

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS



**TESIS PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO FÍSICO**

**TITULADA:**

**“USO DEL PROGRAMA ENERGYPLUS PARA LA  
SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN  
MÓDULO BIOCLIMÁTICO UBICADO EN IMATA, AREQUIPA  
A 4519 MSNM”**

PRESENTADO POR:

**JUAN OMAR MOLINA FUERTES**

ASESOR:

Dra. MÓNICA MARCELA GÓMEZ LEÓN

LIMA – PERÚ

2018

## **Agradecimiento**

La presente tesis para optar el grado de Ingeniero Físico, es el resultado de una dedicación continua y perseverante de la misma en la cual he recibido el apoyo y guía de las siguientes personas que con mucho afecto quiero agradecer.

A la Dra. Mónica Gómez por su orientación, por el empuje para no declinar en la culminación de la misma, y por compartir y transmitir su sabiduría para el desarrollo de la presente tesis.

Al Dr. Manfred Horn que, en múltiples ocasiones con sus comentarios y sugerencias, me ha permitido entender con claridad los conceptos de la física aplicadas a la tesis.

También, Agradecer al Dr. Jorge Rojas Menéndez profesor en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México que sin dudarlo, aceptó mi deseo de realización de estancia académica en el grupo de Investigación de Energía en Edificaciones el cual dirige y, me permitió adiestrarme en programas dinámicos de simulación térmica/energética en edificaciones.

Y finalmente, al Círculo de Investigación en Ciencia y Tecnología (financiado por Cienciactiva del CONCYTEC por medio del Convenio N° 024-2016-FONDECYT), que mediante el proyecto, “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”, me ha permitido afianzarme en la temática del Confort Térmico.

## Prefacio

El presente trabajo forma parte de la línea de investigación en el campo del estudio Bioclimático en edificaciones que se viene desarrollando en la Facultad de Ciencias de la UNI la cual queda demostrado con las tesis sustentadas precedentes a la misma.

<sup>1</sup>Huaylla Fredy. Evaluación Experimental de Cambios Constructivos para Lograr Confort Térmico en una Vivienda Altoandina del Perú.

*Estudio de rehabilitación térmica de una vivienda existente para lograr incrementos de temperatura de al menos 6°C respecto a los mínimos registrados.*

<sup>2</sup>Saavedra Gonzalo. Construcción y Evaluación Térmica de un Módulo de Vivienda Rural en la Localidad de Vilcallamas Arriba, Distrito de Pisacoma, Provincia de Chucuito, Región Puno.

*Evaluación térmica de una vivienda nueva con resultados interiores de temperaturas entre 10.2 y 14.6°C, sensiblemente agradables pero con temperaturas inferiores a la de confort.*

<sup>3</sup>Espinoza Rafael. 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 rurales Alto Andinas.

*Se concluye que es posible afirmar el mejor comportamiento del sistema de tubo radiante sobre el de muro radiante.*

<sup>4</sup>Molina Jessica. Desarrollo de un Procedimiento de Evaluación Integral de una Vivienda Rural Alto Andina para su Calificación como Vivienda Bioclimática Caso de la Vivienda Modificada y la Vivienda Nueva de San Francisco de Raymina de Ayacucho.

*Se destaca la importancia de analizar la dinámica de utilización de la vivienda y la manera que los pobladores interactúan con las técnicas utilizadas con la finalidad de lograr el confort térmico deseado.*

<sup>5</sup>Molina Juan. Evaluación Sistemática del Desempeño Térmico de un Módulo Experimental de Vivienda Alto Andina para Lograr el Confort Térmico con Energía Solar.

*Se logran ganancias internas del orden de los 9.45°C en promedio y, de hasta 16.62°C en horas críticas de la madrugada respecto a la temperatura exterior de -7.09°C a las 6:00am.*

Parte de este trabajo ha sido reportado en la siguiente publicación:

**Diseño de un módulo experimental bioclimático ubicado en Imata, Arequipa (4519 msnm)**

Juan Omar Molina Fuertes, Guilles Lefebvre, Manfred Horn, Mónica Marcela Gómez León  
Sometida a la Revista DYNA de la Universidad Nacional de Colombia

---

<sup>1 2</sup>Tesis de Ingeniería: Huaylla Fredy (2010), Saavedra Gonzalo (2014).

<sup>3 4 5</sup>Tesis de Maestría: Espinoza Rafael (2014), Molina Jessica (2016), Molina Juan (2018).

# ÍNDICE

RESUMEN .....	1
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.3 HIPÓTESIS.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.5 METODOLOGÍA.....	3
<b>II. ANTECEDENTES.....</b>	<b>4</b>
2.1 ESTADO DEL ARTE DEL USO DE PROGRAMAS DE CÁLCULO DINÁMICO TÉRMICO/ENERGÉTICO EN VIVIENDAS Y/O EDIFICACIONES .....	4
2.1.1 <i>En el Perú</i> .....	4
2.1.2 <i>A nivel internacional</i> .....	8
2.2 MÓDULOS BIOCLIMÁTICOS EXPERIMENTALES .....	11
<b>III. CLIMA .....</b>	<b>13</b>
3.1 DISEÑO PARA EL CLIMA .....	13
3.2 ENERGÍA SOLAR.....	13
3.2.1 <i>Gráficas solares (carta estereográfica)</i> .....	13
3.2.2 <i>Disponibilidad de energía solar</i> .....	14
3.3 ZONAS BIOCLIMÁTICAS .....	15
3.4 POBLACIÓN EN ESTUDIO: IMATA .....	15
3.4.1 <i>Disponibilidad de datos climáticos de Imata</i> .....	16
3.4.2 <i>Tipología de vivienda rural en Imata</i> .....	20
<b>IV. BIENESTAR TÉRMICO .....</b>	<b>22</b>
4.1 ZONA DE BIENESTAR TÉRMICO.....	22
4.2 DIAGRAMA PSICROMÉTRICO O CARTA BIOCLIMÁTICA.....	23
4.3 FACTORES QUE DETERMINAN EL BIENESTAR TÉRMICO.....	25
4.4 MEDICIONES DEL CONFORT TÉRMICO.....	25
<b>V. EDIFICIOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR .....</b>	<b>28</b>
5.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR DE MATERIALES.....	28
5.2 TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LA ENVOLVENTE.....	30
5.2.1 <i>Transferencia de calor independiente del tiempo</i> .....	30
5.2.2 <i>Transferencia de calor dependiente del tiempo</i> .....	32
<b>VI. DISEÑO BIOCLIMÁTICO DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES Y SUS COMPONENTES.....</b>	<b>33</b>
6.1 DISEÑO DEL SITIO.....	33
6.1.1 <i>Ubicación geográfica de los módulos experimentales</i> .....	33
6.1.2 <i>Tamaño y forma de los módulos experimentales</i> .....	34
6.1.3 <i>Orientación del módulo experimental</i> .....	36
6.2 DISEÑO DE LA ENVOLVENTE DEL MÓDULO EXPERIMENTAL.....	37
6.2.1 <i>Pisos</i> .....	37
6.2.2 <i>Paredes</i> .....	37
6.2.3 <i>Techo y falso techo</i> .....	38
6.2.4 <i>Ventanas</i> .....	38
6.2.5 <i>Puertas</i> .....	38
6.2.6 <i>Sistemas de climatización solar pasiva</i> .....	38
<b>VII. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN Y MODELACIÓN DINÁMICA .....</b>	<b>40</b>
7.1 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN .....	40
7.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS PARA LA SIMULACIÓN .....	41
7.2.1 <i>Trimble SketchUp</i> .....	41

7.2.2	<i>OpenStudio</i> .....	41
7.2.3	<i>EnergyPlus</i> .....	41
7.3	ENTRADA DE DATOS AL EP LAUNCH E IDF EDITOR DEL ENERGYPLUS .....	42
7.3.1	<i>Control de la simulación</i> .....	43
7.3.2	<i>Características del edificio o vivienda</i> .....	43
7.3.3	<i>Localización del edificio o vivienda</i> .....	44
7.3.4	<i>Materiales</i> .....	44
7.3.5	<i>Construcciones</i> .....	44
7.3.6	<i>Superficies y subsuperficies</i> .....	45
7.3.7	<i>Control de contraventanas</i> .....	46
7.3.8	<i>Infiltraciones o intercambios por flujo de aire</i> .....	46
7.3.9	<i>Termostatos</i> .....	46
7.4	VARIABLES DE SALIDAS DE LA SIMULACIÓN.....	47
<b>VIII. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO ENERGÉTICO DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES .....</b>		<b>48</b>
8.1	COMPORTAMIENTO TÉRMICO INTERIOR A PARTIR DE MATERIALES EN PISOS, PAREDES Y TECHO .....	49
8.1.1	<i>Pisos</i> .....	49
8.1.2	<i>Paredes</i> .....	51
8.1.3	<i>Techo</i> .....	53
8.2	COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LOS DISEÑOS DE MÓDULOS EXPERIMENTALES .....	56
8.2.1	<i>Módulo típico (MT)</i> .....	56
8.2.2	<i>Módulo mejorado 1 (MM1)</i> .....	62
8.2.3	<i>Módulo mejorado 2 (MM2)</i> .....	62
8.2.4	<i>Módulo mejorado 3 (MM3)</i> .....	64
8.2.5	<i>Módulo mejorado 4 (MM4)</i> .....	66
8.3	REQUERIMIENTO ENERGÉTICO DEL MT Y MM4 PARA ALCANZAR UNA TEMPERATURA DE BIENESTAR TÉRMICO.....	68
8.3.1	<i>Requerimiento de carga térmica en calefacción en el MT</i> .....	68
8.3.2	<i>Requerimiento de carga térmica en calefacción en el MM4</i> .....	70
<b>IX. CONCLUSIONES .....</b>		<b>74</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>76</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>79</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VISTAS (IZQ.) MODELO DE VIVIENDA EN <i>SKETCHUP</i> Y <i>OPENSTUDIO</i> ; (DER.) MODELO DE VIVIENDA EXPERIMENTAL UBICADO EN SAN FRANCISCO DE RAYMINA (HUAYLLA, F., 2010).....	5
FIGURA 2. MODELO DE SIMULACIÓN REALIZADO EN <i>SKETCHUP</i> ENLAZADO AL <i>ENERGYPLUS</i> (GÓMEZ, A. ET AL., 2010).....	5
FIGURA 3. VISTAS (IZQ.) MODELO DE VIVIENDA EN <i>SKETCHUP</i> ; (DER.) VIVIENDA UBICADA EN VILCALLAMAS ARRIBA, PISACOMA, PUNO (SAAVEDRA, G., 2014). ....	6
FIGURA 4. VISTAS DEL MODELO DESARROLLADO EN <i>SKETCHUP</i> Y <i>OPENSTUDIO</i> PARA LA SIMULACIÓN CON <i>ENERGYPLUS</i> (DELGADO, N., 2014). ....	6
FIGURA 5. VISTAS (IZQ.) MODELO DE VIVIENDA SIMULADO; (DER.) VIVIENDA EXPERIMENTAL EN SAN FRANCISCO DE RAYMINA (MOLINA, J.R., 2016). ....	7
FIGURA 6. VISTAS, (IZQ.) DISEÑO DEL MÓDULO UTILIZANDO <i>SKETCHUP</i> Y <i>OPENSTUDIO</i> , (DER.) MÓDULO EXPERIMENTAL EN SAN FRANCISCO DE RAYMINA.....	8
FIGURA 7. VISTA FRONTAL DEL MODELO SIMULADO CON <i>ENERGYPLUS</i> (BRAVO, V., 2016). ....	9
FIGURA 8. ESQUEMA DE LA SALA DE LA OFICINA EN ESTUDIO (ALGHOUL ET AL., 2017).....	9
FIGURA 9. PLAN Y MODELO DE PLANTA TÍPICO EN EL ENTORNO DE SIMULACIÓN (CHEN ET AL., 2018). ....	10
FIGURA 10. CREACIÓN DE MODELO PARA SIMULACIÓN (CADEROT, N., 2018).....	11
FIGURA 11. GEOMETRÍA DE LA VIVIENDA (MUÑOZ, J., PRADO, I., 2018). ....	11
FIGURA 12. VISTAS DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES (ME), (A) MÓDULO DE CONTROL (MC), (B) MC CON SCS, (C) ME CON SCS Y TECHO VERDE, (D) ME CON SCS Y MUROS DE TIERRA APISONADA (DEL CASTILLO, B. ET AL., 2017). ....	12
FIGURA 13. MONTAJE EXPERIMENTAL EN BARCELONA (IZQUIERDA) Y PUIGVERD DE LLEIDA (DERECHA) (SERRANO ET AL., 2017). ....	12
FIGURA 14. CARTA ESTEREOGRÁFICA PARA IMATA. ....	14
FIGURA 15. MAPAS DEL PERÚ. (A) ENERGÍA SOLAR INCIDENTE DIARIA – PROMEDIO ANUAL (WORLD BANK GROUP, N.D.). (B) FRECUENCIA DE HELADAS METEOROLÓGICAS PARA EL MES DE JULIO DEL AÑO 2000 (PREDES, 2016).....	15
FIGURA 16. VISTA AÉREA DEL CENTRO POBLADO DE IMATA (GOOGLE EARTH, 2016). 1: MUNICIPALIDAD DE IMATA, 2: IGLESIA, 3: ALBERGUE, 4: COLEGIO, Y 5: TAMBO DEL MVCS. ....	16
FIGURA 17. GRÁFICA ANUAL DE LAS TEMPERATURAS PROMEDIOS MENSUALES DIARIAS CARACTERÍSTICAS EN IMATA. TMEXT: TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA, TMEXT: TEMPERATURA MÍNIMA EXTREMA, TMÁXP: TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO DIARIA, TMÍNP: TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO DIARIA, Y TMED: TEMPERATURA MEDIA O PROMEDIO DIARIO.....	17
FIGURA 18. TEMPERATURAS PROMEDIO HORARIAS MENSUALES EXTERIORES PARA IMATA SEGÚN ARCHIVO CLIMÁTICO DE AÑO TÍPICO METEOROLÓGICO. ....	18
FIGURA 19. CARACTERÍSTICAS DE LA HUMEDAD RELATIVA (HR) PROMEDIO MENSUAL DIARIA EN IMATA, MEDIA (HRMED), MÍNIMA (HRMÍN.PROM.), Y MÁXIMA (HRMÁX.PROM.). ....	18
FIGURA 20. FRECUENCIA (HORAS/AÑO) Y VELOCIDAD ANUAL DEL VIENTO. ADAPTADO DEL <i>ECOTECT ANALYSIS</i> (AUTODESK, 2011).....	19
FIGURA 21. RADIACIÓN SOLAR MENSUAL EN IMATA. ....	19
FIGURA 22. VISTAS DE UNA VIVIENDA TÍPICA EN IMATA, (IZQ.) PUERTA DE CALAMINA Y VENTANAS DE VIDRIO CON MARCO METÁLICO EN LA FACHADA PRINCIPAL, (DER.) TECHOS DE CALAMINA METÁLICA CON PIEDRAS QUE FIJAN SU SUJECIÓN, VISTA POSTERIOR DE LA VIVIENDA. ....	20
FIGURA 23. VISTAS DE LAS NUEVAS CONSTRUCCIONES EN IMATA EMPLEANDO MATERIAL CONVENCIONAL NO IDÓNEO PARA LA ZONA.....	21
FIGURA 24. PANTALLAZO DEL DIAGRAMA PSICROMÉTRICO PARA IMATA ELABORADO CON <i>CLIMATE CONSULTANT 6.0</i> (“CLIMATE CONSULTANT,” N.D.). LOS NÚMEROS ENTRE PARÉNTESIS POR CADA ESTRATEGIA REPRESENTAN LA CANTIDAD DE HORAS ANUALES QUE CONTRIBUYE SU APLICACIÓN PARA ALCANZAR LA ZONA DE CONFORT. ....	25
FIGURA 25. DIFERENCIAS BÁSICAS ENTRE LOS ENFOQUES DE ESTUDIOS DEL CONFORT TÉRMICO HUMANO (RINCÓN, M.L., 2015). ....	26
FIGURA 26. DOS PERSONAS EN UN BAILE RÁPIDO PROPORCIONAN MÁS CALOR A UNA HABITACIÓN QUE UN CALENTADOR DE RESISTENCIA 1kW (CENGEL, Y., GHAJAR, A., 2015). ....	28
FIGURA 27. CONDUCCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE UNA PARED PLANA GRANDE DE ESPESOR $\Delta x$ Y ÁREA $A$ (CENGEL, Y., GHAJAR, A., 2011). ....	29
FIGURA 28. MODELO FÍSICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE UN MURO DE LA ENVOLVENTE. CASO DE UN MURO DE DOS CAPAS (HUELSZ, G. ET AL., 2009).....	31

