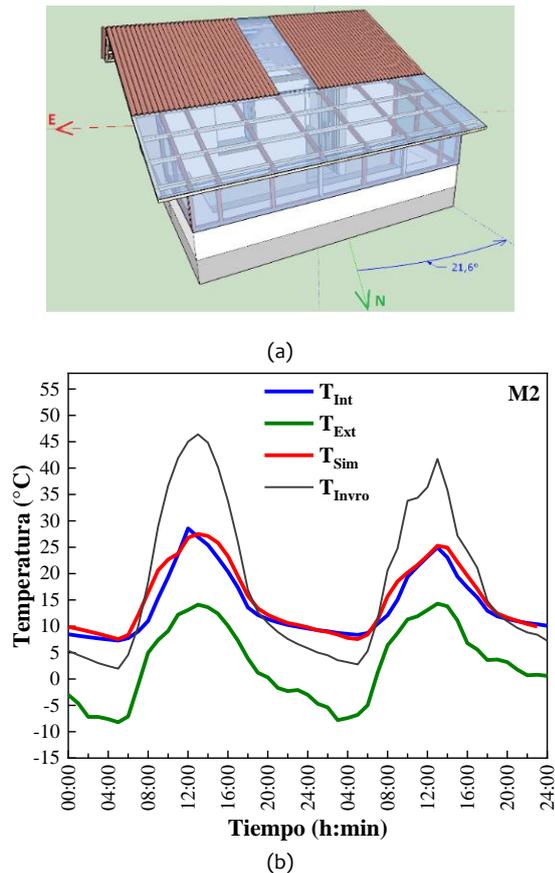


Fig. 11. Imagen del M2 con invernadero adosado y su comportamiento térmico simulado. (a) Representación del M2 en su estado final en SketchUp, (b) Temperatura horaria en el interior del módulo, T_{Int} (línea sólida azul), Temperatura simulada, T_{Sim} (línea sólida roja), temperatura exterior T_{Ext} (línea sólida verde) y temperatura en el invernadero, T_{Invro} (línea negra sólida), del 05 al 06 de diciembre.

En la figura 11 se presenta los valores simulados y experimentales de la temperatura en el ambiente interior del módulo M2, la temperatura exterior y la temperatura en el ambiente interior del invernadero (línea negra sólida), del 5 al 6 de diciembre, con una configuración de puerta y ventana abiertas del M2 en el horario de 8:00 a 16:00 horas, en promedio diario la temperatura experimental del ambiente interior fue de 14,06 °C y la simulada 15,1 °C, con una diferencia promedio diario de 1,1 °C entre lo experimental y lo simulado, con una temperatura promedio del aire exterior de 2,82 °C y temperatura promedio del aire interior del invernadero de 18,07 °C. El ángulo de rotación del M2 y el invernadero adosado en su pared norte es de 21,6 ° en dirección oeste, observándose en la imagen (diseño en SketchUp) tanto la puerta y la ventana del M2 abiertas.

4.4 COMPARACIÓN ENERGÉTICA

Se estimó la demanda energética de calefacción de acuerdo a las diferentes configuraciones y etapas de medida de los módulos experimentales, considerando

mantener constante la temperatura del aire a 15 °C según el modelo adaptativo de Humphreys y Nicol que, con una temperatura promedio anual de 2,8 °C y usando la data del SENAMHI se obtuvo para la temperatura neutra un valor de 15 °C. Para la etapa del 26 al 31 de julio, con el diseño inicial de módulo típico para M1, la demanda de energía fue de 38,7 kWhdía⁻¹, para la etapa del 31 de octubre al 3 de noviembre, con M1 ya mejorado con falso techo de triplay y sobre este poliestireno expandido, se obtuvo 13,5 kWhdía⁻¹, mientras que, para M2 con falso techo pero sin poliestireno expandido, su demanda de energía fue de 20,8 kWhdía⁻¹, obteniendo una diferencia de 7,3 kWhdía⁻¹ entre ambos módulos, valor que podría inferirse como ahorro de energía al mejorar el aislamiento utilizando poliestireno expandido. Para la etapa del 2 al 6 de diciembre se tiene configuraciones de puerta y ventana que comunican el interior de M2 con el interior del invernadero adosado, tal es así que, del 2 al 4 de diciembre las 24 horas se mantienen cerradas puerta y ventana de ambos módulos obteniéndose una demanda de 14,54 kWhdía⁻¹ para M1 y 10,41 kWhdía⁻¹ para M2; del 5 al 6 diciembre la puerta y ventana de M2 permanecen abiertas de 8:00 a 17:00 horas, y en M1 permanecen cerradas las 24 horas, obteniéndose 14,23 kWhdía⁻¹ para M1 y 10,29 kWhdía⁻¹ para M2. La menor demanda de energía de calefacción se obtiene para la configuración de medida del 5 al 6 de diciembre con un ahorro de energía entre M1 y M2 de 3,94 kWhdía⁻¹ debido al invernadero adosado sobre la pared norte de M2.