FIGURA 29. (IZQ.) MAPA DEL PERÚ, (DER.) ARRIBA, MAPA DE LA REGIÓN AREQUIPA; CENTRO, MAPA DE LA PROVINCIA DE CAYLLOMA, EN CÍRCULO ROJO LA UBICACIÓN DE IMATA; Y ABAJO, EN MARCO ROJO LA UBICACIÓN DONDE SE CONSTRUIRAN LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES (GOOGLE MAPS Y GOOGLE EARTH, 2016).....	34
FIGURA 30. VISTAS DE PLANTA DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES, (A) MÓDULO TÍPICO (MT) Y (B) MÓDULO MEJORADO (MM).....	36
FIGURA 31. EN RECUADRO ROJO EL TERRENO DONDE SE CONSTRUIRÁ LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES Y LA ORIENTACIÓN CON DIRECCIÓN AL NORTE (GOOGLE EARTH).....	37
FIGURA 32. CONFIGURACIÓN DEL PISO AISLADO PARA EL MM.....	37
FIGURA 33. VISTA DE LOS MUROS DEL MT. ....	38
FIGURA 34. (IZQ.) VISTAS DE LOS TECHOS DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES. (IZQ.) MT, (DER.) MM2. ....	38
FIGURA 35. MM4 CON INVERNADERO Y CLARABOYAS. ....	39
FIGURA 36. (IZQ.) MÓDULO TÍPICO MT; (DER.) MÓDULO MEJORADO MM4. ....	40
FIGURA 37. DIAGRAMA DE FLUJO DE TRABAJO PARA MODELAR Y SIMULAR EL PROBLEMA. FUENTE: ADAPTADO DE (ALGHOUL ET AL., 2017).....	41
FIGURA 38. VENTANA EP LAUNCH DEL <i>ENERGYPLUS</i> . ....	42
FIGURA 39. VENTANA IDF EDITOR DEL <i>ENERGYPLUS</i> .....	43
FIGURA 40. CAMPO PARA EL CONTROL DE LA SIMULACIÓN. ....	43
FIGURA 41. CAMPO PARA INGRESAR LOS PARÁMETROS DEL EDIFICIO. ....	44
FIGURA 42. CAMPO PARA INGRESAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS MÓDULOS.....	44
FIGURA 43. CAMPO DE INGRESO DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS. ....	44
FIGURA 44. CAMPO DE CREACIÓN DE CONSTRUCCIONES. ....	45
FIGURA 45 . MATERIALES PARA CONSTRUCCIONES INGRESADOS AL <i>ENERGYPLUS</i> , (A) PAREDES, (B) PISO, Y (C) TECHO. ....	45
FIGURA 46. CAMPO DE INGRESO DE LAS SUPERFICIES QUE DAN FORMA AL EDIFICIO. ....	45
FIGURA 47. CAMPO DE INGRESO DE LAS SUBSUPERFICIES QUE DAN FORMA AL EDIFICIO. ....	46
FIGURA 48. CAMPO DE INGRESO DEL CONTROL DE CONTRAVENTANAS. ....	46
FIGURA 49. CAMPO DE INGRESO DE LAS INFILTRACIONES DE AIRE (ACH). ....	46
FIGURA 50. CAMPO DE INGRESO PARA TERMOSTATOS.....	47
FIGURA 51. CAMPO DE SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE SALIDA.....	47
FIGURA 52. VISTAS MODIFICADAS EN <i>SKETCHUP</i> DE LOS MÓDULOS A SIMULAR CON EL <i>ENERGYPLUS</i> , (A) MM1, (B) MM2, (C) MM3, Y (D) MM4. ....	48
FIGURA 53. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA INTERIOR ( $T_i$ ) HORARIA RESPECTO AL USO DE MATERIALES EN EL PISO, TIERRA, CONCRETO (CON), CONCRETO+CÁMARA DE AIRE Y MADERA (CON+MAD), PIEDRAS+AIRE+MADERA (PIE+AIR+MAD), RESPECTO A LA TEMPERATURA EXTERIOR ( $T_o$ ). ....	50
FIGURA 54. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA EN EL MT DE ACUERDO A MATERIALES EN PISOS PARA ALCANZAR UNA $T_i$ CONSTANTE DE 15°C. TIERRA, CONCRETO (CON), CONCRETO+AIRE+MADERA (CON+AIR+MAD), Y PIEDRAS+AIRE+MADERA (PIE+AIR+MAD).....	51
FIGURA 55. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA INTERIOR ( $T_i$ ) HORARIA RESPECTO AL USO DE MATERIALES EN PAREDES, ADOBE, LADRILLO KING KONG (LKK), Y PANELES DRYWALL CON FIBRA DE VIDRIO (D+FV), RESPECTO A LA TEMPERATURA EXTERIOR ( $T_o$ ). ....	52
FIGURA 56. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA EN EL MT DE ACUERDO A MATERIALES EN PAREDES PARA ALCANZAR UNA $T_i$ CONSTANTE DE 15°C. ADOBE, LADRILLO KING KONG (LKK), Y PANELES DRYWALL CON FIBRA DE VIDRIO (P+FV). ....	53
FIGURA 57. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA INTERIOR ( $T_i$ ) HORARIA RESPECTO AL USO DE MATERIALES EN EL TECHO, CALAMINA METÁLICA, FIBROCEMENTO, ICHU, Y ALUZINC+POLIURETANO+ALUZINC (ALPOLAL), RESPECTO A LA TEMPERATURA EXTERIOR ( $T_o$ ). ....	54
FIGURA 58. MATERIAL DE CUBIERTA TIPO SÁNDWICH, CON CHAPAS METÁLICAS EN LOS COSTADOS Y POLIURETANO EXPANDIDO EN EL CENTRO. ....	54
FIGURA 59. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA EN EL MT DE ACUERDO A MATERIALES EN TECHOS PARA ALCANZAR UNA $T_i$ CONSTANTE DE 15°C. CALAMINA METÁLICA, FIBROCEMENTO, ICHU, Y ALUZINC-POLIURETANO-ALUZINC (ALPOLAL).....	56
FIGURA 60. TEMPERATURA PROMEDIO HORARIA INTERIOR ( $T_i$ ) PARA EL MT Y EXTERIOR ( $T_o$ ).....	57
FIGURA 61. IRRADIANCIA SOLAR HORARIA SOBRE SUPERFICIE EXTERIOR EN EL ALA NORTE Y SUR (ALA N Y ALA S), PUERTA Y VENTANAS PARA EL DÍA REPRESENTATIVO DE FRÍO EXTREMO, 15 DE JULIO. ....	58
FIGURA 62. IRRADIANCIA SOLAR HORARIA SOBRE SUPERFICIE EXTERIOR EN PAREDES PARA EL DÍA REPRESENTATIVO DE FRÍO EXTREMO, 15 DE JULIO. ....	59
FIGURA 63. TEMPERATURAS HORARIAS SUPERFICIALES EXTERIORES EN EL ALA SUR Y NORTE (ALA S Y ALA N), Y	

PISO EN EL MT PARA EL DÍA REFERENCIAL DE FRÍO EXTREMO, 15 DE JULIO.....	60
FIGURA 64. TEMPERATURAS HORARIAS SUPERFICIALES EXTERIORES EN LA PUERTA Y VENTANA DEL MT PARA EL DÍA REFERENCIAL DE FRÍO EXTREMO, 15 DE JULIO.....	60
FIGURA 65. TEMPERATURAS HORARIAS SUPERFICIALES EXTERIORES DE PAREDES DEL MT PARA EL DÍA REFERENCIAL DE FRÍO EXTREMO, 15 DE JULIO.....	61
FIGURA 66. TEMPERATURA PROMEDIO HORARIA INTERIOR (Ti), Y EXTERIOR (To), PARA EL MT Y MM1.....	62
FIGURA 67. TEMPERATURA HORARIA INTERIOR, MT (Ti), Y ÁTICO (T <sub>ÁTICO</sub> ); Y TEMPERATURA HORARIA EXTERIOR (To).....	63
FIGURA 68. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA INTERIOR (Ti) HORARIA DEL MM1 Y MM2 FRENTE A LA TEMPERATURA EXTERIOR (To).....	64
FIGURA 69. TEMPERATURA HORARIA, INTERIOR (Ti) Y EXTERIOR (To) PARA EL MM3.....	65
FIGURA 70. TEMPERATURAS HORARIAS, INTERIOR (Ti), EXTERIOR (To), ÁTICO (T <sub>ÁTICO</sub> ) E INVERNADERO (T <sub>INV</sub> ), PARA EL 15 DE JULIO.....	65
FIGURA 71. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA INTERIOR (Ti), HORARIA Y EXTERIOR (To), PARA EL MM3 Y MM4 EN EL DÍA REFERENCIAL, 15 DE JULIO.....	66
FIGURA 72. TEMPERATURA HORARIA INTERIOR PARA EL MÓDULO TÍPICO, (MT), MEJORADO 1, 2, 3 Y 4 (MM1, MM2, MM3, Y MM4), PARA EL DÍA REFERENCIAL DE FRÍO EXTREMO, 15 DE JULIO.....	67
FIGURA 73. TEMPERATURA INTERIOR (Ti) HORARIA Y LÍMITES DE LA ZONA DE BIENESTAR TÉRMICO EN EL MT (TEMPERATURA DE BIENESTAR, 15°C), MÁXIMO (ZC <sub>MÁX</sub> =17,5°C) Y MÍNIMO (ZC <sub>MÍN</sub> =12,5°C).....	69
FIGURA 74. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA DE CALEFACCIÓN HORARIA (E <sub>CALEF</sub> ) PARA EL MT A 15°C.....	69
FIGURA 75. TEMPERATURA INTERIOR (Ti) HORARIA Y LÍMITES DE LA ZONA DE BIENESTAR TÉRMICO EN EL MT (TEMPERATURA DE BIENESTAR, 23°C), MÁXIMO (ZC <sub>MÁX</sub> =25,5°C) Y MÍNIMO (ZC <sub>MÍN</sub> =20,5°C).....	70
FIGURA 76. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA DE CALEFACCIÓN HORARIA (E <sub>CALEF</sub> ) PARA EL MT A 23°C.....	70
FIGURA 77. TEMPERATURA INTERIOR (Ti) HORARIA Y LÍMITES DE LA ZONA DE BIENESTAR TÉRMICO EN EL MM4 (TEMPERATURA DE BIENESTAR, 15°C), MÁXIMO (ZC <sub>MÁX</sub> =17,5°C) Y MÍNIMO (ZC <sub>MÍN</sub> =12,5°C).....	71
FIGURA 78. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA DE CALEFACCIÓN HORARIA (E <sub>CALEF</sub> ) PARA EL MM4 A 15°C.....	71
FIGURA 79. TEMPERATURA INTERIOR (Ti) HORARIA Y LÍMITES DE LA ZONA DE BIENESTAR TÉRMICO EN EL MM4 (TEMPERATURA DE BIENESTAR, 23°C), MÁXIMO (ZC <sub>MÁX</sub> =25,5°C) Y MÍNIMO (ZC <sub>MÍN</sub> =20,5°C).....	72
FIGURA 80. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA DE CALEFACCIÓN HORARIA (E <sub>CALEF</sub> ) PARA EL MM4 A 23°C.....	72



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ZONIFICACIÓN BIOCLIMÁTICA DEL PERÚ (MVCS, 2014) .....	15
TABLA 2. TEMPERATURAS CARACTERÍSTICAS DE IMATA. ....	17
TABLA 3. CUANTIFICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE LAS VIVIENDAS EN IMATA (AREQUIPA). ....	21
TABLA 4. ZONA DE BIENESTAR TÉRMICO HUMANO (GONZÁLES, E., 1986).....	23
TABLA 5. FACTORES QUE AFECTAN LA COMODIDAD TÉRMICA (SZOKOLAY, S., 2004). ....	25
TABLA 6. MODELOS DE TEMPERATURA ADAPTATIVA O NEUTRA (T <sub>n</sub> ) (GÓMEZ, A.G. ET AL., 2007).....	27
TABLA 7. AMPLITUD DE LA ZONA DE CONFORT VS. OSCILACIÓN MEDIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE (MORILLÓN, D., 2004, P. 23,24). ....	27
TABLA 8. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES EN IMATA (AREQUIPA). ....	33
TABLA 9. CONSIDERACIONES ENTRE EL MÓDULO EXPERIMENTAL TÍPICO (MT) Y MEJORADO (MM).....	35
TABLA 10. OSCILACIONES TÉRMICAS DE LA TEMPERATURA INTERIOR (T <sub>i</sub> ) POR MATERIALES EN PISO EN EL MT... ..	50
TABLA 11. OSCILACIONES TÉRMICAS DE LA TEMPERATURA INTERIOR (T <sub>i</sub> ) POR MATERIALES EN PAREDES EN EL MT. LADRILLO KING KONG (LKK) Y PANELES DRYWALL CON FIBRA DE VIDRIO (P+FV) .....	52
TABLA 12. OSCILACIONES TÉRMICAS DE LA TEMPERATURA INTERIOR (T <sub>i</sub> ) POR MATERIALES EN TECHOS EN EL MT. .....	55
TABLA 13. OSCILACIÓN Y RETARDO TÉRMICO PARA EL MT. ....	57
TABLA 14. IRRADIANCIA SOLAR PROMEDIO PARA EL 15 DE JULIO QUE INCIDE SOBRE LA ENVOLVENTE DEL MT. ..	59
TABLA 15. OSCILACIÓN Y RETARDO TÉRMICO PARA EL MM1. ....	62
TABLA 16. OSCILACIÓN Y RETARDO TÉRMICO PARA EL MM2 CON TECHO Y FALSO TECHO, Y CLARABOYAS.....	63
TABLA 17. OSCILACIÓN Y RETARDO TÉRMICO PARA EL MM3 CON TECHO Y FALSO TECHO, E INVERNADERO ADOSADO A LA FACHADA NORTE.....	66
TABLA 18. OSCILACIÓN Y RETARDO TÉRMICO PARA EL MM4 CON TECHO Y FALSO TECHO CON CLARABOYAS, E INVERNADERO ADOSADO A LA FACHADA NORTE.....	66
TABLA 19. RESUMEN DE LOS VALORES DE T <sub>i</sub> EN LOS MÓDULOS Y T <sub>o</sub> PARA EL DÍA DE FRÍO EXTREMO, 15 DE JULIO, CONSIDERADO COMO REFERENCIA DEL ESTUDIO. ....	68
TABLA 20. RESUMEN DEL REQUERIMIENTO DE ENERGÍA DE CALEFACCIÓN EN EL MT Y MM4 A TEMPERATURA INTERIORES CONSTANTES DE 15°C, Y 23°C.....	73

## SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A	: Área (m <sup>2</sup> )
A'	: Oscilación térmica (°C)
AlPolAl	: Aluzinc-Poliuretano-Aluzinc
ACH	: Intercambios de aire por hora ( <i>Air change per hour</i> ) : Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción,
ASHRAE	Refrigeración y Aire Acondicionado ( <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> )
CM	: Módulo de control
Con	: Concreto
Con+Madera	: Concreto más madera
CTE	: Código Técnico de Edificación
CSV	: Valores separados por comas ( <i>Comma-Separated Values</i> )
DOE	: Departamento de Energía de los EEUU ( <i>Department of energy</i> )
D+FV	: Drywall más fibra de vidrio
E <sub>Calef.</sub>	: Energía de calefacción (kWh)
EM	: Módulo experimental
EPW	: Archivos de clima EnergyPlus ( <i>EnergyPlus Weather Files</i> )
EEUU	: Estados Unidos
HR	: Humedad Relativa (%)
HRmedia	: Humedad Relativa media o promedio (%)
HRmáx.prom.	: Humedad Relativa máxima promedio (%)
HRmín.prom.	: Humedad Relativa mínima promedio (%)
HVAC	: Calefacción, ventilación, y aire acondicionado ( <i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> )
IDF	: Archivo de datos de entrada ( <i>Input Data File</i> )
INEI	: Instituto Nacional de Estadística e Informática
LKK	: Ladrillo de arcilla solida King Kong
MINAM	: Ministerio del Ambiente del Perú
MT	: Módulo típico
MM1	: Módulo mejorado 1
MM2	: Módulo mejorado 2
MM3	: Módulo mejorado 3
MM4	: Módulo mejorado 4
MVCS	: Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento
nZEB	: Edificación de energía de consumo casi nulo ( <i>Nearly zero energy building</i> )
Pie+Air+Mad	: Piedra más aire y madera
R	: Resistencia térmica (m <sup>2</sup> °C/W)
RAE	: Real Academia Española
SCS	: Sistema de control solar
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
Ti	: Temperatura interior (°C)
TMext	: Temperatura máxima extrema (°C)

$T_m$	: Temperatura media mensual exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{mext}$	: Temperatura mínima extrema ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{máxp}$	: Temperatura máxima promedio ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{mínp}$	: Temperatura mínima promedio ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{med}$	: Temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_n$	: Temperatura de neutralidad o de confort ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_o$	: Temperatura exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{wi}$	: Temperatura en la superficie interna ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{wo}$	: Temperatura en la superficie externa ( $^{\circ}\text{C}$ )
WO	: Orientación de ventana ( <i>Wall orientation</i> )
WWR	: Relación ventana pared ( <i>Window-to-wall ratio</i> )
$k$	: Conductividad térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$c$	: Calor específico ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$\rho$	: Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$C$	: Capacidad térmica ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$a$	: Difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$b$	: Efusividad térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{1/2}$ )
$h_o$	: Coeficiente de transferencia de calor de película ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$ZC_{máx}$	: Límite máximo de la zona de bienestar térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )
$ZC_{mín}$	: Límite mínimo de la zona de bienestar térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )

## RESUMEN

La presente tesis muestra el uso del programa *EnergyPlus 8.4* como motor de cálculo para determinar la temperatura interior de un módulo bioclimático experimental como parámetro principal de análisis y, la demanda de energía que éste requiere en horas extremas de “heladas” para lograr encontrarse dentro de la zona de bienestar térmico según modelo adaptativo para el Centro Poblado de Imata en Arequipa a 4519 msnm considerado la zona más fría de la región.

El diseño del módulo bioclimático de desarrollo en otros dos programas que son el complemento del *EnergyPlus* y donde se modela la geometría en 3D y crea las zonas térmicas como son el *SketchUp*, y *OpenStudio*, ambos al igual que el *EnergyPlus* son de uso gratuito y código abierto reconocidos a nivel mundial para el estudio térmico/energético en edificaciones. La concepción del diseño del módulo se realizó en base a un diagnóstico *in-situ* en Imata de la forma de vivienda y uso de materiales. Tal es así, que la metodología de la presente tesis se basa en un modelo inicial referencial denominado módulo típico, al cual se le van adicionando mejoras de aislamiento pasivo en techos, paredes, y piso, e integrando sobre su envolvente sistemas de climatización pasiva como claraboyas y un invernadero adosado. Por cada mejora, adición, o elemento a aislar se determina su aporte térmico al interior del módulo partiendo del uso de materiales locales complementados con algunos pocos de carácter industrial para definir los materiales del módulo mejorado y su comportamiento térmico acorde a lo que se pretende alcanzar como es mejorar las condiciones térmicas interiores.

Se considera como análisis de estudio el 15 de julio como el día más extremo para Imata de acuerdo al archivo de clima para un año meteorológico típico generado con el programa *Meteonorm*, donde, la temperatura horaria promedio para dicho día es de  $-6,7^{\circ}\text{C}$  con una oscilación térmica de  $12,5^{\circ}\text{C}$ , y la radiación solar de  $5,76\text{kWh/m}^2$ . En vista de lo último, se pretende aprovechar sus bondades energéticas para mediante el diseño pasivo, técnicas y estrategias bioclimáticas en el módulo mejorado, se requiera un mínimo de energía a suplir al módulo con la consigna de contribuir a un ahorro y eficiencia energética frente a los embates del frío extremo y requerimiento de calefacción según temperatura adaptativa para Imata ( $15^{\circ}\text{C}$ ) que, para el día referencial en estudio, es de 7 kWh, frente a una temperatura de bienestar estandarizada de  $23^{\circ}\text{C}$  y requerimiento de calefacción de 18,8 kWh. Mientras que para el módulo típico a dichas temperaturas es de 30 kWh y 58,1 kWh. Resultados que permiten conocer el sobredimensionamiento energético cuando se consideran rangos de bienestar térmico estandarizados de otras latitudes donde por el propio clima, costumbres, fisiología, y economía, son distintos a la realidad Andina.

Respecto al uso de materiales locales en paredes, Imata es netamente adobera y en vista de ello, cabe resaltar que este materiales noble frente a otros de carácter convencional como el ladrillo de arcilla solido denominada comercialmente como King Kong (LKK) o, más modernamente las paredes tipo drywall en construcción ligera, no son los idóneos para zona de altura como Imata debido a que estos últimos por su masa térmica, presentan una menor densidad y espesor frente al adobe (0,40m). Como resultado frente a la temperatura exterior en horas extremas de “heladas” (05:00 a 06:00 a.m.), el adobe presenta las mejores prestaciones en la temperatura interior con un incremento de  $7^{\circ}\text{C}$  respecto al exterior, en comparación de los  $2^{\circ}\text{C}$  que presenta el LKK y configuración de pared drywall en dichas horas.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, simular y proponer un módulo experimental bioclimático mediante el programa de modelación térmica dinámica *EnergyPlus* para caracterizar su desempeño térmico.

Con objetivos específicos:

- Determinar los elementos constructivos óptimos a ser usados en la envolvente para el módulo bioclimático según análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo.
- Determinar las cargas térmicas de acuerdo a una temperatura de neutralidad definida para Imata (Arequipa, a 4519 msnm) según enfoque adaptativo dentro de un ambiente térmico **saludable**.
- Determinar el diseño óptimo del **módulo experimental** mediante la comparación de la propuesta de diversas técnicas constructivas (económicas y socialmente accesibles a la Comunidad en Imata) empleadas en el proceso de simulación.
- Analizar las oscilaciones térmicas del módulo bioclimático óptimo.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la antigüedad el ser humano ha buscado cobijo para refugiarse de las condiciones adversas del clima y protección de los elementos naturales externos circundantes. Siendo la envolvente de las edificaciones, como la piel en el ser humano, un elemento importante que separa el “interior” del “exterior”. El rol esencial de la envolvente está relacionado a la elección de materiales para su implementación, aspecto muy importante porque este definirá las condiciones térmicamente saludables del ambiente “interior”. Todos estos aspectos son abordados por lo que se conoce como el **diseño bioclimático en edificaciones**, el cual integra el clima, la reducción en el costo de construcción, la eficiencia energética, y los aspectos fisiológicos y psicológicos de la salud y comodidad de los ocupantes. Así, mediante simulaciones térmicas dinámicas computacionales, que requieren una cantidad significativa de experiencia, se pueden introducir parámetros detallados de la propuesta de edificación (Fumo, N. et al., 2010).

En este contexto, el estudio, diseño y simulación de un módulo bioclimático experimental en la comunidad de Imata-Arequipa a 4519msnm donde por su ubicación: latitud 15° 50' 11" Sur y longitud 71° 5' 15" Oeste (SENAMHI-MINAM, n.d.), la radiación solar bordea anualmente los 6 kWh/(m<sup>2</sup>día) (SENAMHI, 2003), y donde las temperaturas mínimas absolutas llegan hasta -23°C (SENAMHI-FAO, 2010, p. 28), siendo la comunidad en toda la región la más azotada por los fenómenos climatológicos como la helada y frío extremo. Es de vital importancia conocer y seleccionar los materiales idóneos, en base a un diseño y uso de estrategias bioclimáticas, que conlleven a un ahorro energético y logro de la salubridad térmica a partir del uso una data climatológica *in situ* del lugar para las simulaciones térmicas.

Estudios de investigación de módulos bioclimáticos experimentales que consta de cuatro paredes de 2,44m x 2,44m de arena y cemento y pintura blanca a base de cal, han sido

realizados en climas cálidos como México los cuales integran sobre su envolvente sistemas de control solar dada la climatología del lugar, han demostrado mediante el estudio del rendimiento de tres módulos experimentales diferentes, que el que lleva un sistema de control solar y paredes de tierra apisonada (tapial), presenta el mejor rendimiento térmico frente a los otros dos que llevan, uno, techo verde, y el otro ningún control solar (Del Castillo, B. et al., 2017).

Por otro lado, estimar la carga térmica de calefacción y refrigeración de una edificación en la cual los diseñadores raramente basan sus decisiones elaboradas en simulaciones energéticas, es crucial para el desarrollo del rendimiento energético de la edificación. Un ejemplo que destaca en este sentido son las simulaciones de rendimiento de construcción que se llevaron a cabo utilizando el software *EnergyPlus* y el complemento de *OpenStudio* para la aplicación *CAD Trimble SketchUp*. En este caso ambos programas fueron utilizados para determinar el rendimiento energético de una construcción en Europa Central con resultados de simulaciones de la temperatura media mensual del aire interior, pérdidas por acristalamiento, ganancias por radiación solar, consumo de energía por calefacción y refrigeración y consumo de energía anual (Košir et al., 2018).

### **1.3 HIPÓTESIS**

El uso del programa *EnergyPlus* para el diseño y la modelación del módulo bioclimático experimental en Imata (Arequipa a 4519 msnm), permitirán no solo la adecuada selección de materiales, según la optimización de su desempeño térmico, sino también la selección de estrategias bioclimáticas que contribuyan a lograr, en el interior del módulo, un ambiente térmicamente sano y seguro para los pobladores de zonas afectadas por heladas en la sierra del Perú.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

El módulo bioclimático experimental será útil para, mediante su estudio y caracterización de su desempeño térmico, conocer las respuestas térmicas que este presentaría en condiciones climáticas extremas a la cual estaría sometido, como es el clima de Imata (a 4519msnm), siendo esta la Comunidad con el clima más severo en toda la Región Arequipa.

### **1.5 METODOLOGÍA**

El estudio se realizará en base a la metodología de ensayo y error mediante simulaciones térmicas dinámicas utilizando el software *EnergyPlus* el cual considera la transferencia de calor en estado transitorio.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Estado del arte del uso de programas de cálculo dinámico térmico/energético en viviendas y/o edificaciones

Actualmente a nivel mundial el uso de los programas de simulación térmica/energética en estado transitorio, para el cálculo de las cargas térmicas en edificaciones, es utilizado ampliamente dado la existencia de softwares computacionales que ayudan a simplificar cálculos tediosos de análisis de transferencia de calor dependientes del tiempo (Mateus et al., 2014; Rojas et al., 2016). Esos programas se diferencian de aquellos que realizan cálculos en estado estacionario, que por lo general se recomiendan en muchas normas a nivel de Sudamérica e incluso la Norma Peruana EM.110 de confort térmico y lumínico con eficiencia energética (MVCS, 2014).

Los cálculos en estado estacionario permiten caracterizar el nivel de aislamiento de las viviendas y/o edificaciones, dado que consideran solo el cálculo de la resistencia térmica o su inversa (la transmitancia térmica) que dependen solo del espesor y la conductividad térmica del material (Barrios et al., 2012). Es decir, la norma EM.110 (actualmente vigente en el Perú) considera solo el nivel de aislamiento de los materiales más no el almacenamiento de energía representado por la inercia térmica de los materiales que, en climas donde la radiación solar es considerable y las oscilaciones térmicas son altas (como es el caso de las zonas rurales Altoandinas al Sur del Perú), es necesario realizar un análisis de transferencia de calor, donde se represente la energía que el material podría almacenar durante el día y devolver al interior durante la noche.

En ese contexto, vamos a resumir solo por nombrar, algunos estudios desarrollados a nivel nacional y mundial en el uso de softwares de simulación dinámica térmica/energética en edificaciones para el cálculo de la Temperatura interior ( $T_i$ ), Humedad relativa (HR) y cargas térmicas, como variables principales de salida, a partir de variables de entrada como el archivo de clima. Para el presente estudio de investigación, se ha considerado el archivo de clima para un año típico meteorológico de Imata generado con Meteonorm (Meteonorm, n.d.)

En el mercado de softwares de simulación dentro del contexto descrito, existen los softwares comerciales con licencia, como aquellos softwares de código abierto y uso gratuito como el *EnergyPlus*, que se apoya en otros dos softwares también de uso gratuito como el *SketchUp* (Trimble Navigation, n.d.) y *OpenStudio* (NREL, n.d.).

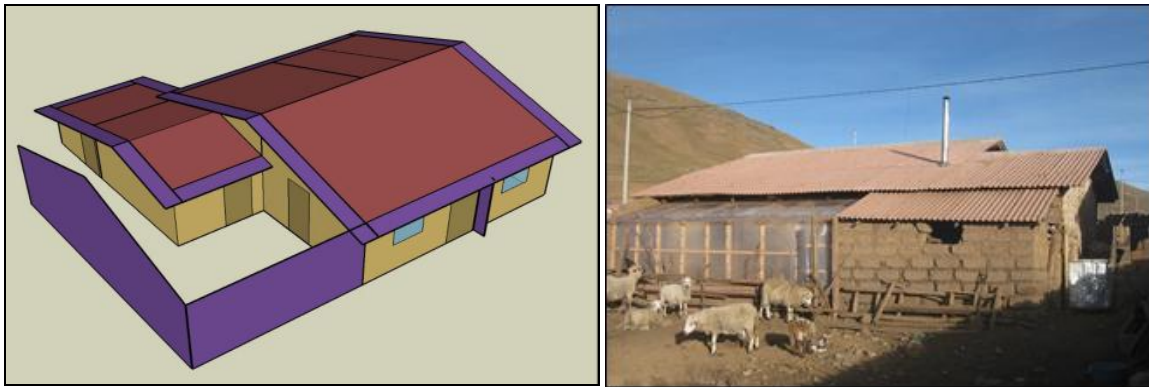
#### 2.1.1 En el Perú

A nivel nacional las tesis desarrolladas que han empleado el *EnergyPlus* como motor de cálculo para validar los modelos experimentales y determinar las diversas variables de salida como la temperatura interior y otros, se puede mencionar:

- **Tesis de Titulación, 2010. Evaluación Experimental de Cambios Constructivos para Lograr Confort Térmico en una Vivienda Altoandina del Perú.** (Huaylla, F., 2010).

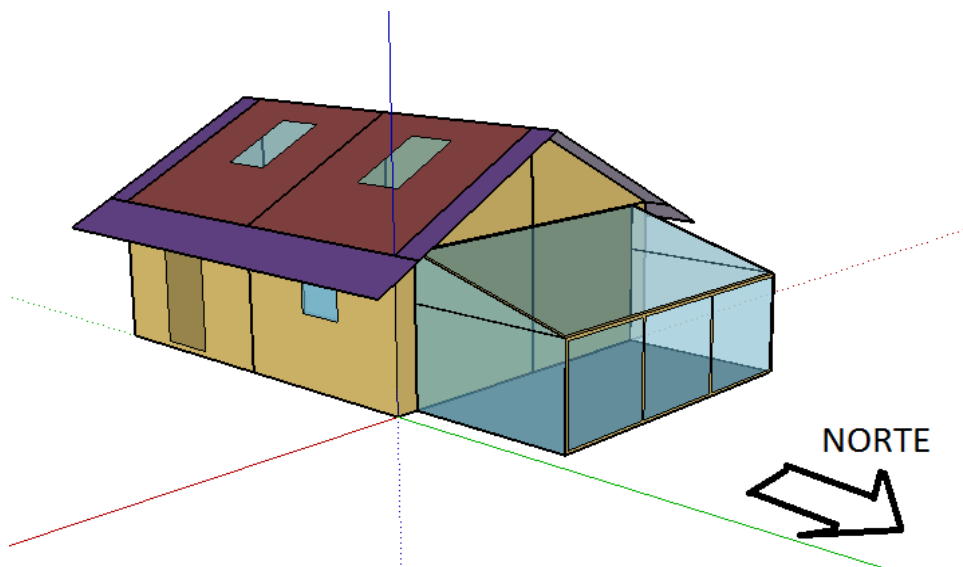
Esta tesis es la primera en modelar y simular una vivienda empleando *EnergyPlus* 3.0 que entre sus objetivos fue validar un modelo de vivienda existente en la comunidad de San Francisco de Raymina en Ayacucho (Figura 1). Para la simulación se propusieron modificaciones constructivas que permitan el aprovechamiento de la energía solar para elevar la temperatura de los ambientes. Desde mayo hasta agosto del 2009 se realizaron las modificaciones constructivas y se volvieron a registrar las condiciones térmicas en la vivienda. Como resultado final se observó un incremento de al menos 6°C respecto a los

mínimos de temperatura de aire registrados en los mismos meses en el 2008.



**Figura 1.** Vistas (izq.) modelo de vivienda en *SketchUp* y *OpenStudio*; (der.) modelo de vivienda experimental ubicado en San Francisco de Raymina (Huaylla, F., 2010).

Así mismo el mismo año, el Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI), en el proyecto “Estudio térmico en módulos de viviendas ubicadas en alturas mayores a 3500 msnm en la provincia de Castrovirreyna, región Huancavelica”, utilizó el software *EnergyPlus* 5.0 donde realizaron diferentes modificaciones constructivas para obtener mediante la simulación térmica (Figura 2), la propuestas más adecuada para aumentar la temperatura dentro de viviendas (Gómez, A. et al., 2010).



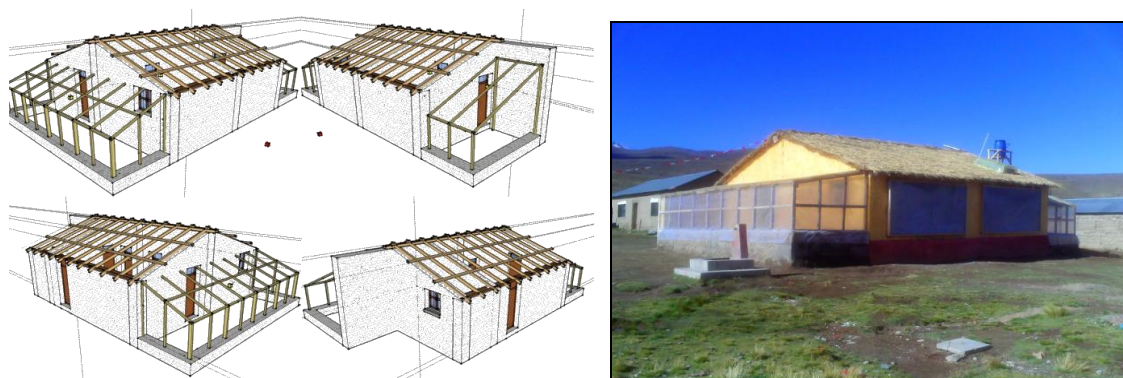
**Figura 2.** Modelo de simulación realizado en *SketchUp* enlazado al *EnergyPlus* (Gómez, A. et al., 2010).

- **Tesis de Titulación, 2014. Diseño, Construcción y Evaluación Térmica de un Módulo de Vivienda Rural en la Localidad de Vilcallamas Arriba, Distrito de Pisacoma, Provincia de Chucuito, Región Puno.** (Saavedra, G., 2014).

Esta tesis tiene como objetivo desarrollar un diseño de vivienda térmica rural evaluada, basada en criterios bioclimáticos, con énfasis en el uso de la energía solar y uso intensivo de herramientas de simulación computacional. Se utiliza el *EnergyPlus* 3.0 para determinar la temperatura interior resultando que, la temperatura simulada es superior a la medida durante



todo el día, entre 1,6 y 2,6°C dependiendo del intervalo de tiempo (Figura 3). El promedio más alto de temperatura simulada es 13,1°C a las 13 h y la mayor medida es 11,4°C a las 14h, en el modelo es superior por 1,3°C a la medición. El mínimo de temperatura simulada es 9,5°C a las 7 h y la menor medida es 7,8°C a las 6h, con una diferencia de 1,7°C. Dada estas diferencias de temperatura entre lo real y simulado para un caso y demás casos, el modelo se ajustó para comparar datos promedios las 24h presentándose una diferencia en promedio de 0,75°C en dormitorios y 1,6°C en la cocina sala.

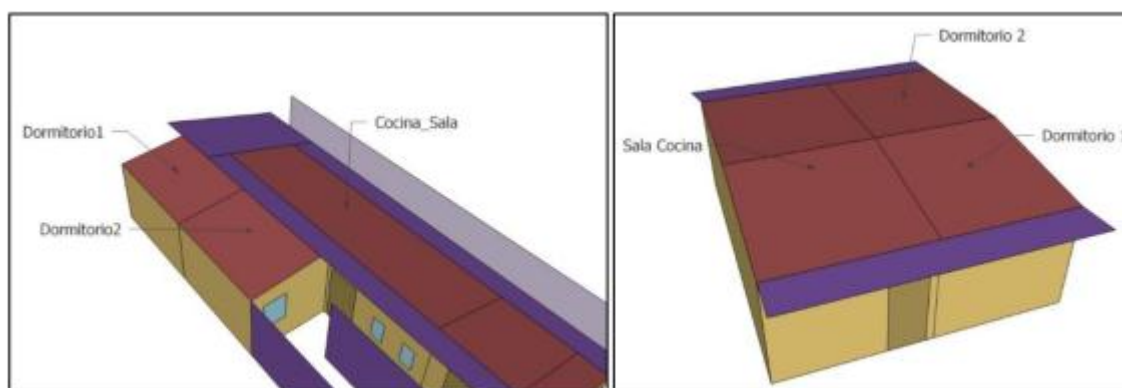


**Figura 3.** Vistas (izq.) modelo de vivienda en *SketchUp*; (der.) vivienda ubicada en Vilcallamas Arriba, Pisacoma, Puno (Saavedra, G., 2014).

Otra tesis desarrollada que ha empleado el *EnergyPlus* como motor de cálculo dinámico para determinar la temperatura interior así como la validación del modelo la encontramos en:

- **Tesis de titulación, 2014: Prototipo de Vivienda Rural Bioclimática en la Reserva Ecológica de Chaparri – Chongoyape.** Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo (Delgado, N., 2014).

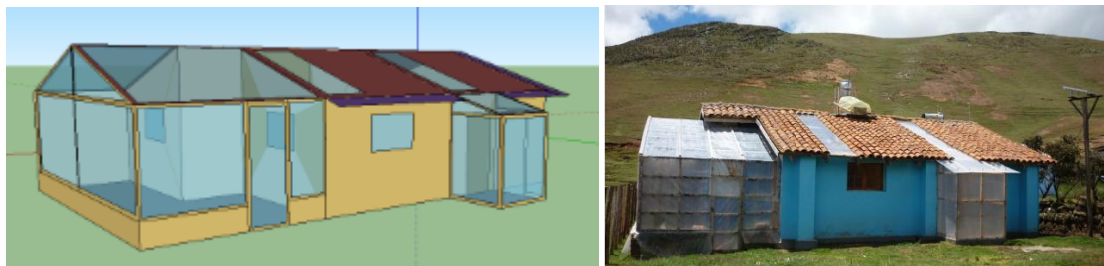
El estudio busca la comprobación teórica de la investigación, mediante la simulación térmica del prototipo de vivienda con la ayuda del software *EnergyPlus*, cuyo resultado final es la disminución de hasta -9 °C al interior de la vivienda en comparación con la temperatura máxima registrada en las viviendas tradicionales (Figura 4).



**Figura 4.** Vistas del modelo desarrollado en *SketchUp* y *OpenStudio* para la simulación con *EnergyPlus* (Delgado, N., 2014).

- **Tesis Maestría 2016: Desarrollo de un Procedimiento de Evaluación Integral de una Vivienda Rural Alto Andina para su Calificación como Vivienda Bioclimática Caso de la Vivienda Modificada y la Vivienda Nueva de San Francisco de Raymina de Ayacucho.** (Molina, J.R., 2016).

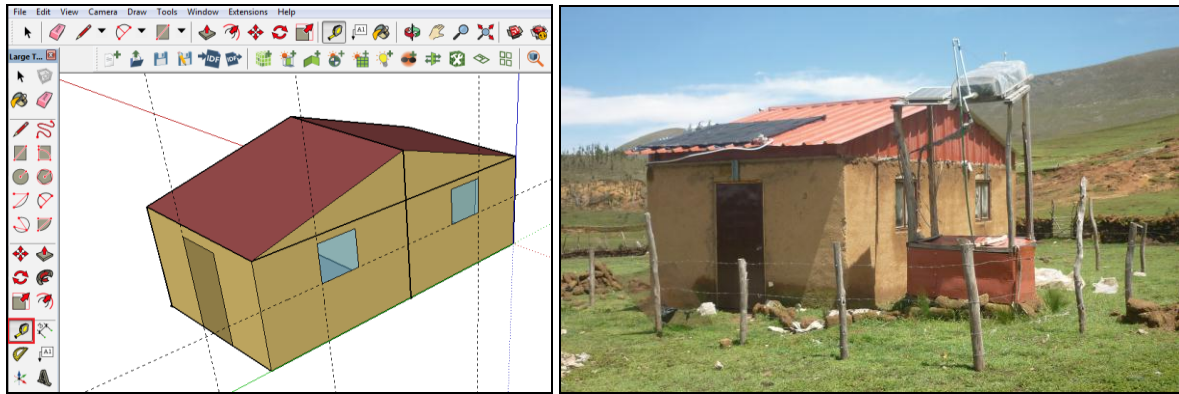
La tesis destaca la importancia de analizar la dinámica de utilización de la vivienda y la manera que los pobladores interactúan con las técnicas utilizadas con la finalidad de lograr el confort térmico deseado en el albergue de San Francisco de Raymina, Ayacucho (Figura 5). Se quiere establecer relaciones entre las actividades que ejecutan las personas dentro de la vivienda y el confort térmico personal, para calificar los efectos correspondientes y recomendar procedimientos operativos de la vivienda. Se destaca en la tesis el uso del *EnergyPlus 7.0* para determinar la temperatura interior de la vivienda obteniendo en un caso, en el dormitorio Sur que, la temperatura simulada respecto a la registrada o medida en el día es mayor hasta en 7°C mientras que, en las noches, 4°C, y en otros casos es lo contrario, esto se debe a que no existe un adecuado hábito en el manejo de puertas, ventanas y contraventanas por parte del usuario repercutiendo en los resultados a tal punto que no existe un buen acuerdo entre lo simulado y lo real medido.



**Figura 5.** Vistas (izq.) modelo de vivienda simulado; (der.) vivienda experimental en San Francisco de Raymina (Molina, J.R., 2016).

- **Tesis Maestría, 2018: Evaluación Sistemática del Desempeño Térmico de un Módulo Experimental de Vivienda Alto Andina para Lograr el Confort Térmico con Energía Solar.** (Molina, J.O, 2018, Molina, J.O et al., 2017).

La tesis consistió en evaluar *in situ* un módulo experimental ubicado en la comunidad de San Francisco de Raymina en Ayacucho a 3700 msnm. Dicho módulo consta de dos ambientes independientes denominados ambiente Sur y Norte donde en cada uno de ellos se tiene instalado un sistema de climatización solar activo que usa agua como medio de acumulación por calor sensible (Figura 6). La evaluación consistió en doce configuraciones de medida, entre las que destacan, una configuración en la que al módulo solo se le incorporó técnicas de aislamiento; otra configuración en la que se usó sistemas de climatización pasiva u otra configuración en la que, además de diversos aspectos propios del uso del módulo como vivienda, se consideraron sistemas de climatización solar. Encontrándose como resultados, incrementos de temperatura al interior del módulo considerando una operatividad concienzuda de sus técnicas bioclimáticas implementadas y ganancias internas para alcanzar su comodidad térmica, son del orden de los 10°C en promedio y, de más de 15°C en horas críticas de la madrugada respecto a la temperatura exterior de -7,09°C a las 6:00am. Los resultados muestran un buen acuerdo entre la simulación y los datos experimentales, con una diferencia de temperatura promedio entre lo medido y simulado de 0,28°C.



**Figura 6.** Vistas, (izq.) diseño del módulo utilizando *SketchUp* y *OpenStudio*, (der.) módulo experimental en San Francisco de Raymina.

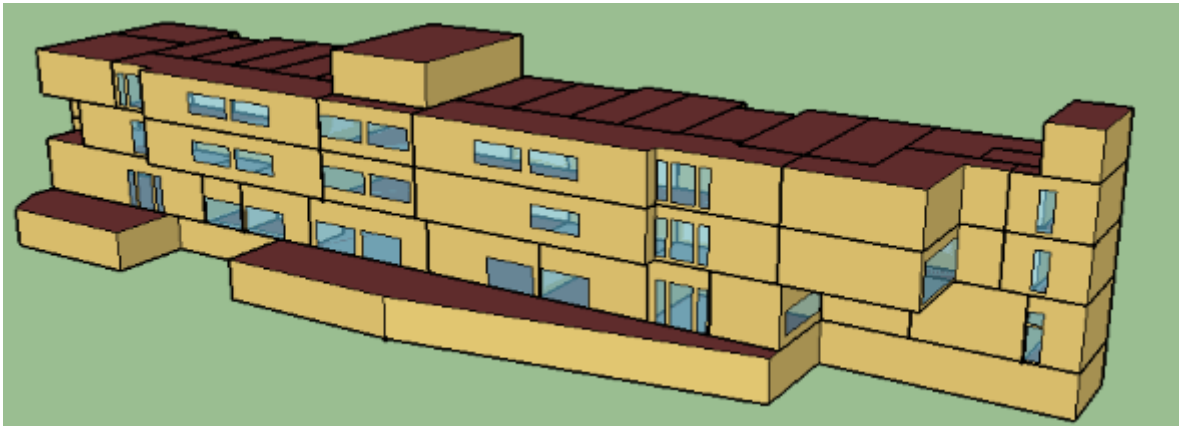
### 2.1.2 A nivel internacional

A nivel internacional las aplicaciones son vastas y entre ellas solo por nombrar se describirá brevemente cinco casos de uso del *EnergyPlus* para el cálculo como herramienta de simulación dinámica térmico/energético en edificaciones en zonas urbanas. Cabe resaltar que el modelado y simulado debe partir desde la concepción de la vivienda y/o edificio donde, la aplicación del software se inicia y camina paralelamente con el diseño. Son muchos los estudios que se pueden encontrar, muchos de ellos desarrollados en áreas urbanas y zonas de climas cálidos. Cabe resaltar que la aplicación del *EnergyPlus* en zonas rurales, específicamente a alturas de más de 4000 msnm como es el caso de Imata (4500 msnm), hasta el momento no han sido reportadas.

- **2016, Tesis de Grado en Ingeniería: Metodología para la simulación energética de un edificio terciario empleando la herramienta *EnergyPlus*.** Universidad Politécnica de Madrid (Bravo, V., 2016).

*EnergyPlus* no es uno de los métodos de simulación reconocidos oficialmente en la normativa actual española, por lo que su uso es muy reducido en este país, mientras que es el programa de referencia en los Estados Unidos, donde fue desarrollado por el Departamento de Energía (DOE). El programa de referencia en el marco de la certificación es la herramienta unificada LIDER-CALENER (CTE, 2016).

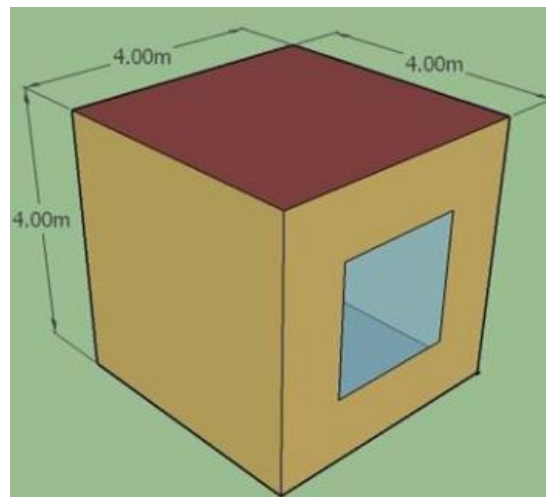
Este proyecto se debe considerar como un estudio de las capacidades de *EnergyPlus* como herramienta para la simulación en una certificación energética. Debido a la falta de material de investigación sobre el procedimiento para realizar un proyecto de este estilo, se ha enfocado gran parte del estudio a explicar detalladamente qué pasos se han ido realizando y qué decisiones se han ido tomando para que la simulación resultase lo más próxima a la realidad posible (Figura 7). Como se puede apreciar este trabajo está más enfocado a la parte de manejo de software de simulación que al marco técnico de las ecuaciones que sustentan los cálculos virtuales, provenientes de algoritmos TARP y DOE-2. Por tanto, no se ha necesitado aplicar los conocimientos adquiridos en el campo de la transferencia de calor de forma práctica para obtener los consumos del sistema, lo que sería prácticamente imposible por la complejidad de este, pero si para comprender el funcionamiento de estos sistemas.



**Figura 7.** Vista frontal del modelo simulado con *EnergyPlus* (Bravo, V., 2016).

- **2017: Consumo de energía en los edificios: una correlación entre la influencia de la relación de ventana a pared y la orientación de las ventanas en Trípoli, Libia** (Alghoul et al., 2017).

Este estudio se realizó para investigar la influencia de la relación ventana a pared (WWR) y la orientación de ventana (WO) en el enfriamiento, la calefacción y el consumo total de energía. El trabajo incluye un estudio de caso, en el que se analizó una pared externa de una pequeña oficina ubicada en la ciudad de Trípoli, Libia. Los resultados indican que el incremento de WWR produce un aumento en el consumo de energía de refrigeración y una disminución en el consumo de energía de calefacción (Figura 8). Se encontró que el consumo de energía de enfriamiento es sustancialmente mayor que el consumo de energía de calefacción, sin embargo, al agregar ventanas a las paredes del sur, el consumo de refrigeración aumenta drásticamente, mientras que el consumo de energía de calefacción disminuye a cero debido al calentamiento solar pasivo.

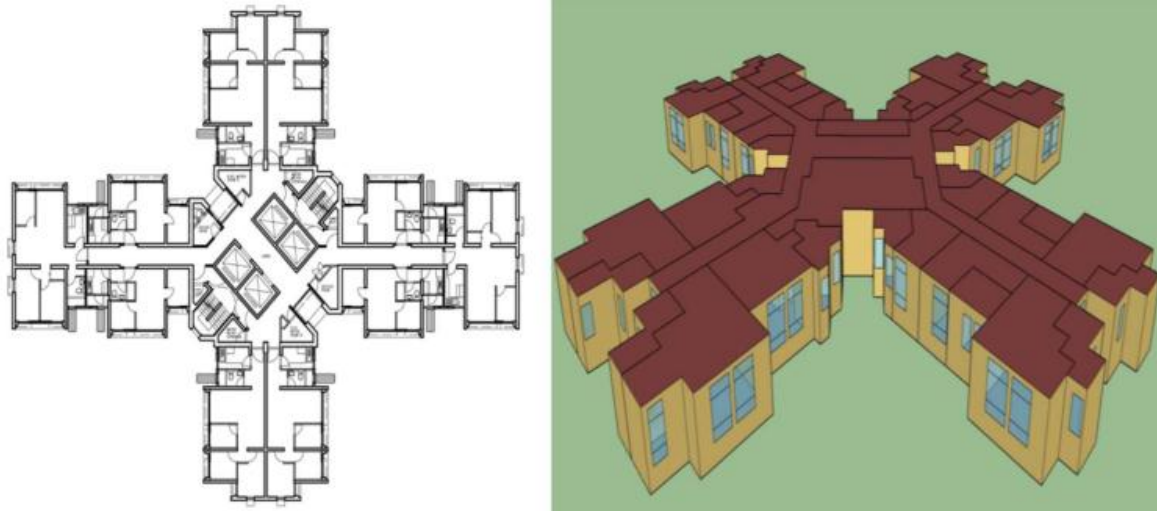


**Figura 8.** Esquema de la sala de la oficina en estudio (Alghoul et al., 2017).

- **2018: Enfoque basado en la simulación para optimizar los edificios de diseño pasivo: un estudio de caso sobre una forma arquitectónica típica en climas cálidos y húmedos** (Chen et al., 2018).

Las estrategias de diseño pasivo son importantes para lograr la sostenibilidad del edificio debido a sus influencias probadas sobre el rendimiento del edificio tanto en el aspecto energético como en el ambiental. El diseño del edificio, las propiedades termofísicas de los

materiales que constituyen la envolvente, la geometría del edificio, la infiltración y hermeticidad, y la estanqueidad al aire puede hacer grandes contribuciones a la baja energía o diseños de construcción de energía casi nula (Attia et al., 2012). Los algoritmos de control de atenuación de iluminación y de ventilación en modo mixto propuestos se aplican al modelo *EnergyPlus* para simular las demandas totales de energía de iluminación y refrigeración mediante la incorporación de los criterios de diseño relacionados en un esquema de evaluación de edificios ecológicos locales (Figura 9).



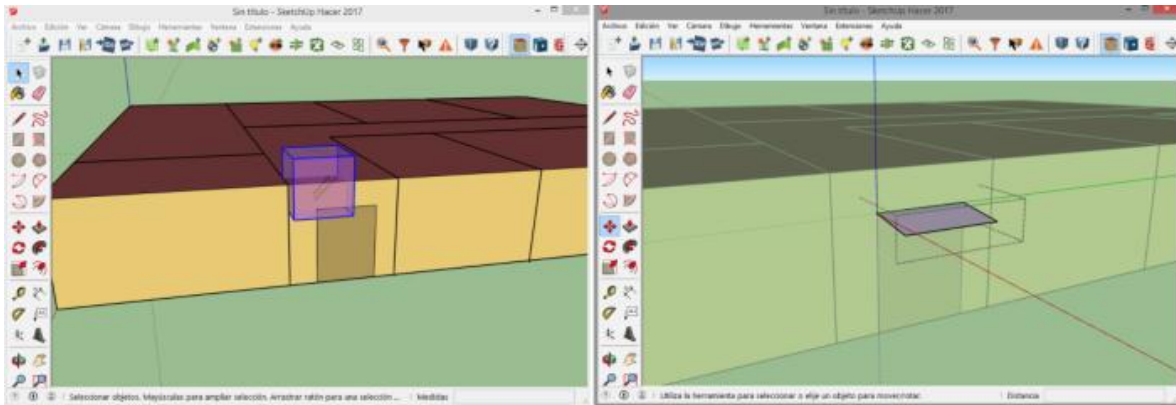
**Figura 9.** Plan y modelo de planta típico en el entorno de simulación (Chen et al., 2018).

- **2018, Tesis de Grado en Ingeniería: Modelización Energética de Edificios con Herramienta de Simulación Dinámica.** Universidad Politécnica de Catalunya (Caderot, N., 2018).

El objetivo del trabajo es realizar una caracterización energética de una parte del edificio mediante el uso de softwares para predecir el uso de energía del edificio y obtener un diagnóstico general sobre los consumos más relevantes, evaluar, contrastar y proponer mejoras del modo de explotación, como también dar a conocer el conjunto de herramientas de modelado y simulación energética (Figura 10). El estudio principal es simulado con los valores reales del edificio que se hayan podido hallar, y se comparará con dos simulaciones realizadas a partir de las transmitancias térmicas límite descritas por las normativas del Código Técnico de Edificación (CTE) y por edificios de consumo de energía casi nulo (nZEB<sup>2</sup>) respectivamente.

---

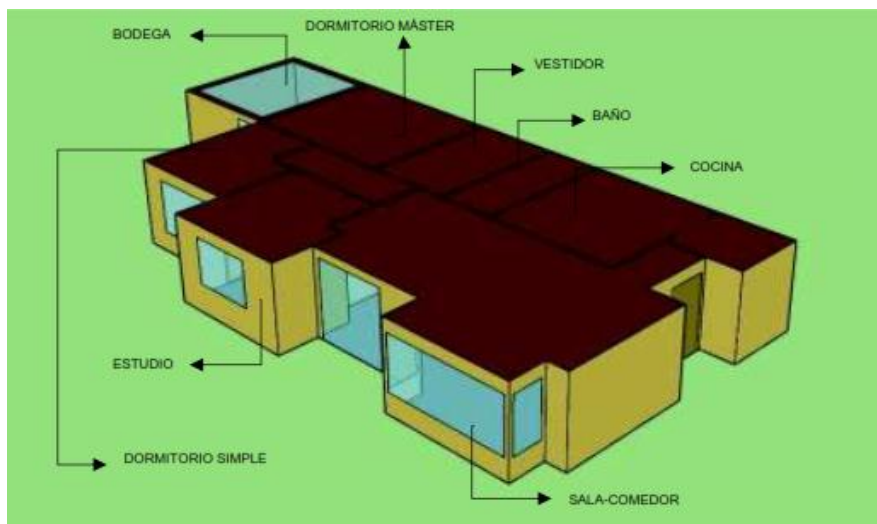
<sup>2</sup> Los edificios con consumo de energía casi nulo (nZEB) por lo que tienen un rendimiento energético muy alto. La baja cantidad de energía que requieren estos edificios proviene principalmente de fuentes renovables.  
Fuente: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings/nearly-zero-energy-buildings>



**Figura 10.** Creación de modelo para simulación (Caderot, N., 2018).

- **2018, Tesis de Titulación en Ingeniería. Estudio experimental del comportamiento térmico de una vivienda en Quito situada en el barrio La Vicentina.** Escuela Politécnica Nacional (Muñoz, J., Prado, I., 2018).

Este estudio busca determinar los parámetros más influyentes en el comportamiento térmico de una casa ubicada en un clima andino local. Para esto, la temperatura interior fue monitoreada y analizada para diferentes zonas térmicas (habitaciones) de la casa durante dos semanas, una en la estación seca (agosto) y la otra en la estación lluviosa (mayo). Luego, se realizó una simulación térmica de la casa de estudio y se validó con los datos experimentales (Figura 11). Esta simulación se utilizó para determinar el confort térmico en la vivienda, así como para evaluar el comportamiento térmico de la casa durante un año.



**Figura 11.** Geometría de la vivienda (Muñoz, J., Prado, I., 2018).

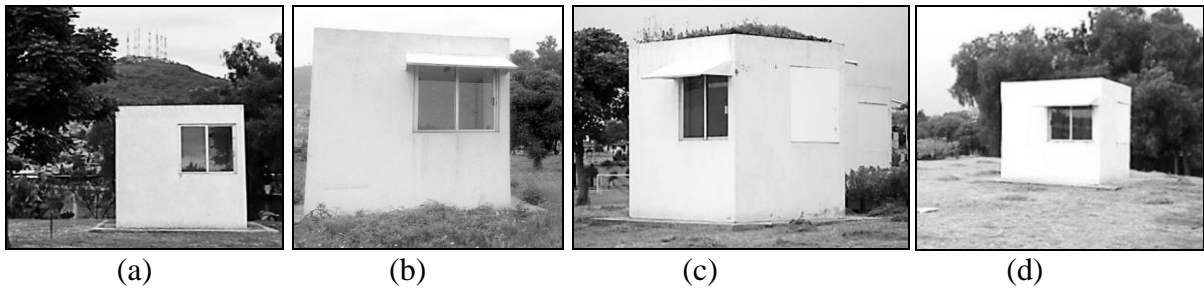
## 2.2 Módulos bioclimáticos experimentales

En esta parte se describirá brevemente la implementación y experimentación de módulos experimentales bioclimáticos desarrollados en otras latitudes, distintas a la analizada en el presente trabajo, considerando climas urbanos y cálidos.

- **2017: Análisis y evaluación de sistemas bioclimáticos para caracterizar su desempeño en módulos experimentales.** México. (Del Castillo, B. et al., 2017).

Este trabajo investigó el rendimiento térmico de tres módulos experimentales diferentes (EM) con un sistema de control solar (SCS) y diferentes características de la envolvente en relación con un módulo de control (CM) (Figura 12). Los resultados mostraron que el EM con el SCS

y las paredes de tierra apisonada presentaron el mejor rendimiento térmico en relación con el CM.



**Figura 12.** Vistas de los módulos experimentales (ME), (a) módulo de control (MC), (b) MC con SCS, (c) ME con SCS y techo verde, (d) ME con SCS y muros de tierra apisonada (Del Castillo, B. et al., 2017).

- **2017: Muros de tierra apisonada en clima mediterráneo: caracterización de materiales y comportamiento térmico.** España. (Serrano et al., 2017).

Este trabajo se enfoca primero en la caracterización de dos tipos diferentes de tierra para verificar la idoneidad de su uso en paredes de tierra apisonada. Después de la caracterización, se construyeron dos edificios experimentales en forma de cubículo en Barcelona y Puigverd de Lleida (España) para probar el comportamiento térmico de sus paredes en dos condiciones climáticas diferentes (Figura 13). Los perfiles de temperatura dentro de las paredes se monitorearon usando termopares y se analizó el perfil de temperatura de las paredes del sur en condiciones de flotación libre durante los periodos de verano e invierno de 2013. Los resultados muestran que la amplitud térmica desde afuera hacia adentro disminuye por las paredes de tierra apisonada, logrando temperaturas constantes en superficie interna de las paredes del sur.



**Figura 13.** Montaje experimental en Barcelona (izquierda) y Puigverd de Lleida (derecha) (Serrano et al., 2017).

### III. CLIMA

El clima es uno de los factores que afectan más directamente al confort del hombre, a sus condiciones de trabajo y de ocio, en definitiva, a su salud. Se llama clima al proceso que resulta de la interacción (en términos de masa y/o energía) entre la superficie terrestre y la atmosfera, determinado por el desigual reparto de la energía solar que recibe nuestro planeta (Tudela, F., 1982)

#### 3.1 Diseño para el clima

El diseño para el clima requiere que las viviendas se diseñen o modifiquen para garantizar que los ocupantes permanezcan cómodos térmicamente con un calentamiento o enfriamiento auxiliar mínimo en el clima donde se construyen. El diseño pasivo, trabajar con el clima, no en su contra, es un componente importante, como lo son los sistemas de calefacción y refrigeración de bajo consumo y el comportamiento inteligente de los ocupantes (Mosher, M., McGee, C., 2013).

#### 3.2 Energía Solar

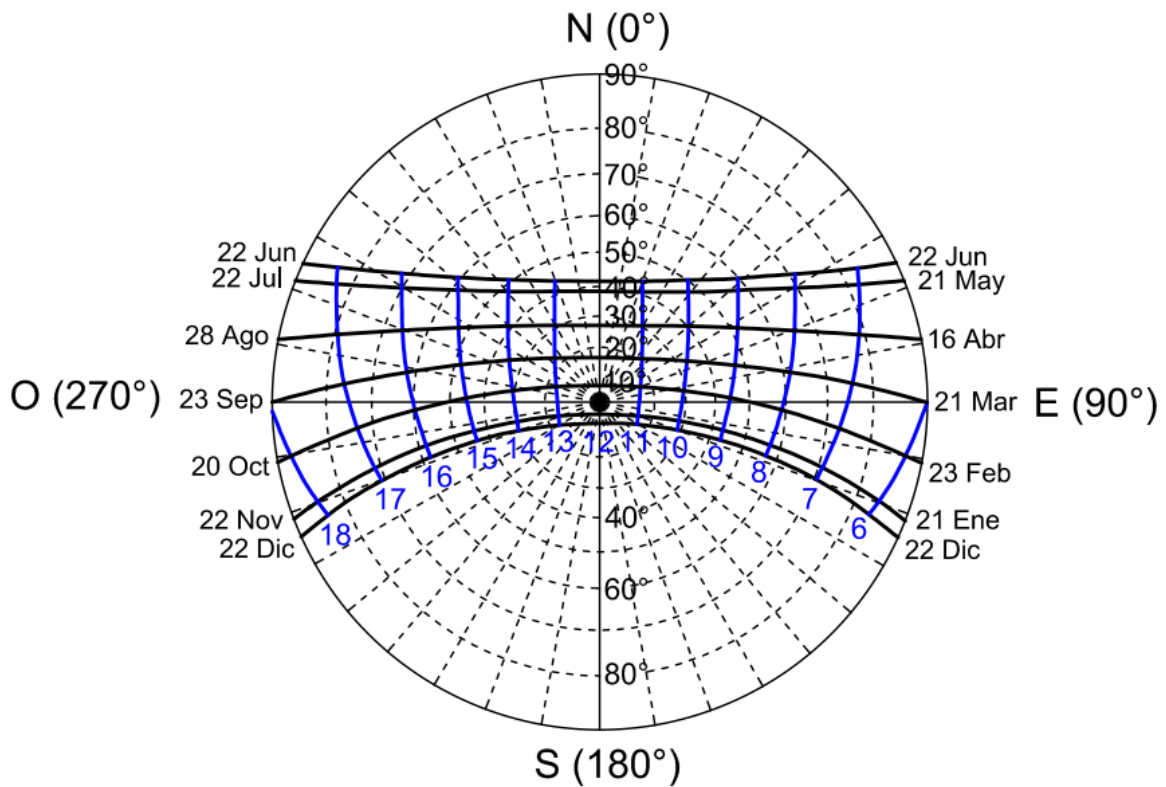
La energía solar es la principal fuente de energía renovable *in situ* que se puede utilizar para lograr una alta fracción de energías renovables para cubrir la demanda de energía restante en los edificios. Las principales necesidades de energía en los edificios se deben a la calefacción y/o la refrigeración, dependiendo de las condiciones climáticas locales y del tipo de construcción (Henning and Döll, 2012).

##### 3.2.1 Gráficas solares (carta estereográfica)

La gráfica solar de proyección estereográfica es una representación de la trayectoria solar basada en la proyección ortogonal, que consiste en trasladar la ruta del Sol, descrita sobre la bóveda celeste, sobre el plano del horizonte. Es una representación plana de la trayectoria solar. La lectura de los ángulos de acimut y altura solar se facilita, ya que se encuentran concentrados en una misma carta.

El uso de la carta solar estereográfica permite conocer el recorrido aparente del Sol en un año y para un día y una hora concreta, siempre que se haya definido la carta para una latitud determinada, que sería la base referencial de las estrategias pasivas como: la orientación y distribución de los recintos, tamaños y ubicación de ventanas y estrategias de captación directa, indirecta y aislada, así como estrategias de control solar, etc. Como ejemplo se muestra la carta estereográfica correspondiente a Imata de latitud  $15^{\circ} 50' 11''$  Sur (Figura 14). Las líneas negras continuas representan un día o fechas específicas del año y las líneas azules la hora solar o del día.



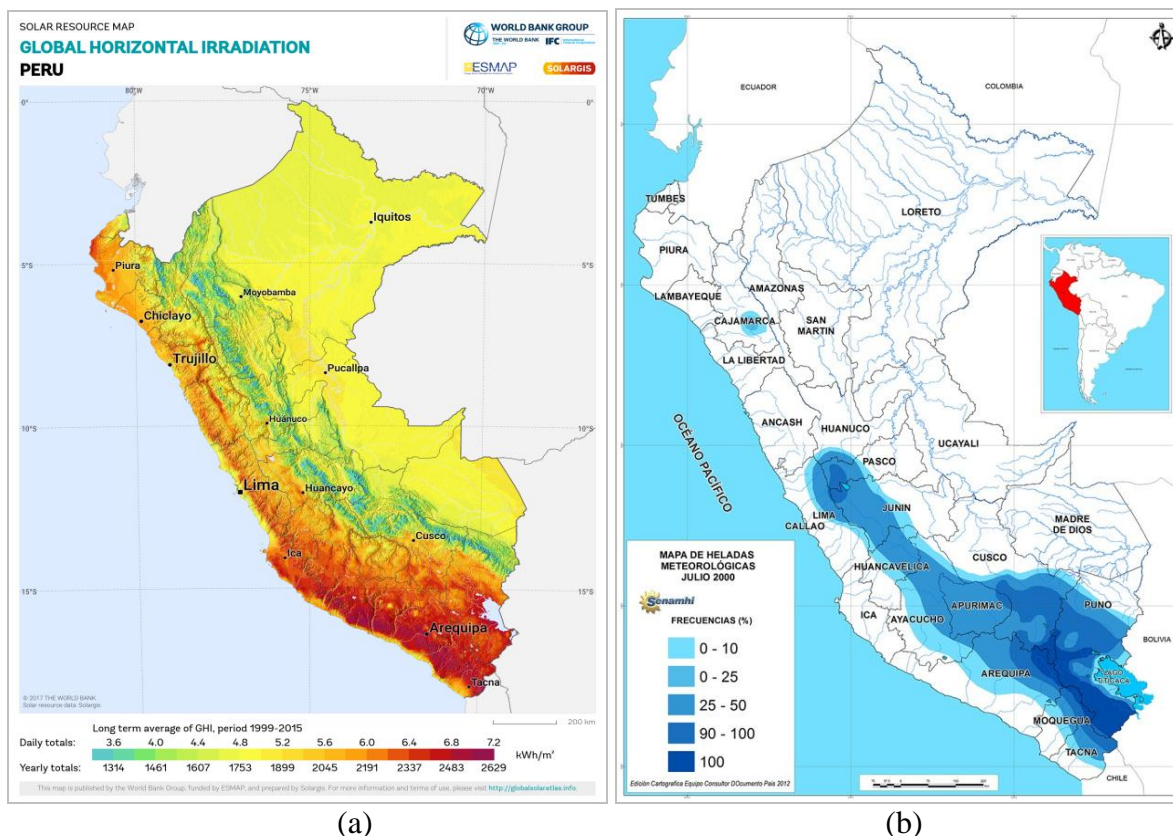


**Figura 14.** Carta estereográfica para Imata.

De la Figura 14, para los meses de marzo a septiembre el Sol se desplaza de este a oeste inclinado hacia el norte mientras que, para los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero el sol se ubica inclinado hacia el sur. En ese sentido, puede parcialmente entenderse la disponibilidad de energía solar al observar la carta solar estereográfica de Imata donde, claramente se destaca que el Sol se encuentra predominantemente al norte durante todo el año, y que para las fechas del 2 de noviembre y 7 de febrero, se encontrará en la posición del cenit.

### 3.2.2 Disponibilidad de energía solar

El Perú cuenta con un gran potencial solar que debería ser aprovechado en favor de la población y del medio ambiente, generando las bases para el desarrollo sostenible del País; según el SENAMHI, el promedio anual de energía solar sobre el territorio peruano es de  $5 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{día}) \pm 20\%$ ; en la sierra peruana como Imata, este promedio se incrementa dependiendo de las regiones, en la Figura 15a se muestra el mapa solar del Perú, representando la energía solar incidente diaria en promedio anual con una escala de colores. Así mismo, la Figura 15b muestra el mapa de frecuencia de heladas del mes de julio del año 2000 y paradójicamente las regiones donde se presentan las condiciones climáticas más desfavorables y severas también son las que bondadosamente reciben una mayor radiación solar, entonces, está el hecho de aprovechar su captación, transformación, transporte y transmisión al interior de las viviendas para dotarlas de condiciones térmicas saludables.



**Figura 15.** Mapas del Perú. (a) energía solar incidente diaria – promedio anual (World Bank Group, n.d.). (b) Frecuencia de heladas meteorológicas para el mes de julio del año 2000 (PREDES, 2016).

### 3.3 Zonas bioclimáticas

El Perú desde al año 2014 cuenta con la Norma Técnica Peruana EM.110 Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética donde para efectos de dicha Norma, la Zonificación Bioclimática del Perú consta de nueve zonas, las cuales se mencionan a continuación (MVCS, 2014).

**Tabla 1.** Zonificación bioclimática del Perú (MVCS, 2014)

ZONA BIOCLIMÁTICA	DEFINICIÓN CLIMÁTICA
1	Desértico costero
2	Desértico
3	Interandino bajo
4	Mesoandino
5	Altoandino
6	Nevado
7	Ceja de Montaña
8	Subtropical húmedo
9	Tropical húmedo

### 3.4 Población en estudio: Imata

IMATA, capital del distrito de San Antonio de Chuca (creado el 14 de noviembre de 1944), es un poblado reciente que se desarrolló a raíz de la instalación de una estación de tren que

uniera la ruta Arequipa- Puno. Muchos de los trabajadores de la empresa de ferrocarril se vieron en la obligación de trasladarse a la zona a fin de cumplir con su trabajo apropiadamente y fue así como, poco a poco, familias enteras se han asentado en los alrededores de la estación del tren.

Imata se encuentra a 4500 m.s.n.m. y a 80 km de Callalli. Hay una nueva carretera desde Arequipa hacia Juliaca/Puno, que llega después de 131 km a Imata. Imata es uno de los pueblos distritales más fríos del Perú; las temperaturas llegan hasta  $-25^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 16.** Vista aérea del Centro Poblado de Imata (Google Earth, 2016). 1: Municipalidad de Imata, 2: Iglesia, 3: Albergue, 4: Colegio, y 5: Tambo del MVCS.

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, INEI, el distrito de San Antonio de Chuca cuenta con una población aproximada de 1500 personas (INEI, 2016), y la población en alto riesgo ante heladas es de 33,5%.

### 3.4.1 Disponibilidad de datos climáticos de Imata

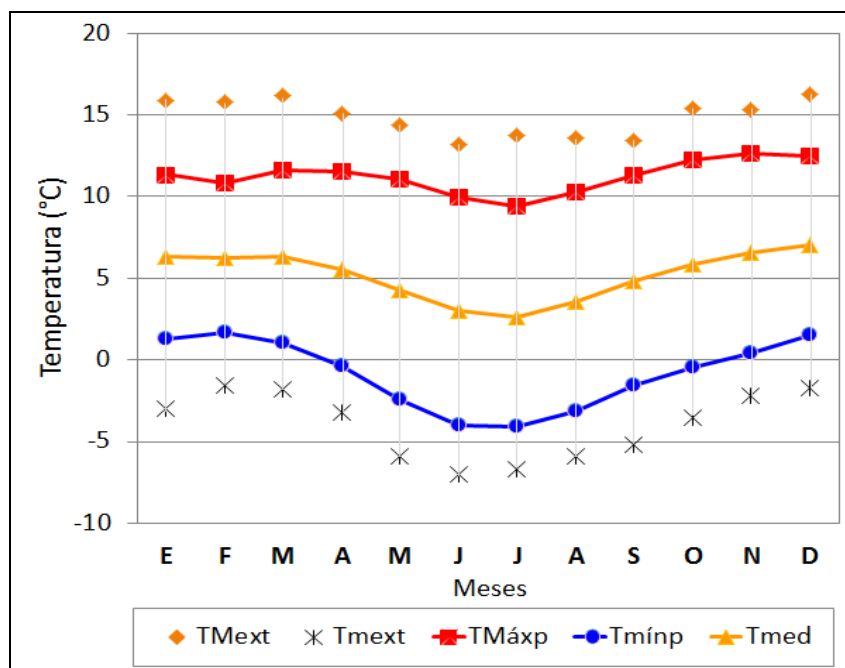
Dado a que se cuenta con una data climática generada con el Programa *Meteonorm* el cual genera datos climáticos de años meteorológicos típicos, es decir, un archivo de clima anual tomando datos promedios de una data de como mínimo, 10 años. En ese sentido, se empleará dichos datos para definir algunos parámetros climáticos característicos de Imata.

- **Temperatura.** El promedio de temperatura anual es  $5,2^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{med}}$ ), con una oscilación térmica promedio anual de  $12,1^{\circ}\text{C}$ . Es decir, hay una considerable variabilidad entre el día y la noche. En la Tabla 2 así como en la Figura 17, se puede observar que en promedio, la temperatura mínima diaria ( $T_{\text{mín}}$ ) se presenta en Julio, y la máxima diaria ( $T_{\text{Máx}}$ ) en diciembre. La temperatura horaria mínima extrema, 15 de julio, es de  $-6,7^{\circ}\text{C}$  a las 05:00 a.m., y la máxima extrema de  $5,8^{\circ}\text{C}$  a las 02:00 p.m., con una oscilación térmica de  $12,5^{\circ}\text{C}$ .

En un análisis de oscilación térmica diaria se aprecia que esta es mayor a diferencia del valor anual, en promedio diario se tiene 16,7°C. Este dato ha determinado el enfoque de un estudio para mejorar el confort térmico diario tomando decisiones acertadas en el diseño del módulo experimental.

**Tabla 2.** Temperaturas características de Imata.

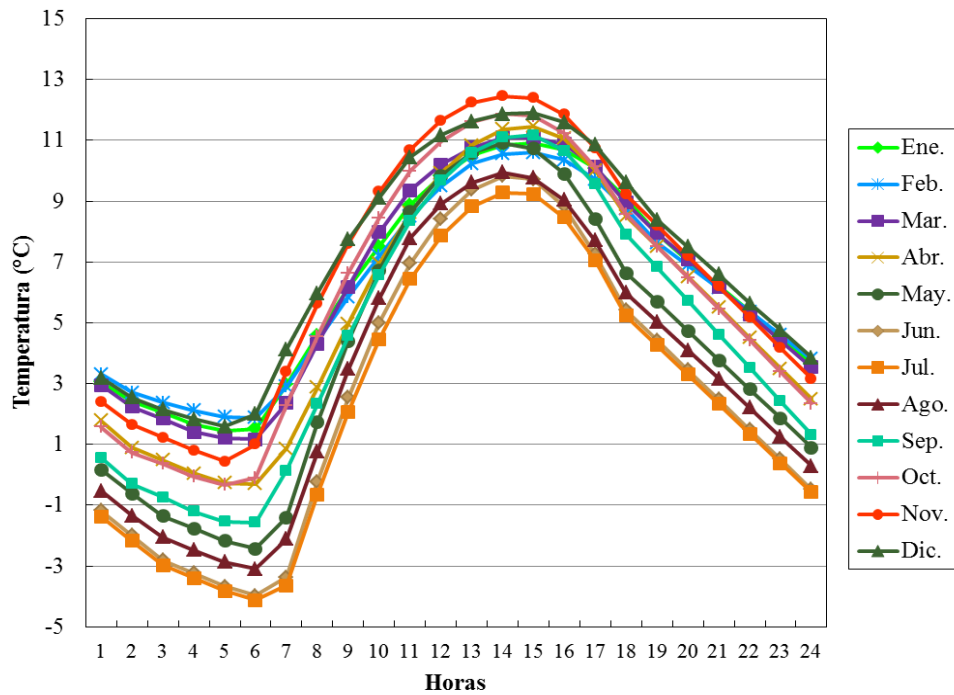
MES	TMáxp (°C)	Tmínp (°C)	Tmed (°C)	Oscilación térmica (°C)
Enero	11,3	1,3	6,3	10,0
Febrero	10,8	1,7	6,3	9,2
Marzo	11,6	1,1	6,3	10,6
Abril	11,5	-0,4	5,6	11,9
Mayo	11,0	-2,4	4,3	13,5
Junio	9,9	-4,0	3,0	13,9
Julio	9,4	-4,1	2,6	13,5
Agosto	10,3	-3,1	3,6	13,4
Septiembre	11,3	-1,6	4,9	12,9
Octubre	12,2	-0,4	5,9	12,6
Noviembre	12,6	0,4	6,5	12,2
Diciembre	12,5	1,5	7,0	11,0
Promedio				
<b>ANUAL</b>	<b>11,2</b>	<b>-0,8</b>	<b>5,2</b>	<b>12,1</b>



**Figura 17.** Gráfica anual de las temperaturas promedios mensuales diarias características en Imata. TMext: temperatura máxima extrema, Tmext: temperatura mínima extrema, TMáxp: temperatura máxima promedio diaria, Tmínp: temperatura mínima promedio diaria, y Tmed: temperatura media o promedio diario.

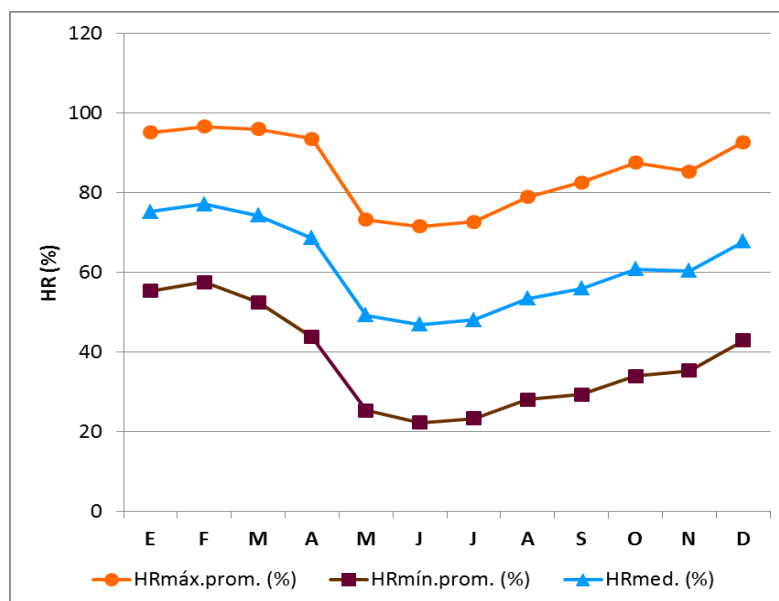
La Figura 18 muestra el comportamiento promedio horario diario mensual anual de la temperatura exterior donde, como se aprecia en la gráfica, Julio es el mes representativo de

frío extremo y heladas cuya ocurrencia se da entre las 05:00 y 06:00 a.m. (por debajo de los  $-3^{\circ}\text{C}$ ), mientras que las horas pico de temperaturas máximas promedio horarias mensuales se presentan entre las 02:00 y 03:00 de la tarde (la máxima en noviembre alrededor de los  $12^{\circ}\text{C}$ ).



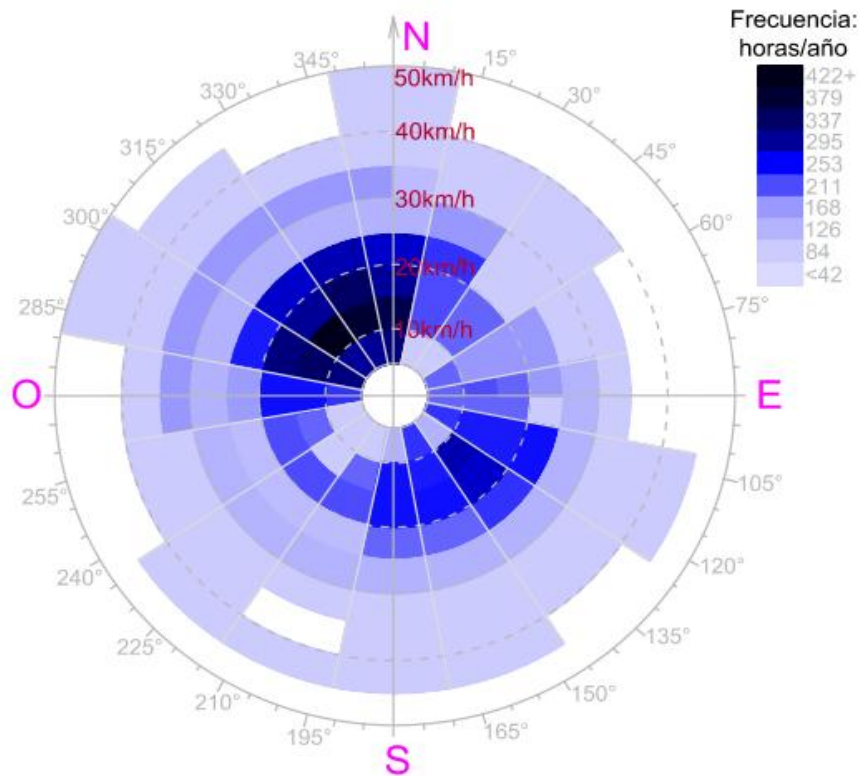
**Figura 18.** Temperaturas promedio horarias mensuales exteriores para Imata según archivo climático de año típico meteorológico.

- **Humedad Relativa.** La humedad relativa (HR) promedio anual para Imata es de 61,5%. Porcentajes altos de HR se presentan en los meses de enero a marzo, bajo porcentaje de HR entre los meses de mayo a setiembre, y moderados de octubre a diciembre y abril.



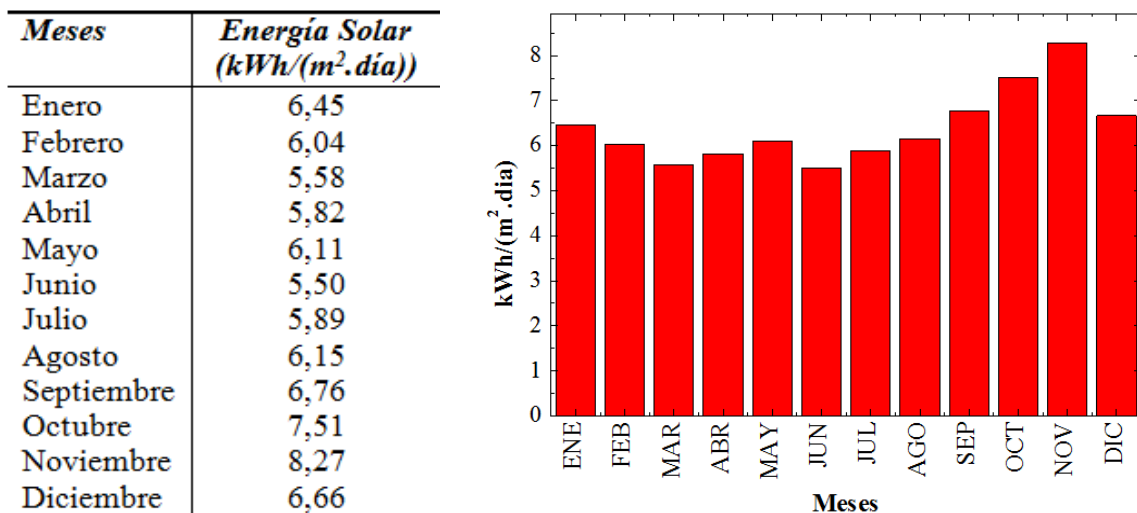
**Figura 19.** Características de la Humedad Relativa (HR) promedio mensual diaria en Imata, media (HRmed), mínima (HRmínprom.), y máxima (HRmáx.prom.).

- **Frecuencia de vientos.** La gráfica de frecuencia de vientos resulta de los datos de velocidad y dirección horaria ingresada. La velocidad se mide desde el centro hacia los anillos radiales, y la intensidad se representa mediante la escala de color. Para Imata los vientos predominantes son en dirección Noroeste, 422 horas en el año mantienen un velocidad de 15km/h, 253 horas al año tiene una velocidad de 25km/h, y menos de 42 horas una velocidad de 50km/h.



**Figura 20.** Frecuencia (horas/año) y velocidad anual del viento. Adaptado del *Ecotect Analysis* (AUTODESK, 2011).

- **Radiación solar global sobre superficie horizontal.** La radiación solar en Imata varía entre los 5,50 kWh/(m<sup>2</sup>día) en junio, y 8,27 kWh/(m<sup>2</sup>día) en noviembre tal como se aprecia en la Figura 21. Para el 15 de julio la radiación solar es de 5,76 kWh/m<sup>2</sup>.



**Figura 21.** Radiación solar mensual en Imata.

### 3.4.2 Tipología de vivienda rural en Imata

Actualmente las viviendas alto andinas como las de Imata, a pesar de mantener las características constructivas propias que privilegian el uso de materiales locales como el barro, arcilla e ichu<sup>3</sup> o paja, en formas tradicionales y generalizadas conocidas como el adobe o el tapial que por sus propiedades termofísicas almacenan el calor en el día para devolverlas con retraso por las noches (inercia térmica), poco o nada ayudan en contrarrestar los flagelos de los fenómenos climatológicos (helada y frío extremo), si sobre la envolvente de la vivienda (el cual es como la piel en el ser humano que separa el “interior” del “exterior”), los demás componentes constructivos utilizan materiales no idóneos para la zona como son las calaminas metálicas en los techos o cubiertas, marcos de ventanas metálicos, y puertas metálicas. Si a ello le adicionamos las infiltraciones de aire que predominan entre los marcos de puertas y ventanas con su vano o en el encuentro muro-techo (la infiltración es un flujo de aire no deseado ya sea del interior al exterior o viceversa a través de grietas o agujeros accidentales o no intencionadas sobre la envolvente de la vivienda), las condiciones térmicas al interior de la vivienda no serán muy lejanas a las condiciones exteriores.



**Figura 22.** Vistas de una vivienda típica en Imata, (izq.) puerta de calamina y ventanas de vidrio con marco metálico en la fachada principal, (der.) techos de calamina metálica con piedras que fijan su sujeción, vista posterior de la vivienda.

En los últimos años el uso de la calamina metálica como cubierta de techo en las zonas rurales alto andinas se ha masificado debido a su bajo costo y facilidad en su uso. Atrás quedó el uso del ichu o paja como cubierta de techos más por un problema de sentimiento de inferioridad económica que por el hecho de desconocer sus propiedades térmicas dado a que son conscientes de sus bondades naturales como material aislador del frío. El ichu o paja es un pasto natural con una conductividad térmica baja,  $0,09\text{W/m}^{\circ}\text{C}$  (para una cama de paja de 2cm), es decir, presenta una alta resistencia térmica (MVCS, 2014).

En el contexto de la realización de la tesis se viajó a Imata y se realizó *in situ*, un diagnóstico de la tipología actual de viviendas en Imata encontrándose los resultados presentados en la Tabla 3.

---

<sup>3</sup> Ichu, cuyo verdadero nombre científico es *Stipa ichu*, es un pasto del altiplano andino sudamericano, México y Guatemala empleado como forraje para el ganado, principalmente de camélidos sudamericanos. Es endémica de Guatemala, México, Costa Rica, El Salvador, Venezuela, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú, Chile y Argentina. Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Stipa\\_ichu](https://es.wikipedia.org/wiki/Stipa_ichu)

También es utilizado para cubrir los techos y dar consistencia a los morteros de arcilla, enlucidos y adobes. Fuente: (Protzen, J.P., 2005).

**Tabla 3.** Cuantificación de la tipología de las viviendas en Imata (Arequipa).

Elemento constructivo	Numero de vivienda con:					
	Adobe	Ladrillo	Bloquetas	Piedras	Sillar	Madera
<b>PAREDES</b>	148	43	6	1	1	1
<b>TECHO</b>	<b>Calamina</b>			<b>Concreto</b>		
	170			30		
<b>PUERTA</b>	<b>Metal</b>		<b>Madera</b>		<b>Calamina</b>	
	165		21		14	
<b>VENTANA</b>	<b>Vidrio</b>		<b>Calamina</b>		<b>Madera</b>	
	197		2		1	
<b>MARCO DE VENTANAS</b>	<b>Metal</b>			<b>Madera</b>		
	195			5		

De la tabla 3, y de la experiencia realizada en el trabajo de campo, podría asegurarse que en un futuro no muy lejano las nuevas construcciones en Imata serán en base al uso de materiales convencionales como el ladrillo y concreto. Más allá de no cumplir con las exigencias de protección frente al frío y/o heladas por su bajo espesor en comparación con el adobe o tapial por ejemplo (a pesar de que la conductividad térmica del ladrillo tipo King Kong utilizado  $0,47 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , es menor que el adobe,  $0,90 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  según norma EM.110), resulta en un gasto innecesario en la economía del poblador dado a que es un material para otras condiciones climáticas. Empíricamente el poblador tiene conocimiento que el uso de materiales “extraños” para su localidad no es la mejor opción pero es lo que la sociedad impone frente a cuestiones sociales de inferioridad de no sentirse menos que el otro y copian las cosas no apropiadas.



**Figura 23.** Vistas de las nuevas construcciones en Imata empleando material convencional no idóneo para la zona.



## IV. BIENESTAR TÉRMICO

Para diseños de edificios y propósitos ingenieriles, el bienestar térmico humano se define según la mayoría de los estándares internacionales (ISO 7730, 1994, ASHRAE, 1992) como: “Aquella condición de la mente que proporciona satisfacción con el ambiente térmico” (Fanger, P.O., 1973). Sin embargo, esta definición se puede considerar ambigua ya que se deja abierto tanto el significado de condición de la mente, como el de satisfacción, pero lo que sí se deduce correctamente es que el juicio del confort (o bienestar) es un proceso cognitivo influido por distintos tipos de procesos, por ejemplo, físicos, fisiológicos o incluso psicológicos (Ashrae, 2005).

En este aspecto de la denominación de confort cabe hacer un paréntesis y señalar que esta connotación no es la adecuada para la realidad altoandina como si, para las grandes urbes de otras latitudes y realidades sociales, tecnológicas y económicas. En las zonas Altoandinas usar la denominación de “confort” o “comodidad” como lo indica su traducción, no va con su realidad y tampoco se aplica. La RAE define el bienestar como: “Estado de la persona en el cual se le hace sensible el buen funcionamiento de su actividad somática y psíquica”, la cual va más ligada con la salud, en base a ello dado a que por la problemática de las heladas y frío extremo la salud se ve resquebrajada, en adelante se utilizará la palabra bienestar o bienestar térmico para referirnos al término confort térmico.

Las expectativas de bienestar dependen de varias circunstancias, como por ejemplo, el lugar donde se encuentre el ser humano, los motivos que hacen que se encuentre en dicho lugar, la época del año, etc. Sin embargo, según diversos estudios, aunque los climas, las condiciones de vida y las culturas difieran bastante a lo largo del mundo, la temperatura que la gente elige para el bienestar, bajo condiciones similares de vestimenta, actividad, humedad y velocidad de aire; es muy parecida (Ashrae, 2005).

### 4.1 Zona de bienestar térmico

Estudios realizados que indiquen zonas de bienestar térmico para zonas Andinas es un tema carente aún de investigación, específicamente en Perú dado a que depende del clima. Ante ello, lo que generalmente se hace, es tomar zonas de bienestar de otras latitudes los cuales han sido estandarizados y se toman como “referencias”, resultado de ello son el sobredimensionamiento de las cargas térmicas para calefacción y refrigeración de espacios interiores. Los valores de estas zonas son el resultado de la evaluación del bienestar en ambientes controlados específicamente en cámaras climáticas.

La finalidad del estudio de los “índices térmicos”, es llegar a establecer, las condiciones en las que el individuo expresa satisfacción térmica con el ambiente o, por el contrario, la ausencia de esas condiciones. Existen diferentes condiciones según diferentes autores como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Zona de bienestar térmico humano (González, E., 1986).

AUTORES	LÍMITES DE TEMPERATURA	LÍMITES DE HUMEDAD	OBSERVACIÓN
1. B. Givoni	21°C – 26°C	5 – 17 mmHg	Bienestar óptimo límite máximo permisible
2. V. Olgyay	23,9°C – 29,5°C	20% - 75%	Trópicos
3. ASHRAE	22,2°C – 26,6°C	4 mmHg	Bienestar óptimo
4. Yaglou Dinker	18,8°C – 23,8°C	30% - 70%	USA Verano
5. Koeningsberger y otros	22°C – 27°C	30% - 70%	Trópicos
6. C.E. Brooks	23,3°C – 29,4°C	30% - 70%	Trópicos
Zona propuesta de bienestar térmico	22°C 29°C 26°C	27% - 75% 20% - 40% 20% - 17mm Hg	Límite inferior Límite superior Límite máximo presión de vapor

#### 4.2 Diagrama psicrométrico o carta bioclimática

La actividad funcional de la persona alcanza su máxima eficacia en un estrecho margen de temperaturas corporales, entre 36,5 y 37°C, que el cuerpo humano consigue mantener frente a variaciones externas a través de mecanismos de regulación llamados <sup>4</sup>homeostasis (Cannon, W.B., 1932).

“Los efectos combinados del metabolismo, los mecanismos fisiológicos involuntarios, la elección del vestido y la adaptación del hábitat facilitan al ser humano adecuar a sus condiciones de bienestar un ambiente que le es hostil. Esta singular capacidad de adaptación hace al hombre trascender y ser el único ente vivo que construye y modela su hábitat de acuerdo con sus necesidades y con los recursos que el propio medio le otorga, configurando diversas formas de vida al conquistar distintas latitudes según su particular forma de entender la naturaleza” (Ruiz, T.P., 2007).

Aunque el bienestar humano no se puede medir solamente en términos de factores psicológicos, uno de los requisitos fundamentales (y esto es especialmente cierto en las zonas climáticas cálidas) es el mantenimiento del equilibrio térmico entre el cuerpo humano y su entorno.

Esto implica mantener la temperatura interna del cuerpo dentro de ciertos límites, a pesar de las oscilaciones relativamente grandes del medio exterior. Las condiciones en que se puede conseguir tal equilibrio, y el estado del cuerpo cuando llega a estar en equilibrio con el entorno, dependen del efecto conjunto de muchos factores; algunos de ellos, como el tipo de actividad, aclimatamiento y vestido del sujeto, son características individuales, mientras que otros, como la temperatura del aire, radiación, humedad y movimiento del aire, son factores ambientales (Pérez, J., 2004).

Para motivos de este trabajo dado a que se cuenta con el archivo de clima de un año

<sup>4</sup> Homeostasis, describe los mecanismos que mantienen constantes las condiciones del medio interno de un organismo, a pesar de grandes oscilaciones en el medio externo. Esto es, funciones como la presión sanguínea, temperatura corporal, frecuencia respiratoria y niveles de glucosa sanguínea, entre otras, son mantenidas en un intervalo restringido alrededor de un punto de referencia, a pesar de que las condiciones externas pueden estar cambiando.

meteorológico típico para el centro poblado de Imata en Arequipa generados con *Meteonorm*, con datos de temperatura y humedad relativa, el diagrama psicrométrico referencial para tener una idea de la influencia del clima sobre los módulos, es el que se muestra de manera ilustrativa en la Figura 24 la cual ha sido generado utilizando el programa <sup>5</sup>*Climate Consultant 6.0* que lee archivos de clima en formato o extensión <sup>6</sup>*.EPW*. Referencial porque este diagrama considera rangos de temperatura de confort no acordes al clima del poblador andino debido a que han sido elaborados en otras latitudes, con otras condiciones, y otro tipo de fisiología, empleando cámaras climáticas que simulan microclimas en base al control de la temperatura y humedad relativa.

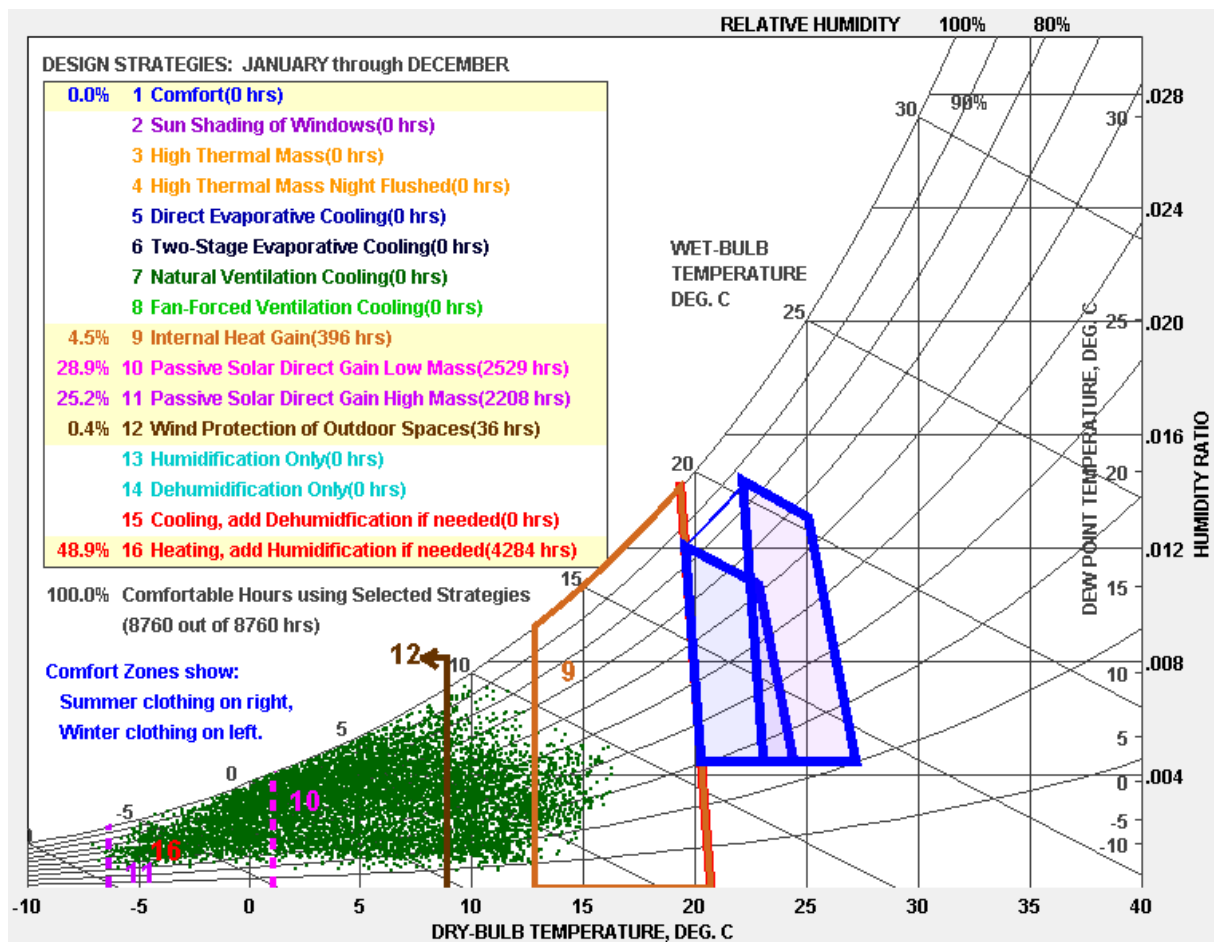
De la Figura 24 la zona encerrada con líneas azules representa la zona de bienestar térmico y la mancha de color verde representa las variaciones del clima de Imata obtenidas con *Meteonorm*. En base a ello, mediante el diseño bioclimático se pretende lograr alcanzar la zona de confort empleando distintas estrategias. Del diagrama psicrométrico un 0% de horas al año de confort (0 horas), para los módulos a construir. En caso se incluya la estrategia de diseño de ganancia de calor interno ya sea por personas o iluminación artificial, se contará con 4,5% de horas al año de confort (396 horas). Si se incluye ganancia solar pasiva directa de baja masa térmica, se consigue llegar a 28,9% de horas de confort (2529 horas). Incluyendo ganancia solar pasiva de directa de alta masa térmica, se consigue 25,2% de horas de confort (2208 horas). Incluyendo protección contra el viento por exteriores, se consigue 0,4% de horas de confort (36 horas). Finalmente añadiendo calefacción, se consigue 48,9% de horas de confort (4284 horas).

De lo último, cabe resaltar que debido al modelo de confort utilizado por el *Climate Consultant*, *ASHRAE Handbook of Fundamentals Comfort Model up through 2005*, con temperaturas de confort por encima de los 22°C, se sobrestima la energía de calefacción para el caso andino repercutiendo en un alto grado de demanda energética pudiendo llegar hasta el 50% (Chandel and Aggarwal, 2012; Albatayneh et al., 2017; Molina, J.O et al., 2017). Para las zonas andinas la temperatura de confort debiera considerarse mucho menor, tema que aún está pendiente por estudiar para definir los índices de confort andino y no emplear como referencia modelos estandarizados a nivel mundial.

---

<sup>5</sup> *Climate Consultant 6.0*, Programa informático que muestra datos climáticos de docenas de maneras útiles como temperaturas, humedad, velocidad del viento, cobertura del cielo y radiación solar en ambos para cada hora del año en unidades métricas o imperiales. Lee los datos climáticos en el formato EPW que el Departamento de Energía pone a su disposición sin costo (de hecho, hay más de 1300 estaciones de todo el mundo disponibles en este formato).

<sup>6</sup> *EPW: EnergyPlus Weather Files* (archivo de clima de entrada al programa *EnergyPlus*).



**Figura 24.** Diagrama psicrométrico para Imata elaborado con *Climate Consultant 6.0* (“Climate Consultant,” n.d.). Los números entre paréntesis por cada estrategia representan la cantidad de horas anuales que contribuye su aplicación para alcanzar la zona de confort.

### 4.3 Factores que determinan el bienestar térmico

Las variables que afectan la disipación de calor del cuerpo (y por lo tanto también la comodidad térmica) se pueden agrupar en tres conjuntos:

**Tabla 5.** Factores que afectan el bienestar térmico (Szokolay, S., 2004).

AMBIENTAL	PERSONAL	CONTRIBUYENTES
Temperatura del aire	Metabolismo (actividad-MET)	Comida y bebida
Movimiento del aire	Arropamiento (Clo)	Fisiología
Humedad relativa	Estado de salud	Grasa subcutánea
Radiación solar	Aclimatación	Edad y género

### 4.4 Mediciones del bienestar térmico

Existen diferentes enfoques teóricos para determinar estándares térmicos, el enfoque cuantitativo y el enfoque cualitativo<sup>7</sup> (Gómez, A.G. et al., 2007).

<sup>7</sup> Al enfoque cuantitativo también se le conoce como analítico o determinista y al enfoque cualitativo en algunos casos se le llama adaptativo.

## Enfoque cuantitativo o predictivo

El enfoque cuantitativo reduce la sensación de confort a un balance de energía entre el individuo y el entorno. Procura tener controlado los parámetros físicos que afectan la preferencia térmica de las personas, y de cierta forma generaliza los resultados obtenidos, considerando que todas las personas en diferentes latitudes prefieren las mismas temperaturas.

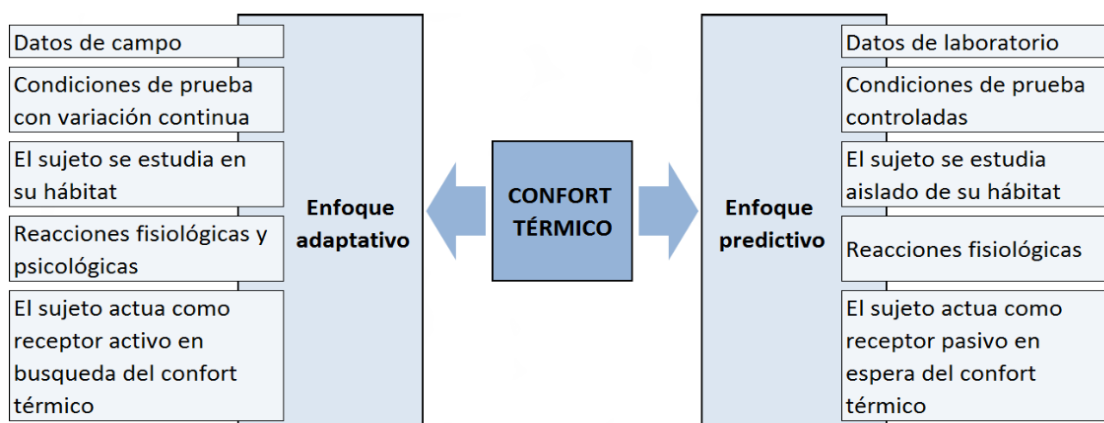
El enfoque cuantitativo se ha desarrollado en su mayor parte con trabajo experimental realizado en una cámara climática. Estas cámaras son laboratorios donde se pueden ajustar las condiciones ambientales de temperatura del aire y de radiación, la humedad y la velocidad del aire. Estas cámaras se han utilizado mucho en experimentos controlados, investigando el efecto de los parámetros físicos de confort. Este tipo de acercamiento permite tratar cada componente separadamente de la interacción en el entorno humano. Es importante mencionar que los modelos desarrollados con este enfoque representaron un gran aporte para la comprensión y evaluación del ambiente térmico (Gómez, A.G. et al., 2007).

## Enfoque cualitativo o adaptativo

El enfoque cualitativo del confort térmico no parte de considerar el intercambio de calor entre el cuerpo y el entorno, sino de observar que existen una serie de acciones que el ser humano puede realizar para alcanzar el confort térmico (Nicol, J.F., Humphreys, M.A., 2002).

A diferencia del cuantitativo, este no generaliza los resultados, ya que toma en consideración que los individuos prefieren diferentes temperaturas de acuerdo a la temperatura exterior que ellos experimentan, en este caso tiene que ver con el concepto de aclimatación y está estrechamente relacionado con el tiempo de permanencia que pasa el individuo en determinado lugar con un tipo de clima. En este enfoque no se interviene ni se controlan los parámetros físicos que afectan en la preferencia térmica de las personas (Ruiz, T.P., 2007).

En el siguiente esquema (Figura 25) se pueden apreciar las diferencias básicas entre los enfoques de estudios del confort térmico humano.



**Figura 25.** Diferencias básicas entre los enfoques de estudios del confort térmico humano (Rincón, M.L., 2015).

En este contexto, existen modelos de temperaturas adaptativas al confort térmico denominadas temperaturas de neutralidad ( $T_n$ ) que son asumidas como la temperatura de confort donde diversos autores han contribuido a su desarrollo como:

**Tabla 6.** Modelos de temperatura adaptativa o neutra ( $T_n$ ) (Gómez, A.G. et al., 2007).

<b>Autor</b>	<b>Modelo</b>
Humphreys (1976)	$T_n=0,534T_m+11,9$
Auliciems (1981)	$T_n=0,31T_m+17,6$
Griffiths (1990)	$T_n=0,534T_m+12,1$
Nicol et al. (1993)	$T_n=0,38T_m+17,0$
Brager /de Dear (1998)	$T_n=0,31T_m+17,8$
Humphreys / Nicol (2000)	$T_n=0,54T_m+13,5$

$T_m$ : promedio mensual de la temperatura exterior del lugar.

La temperatura neutra, neutral o de neutralidad como se le conoce por diferentes autores, varia de lugar a lugar e igualmente de estación a estación, como una función de la media mensual de la temperatura exterior ( $T_m$ ).

Para el caso de estudio por ejemplo, Imata, dado a que los resultados y análisis se basarán en el día más frío o extremo del año como es el 15 de julio, la temperatura de bienestar o de neutralidad térmica según modelo Humphreys y Nicol es  $T_n=15^\circ\text{C}$ , considerando la temperatura exterior media mensual para julio de  $2,6^\circ\text{C}$  (ver Tabla 2). Asimismo, dado a que la oscilación de la temperatura exterior para Imata en el mes de julio es de  $13,5^\circ\text{C}$ , la amplitud de la temperatura de bienestar según la Tabla 7 para esta zona es,  $2,5^\circ\text{C}$ .

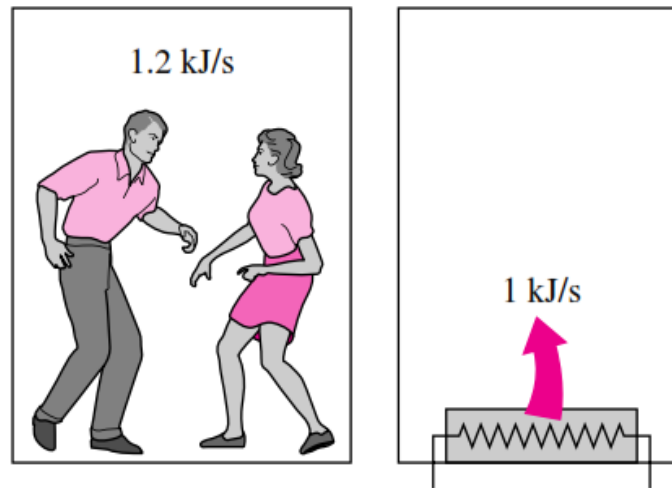
Para el cálculo de la amplitud de la zona de confort se comienza por determinar la oscilación media de la temperatura del aire, bastará hallar la diferencia entre los dos primeros datos climatológicos señalados: máxima y mínima promedio mensual. La amplitud de la zona de confort se determina entonces mediante la Tabla 7. Dicha amplitud, centrada en torno a  $T_n$ , determina los límites de la zona de confort (Morillón, D., 2004, p. 23,24).

**Tabla 7.** Amplitud de la zona de confort vs. oscilación media de la temperatura del aire (Morillón, D., 2004, p. 23,24).

<b>Oscilación media de la temperatura del aire (<math>^\circ\text{C}</math>)</b>	<b>Amplitud de la zona de confort (<math>^\circ\text{C}</math>)</b>
Menos de 13	2,5
13-15	3,0
16-18	3,5
19-23	4,0
24-27	4,5
28-32	5,0
33-37	5,5
38-44	6,0
45-51	6,5
más de 51	7,0

## V. EDIFICIOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR

El propósito original de un edificio es proporcionar refugio y mantener una temperatura interna cómoda o al menos habitable. Otros propósitos incluyen seguridad, privacidad y protección contra el viento y el clima. Para sentirse bien en un sentido térmico, un humano tiene que ser capaz de liberar una cantidad bien definida de calor. Si esto se vuelve difícil, una persona sentirá frío o calor. El cuerpo humano funciona como un reactor químico que convierte la energía química de los alimentos y el oxígeno respiratorio en trabajo mecánico y calor. La producción de calor puede variar de aproximadamente 100 W para una persona sedentaria a 1000 W para una persona que realiza ejercicio (ASHRAE Fundamentals, 1993).



**Figura 26.** Dos personas en un baile rápido proporcionan más calor a una habitación que un calentador de resistencia 1kW (Cengel, Y., Ghajar, A., 2015).

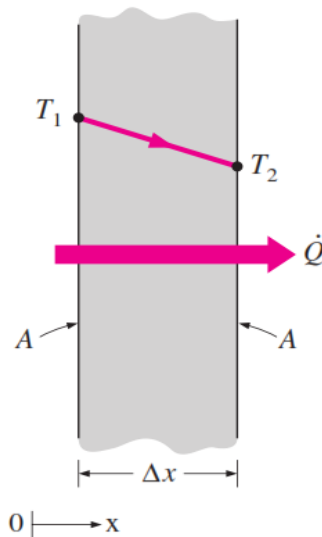
### 5.1 Factores que influyen en la transferencia de calor de materiales

Se tratarán varias propiedades que definen el comportamiento térmico de los materiales, indicando como responden a la aplicación de calor (Mecott, G.S., 2008).

#### Conductividad térmica ( $k$ )

Es la capacidad que tiene un material para transferir calor, y es, el cociente de la densidad del flujo térmico y el gradiente de temperatura ( $W.m^{-1}. ^\circ C^{-1}$ ). La ecuación 1 para la razón de la transferencia de calor por conducción, en condiciones estacionarias, también se puede concebir como la ecuación de definición para la conductividad térmica. Por tanto, la conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir el calor. Para un material tipo placa plana como se muestra en la Figura 27 se tiene:

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (1)$$



**Figura 27.** Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor  $\Delta x$  y área  $A$  (Cengel, Y., Ghajar, A., 2011).

### Capacidad térmica específica ( $c$ ) y capacidad calorífica volumétrica ( $C$ )

La capacidad calorífica específica es una propiedad del material que representa la energía necesaria para elevar la temperatura del material en un grado por unidad de peso (se calcula según la ecuación 2). Un parámetro relacionado, la capacidad de calor volumétrico  $C$  ( $J.m^{-3}.K^{-1}$ ) es igual a la capacidad calorífica específica  $c$  veces la densidad  $\rho$  de un material.

$$C = c\rho \quad (2)$$

### Densidad ( $\rho$ )

Define el cociente entre la cantidad de masa ( $kg$ ) que caracteriza al material y el volumen unitario ( $m^3$ ). Su valor se mide en ( $kg/m^3$ ).

### Difusividad térmica ( $a$ )

La difusividad térmica  $a$  ( $m^2/s$ ) es una propiedad específica del material que caracteriza la velocidad a la cual una excitación térmica se mueve a través de un material en caso de conducción térmica inestable. Una elevada difusividad térmica corresponde a una rápida propagación de la excitación de temperatura. La difusividad térmica está relacionada con la conductividad térmica, la capacidad calorífica específica y la densidad (Verbeke and Audenaert, 2018).

La difusividad térmica es definida por la ecuación 3 como sigue:

$$a = \frac{k}{\rho c} \quad (3)$$

### Efusividad térmica ( $b$ )

La efusividad térmica  $b$  ( $W.m^{-2}.K^{-1}.s^{1/2}$ ) es una medida de la capacidad de un objeto para intercambiar energía térmica con su entorno (se calcula según ecuación 4). Un valor alto para la efusividad térmica corresponde a un material que puede absorber y liberar fácilmente calor en la superficie. La mayoría de los metales tienen una alta efusividad térmica: a pesar de su alta masa térmica, no son adecuados para aumentar la inercia térmica de un edificio. Pueden absorber mucho calor, pero su alta efusividad térmica también les hace propensos a disipar el calor a un ritmo rápido a su entorno (Verbeke and Audenaert, 2018).

$$b = (kC)^{1/2} \quad (4)$$



### **Inercia térmica**

Se estima con base en la capacidad térmica ( $C$ ), a partir de la energía que puede retener un elemento por unidad de masa, al incrementar su temperatura un grado Celsius. Un ejemplo de la importancia de esta propiedad es cuando se utiliza la masa térmica para disminuir la velocidad de flujo de calor, almacenar energía y liberarla cuando la temperatura del entorno es menor a la temperatura de los materiales, así se puede evitar las variaciones de temperatura dentro del espacio.

La inercia térmica conlleva dos fenómenos, uno es la amortiguación en la amplitud u oscilación térmica ( $A'$ ), y el otro es el retardo de la temperatura ( $\Delta t$ ) interior respecto del exterior. En estado estacionario para una pared y transferencia de calor unidimensional se calcula a partir de la ecuación 5 y 6.

$$\Delta t = \sqrt{\frac{1}{2wa}}L = 0,28L\sqrt{\frac{T}{a}} \quad (5)$$

$$A' = \exp\left(-L\sqrt