CONCLUSIONES

- En promedio anual para el año 2018 la oscilación térmica de la temperatura del aire exterior fue de 16,2 °C con un máximo de 22,4 °C en el mes de setiembre y un mínimo de 10,7 °C en el mes de febrero. También se alcanzó temperaturas máximas extremas de 17,5 °C en el mes de diciembre y temperaturas mínimas extremas de hasta -15,3 °C para el mes de setiembre. La energía solar media diaria que incide en Imata para el mismo año fue 5,75 kWhm⁻²día⁻¹, con un valor máximo de 7,24 kWhm⁻²día⁻¹ en el mes de noviembre. Estos resultados muestran lo paradójico que es el clima de Imata, en el día existe abundante radiación solar y en las noches temperaturas bajo 0 °C o de heladas, intensificándose en los meses de abril a setiembre.
- En el proceso de la implementación de las diferentes técnicas bioclimáticas utilizadas en las modificaciones realizadas de las envolventes de M1 y M2, como, las mejoras del aislamiento térmico y uso de sistemas de climatización solar pasiva directa o indirecta: tragaluces e invernaderos adosados, se logró incrementar las temperaturas del aire en los ambientes interiores de los módulos, 6,8 °C para M1 y 11,2 °C para M2.

- La técnica bioclimática que mayor aporta al incremento de temperatura para mejorar el bienestar térmico interior del módulo según las diferentes configuraciones y modificaciones realizadas en las envolventes de M1 y M2, para las condiciones climáticas de Imata, es el invernadero adosado a M2, con un incremento de temperatura de 5,16 °C respecto de M1, el cual se corrobora mediante validación con los resultados de la simulación obteniéndose buenos acuerdos.
- La configuración que presenta un mayor ahorro energético en la demanda de calefacción para mantener la temperatura de diseño del aire interior constante a 15 °C, es cuando la puerta y ventana se mantienen abiertas de 8:00 a 17:00 horas, requiriéndose para M1 14,23 kWhdía⁻¹ y para M2 10,29 kWhdía⁻¹.
- Finalmente, la mejora del comportamiento térmico se puede atribuir a la mejora significativa del aislamiento térmico y la inclusión de ganancias solares directas e indirectas como las claraboyas e invernadero adosado, este último idóneo para zonas Altoandinas por su buen desempeño y aporte térmico al interior del módulo M2.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la financiación del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC), por medio del convenio 024-2016-FONDECYT y el contrato 04-2018-FONDECYT BM-IADT-MU. J. Molina Agradece a CONCYTEC/FONDECYT/BM por el financiamiento a través del contrato no. 05-2018-FONDECYT/BM.

REFERENCIAS

- [1] SENAMHI (2003, Enero). ATLAS DE ENERGÍA SOLAR DEL PERÚ [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/343>.
- [2] Presidencia del Consejo de Ministros (2020). Plan Multisectorial Ante Heladas Y Frijaje 2019 - 2021 [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/pcm/campañas/56-plan-multisectorial-ante-heladas-y-frijaje-2019-2021>.
- [3] INEI (2017). Resultados Definitivos de los Censos Nacionales 2017

[Online]. Available: <http://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/>.

[4] INDECI (2017). Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI | Gobierno del Perú [Online]. Available: <https://www.gob.pe/indeci>.

[5] Canal N (2018, Julio 10). Defensoría: Nueve regiones registran 182 fallecidos a causa de heladas y friaje [Online]. Available: <https://canaln.pe/actualidad/defensoria-nueve-regiones-hay-182-fallecidos-causa-heladas-y-frijaje-n329573>.

[6] A. Flores, “Construcción de una vivienda solar en base a las propiedades termofísicas y evaluación experimental de su confort térmico en llave”, *Rev. Investig. Altoandina*, vol. 16, no. 1, pp. 177–186, 2014.

[7] R. Espinoza et al., “Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda Altoandina del Perú”, *Rev. Avances en Energías Renovables y Medio ambiente*, vol. 13, pp. 203–210, 2009.

[8] El Peruano (2014). Norma EM. 110 Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética [Online]. Available: <http://www.construccion.org/normas/me2012/me2006.htm>.

[9] GIZ-MVCS (2015). Abrigando hogares - Experiencias con medidas de confort térmico en viviendas rurales Altoandinas [Online]. Available:

<https://issuu.com/melissakatherynpalma/docs/abrigando-hogares>

[10] J. Molina, “Uso del programa Energyplus para la simulación del consumo energético de un módulo bioclimático ubicado en Imata, Arequipa a 4519 msnm”, Tesis de grado, Facultad de Ciencias, UNI, Lima, 2018.

[11] J. Molina, M. Ponce, M. Horn and M. Gómez, “Towards a sustainable bioclimatic approach for the Peruvian high Andean rural area: Evaluation of the thermal contribution of a greenhouse attached to a dwelling”, *Proc. ISES Sol. World Congr. 2019 IEA SHC Int. Conf. Sol. Heat. Cool. Build. Ind.* 2019, pp. 355–364, nov. 2019.

[12] J. Molina, G. Lefebvre, M. Horn and M. M. Gómez, “Design of an experimental bioclimatic module obtained from the analysis of thermal simulations for the community of Imata (4519 m a.s.l.), located in Arequipa, Perú”, *Inf. Technol.*, vol. 31, no. 2, pp. 173–185, abr. 2020.

[13] SENAMHI (2020). Datos Hidrometeorológicos 2020 [Online]. Available: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>.

[14] SOLCAST (2020). Histórico y TMY - Datos y especificaciones 2020 [Online]. Available: <https://solcast.com/>.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe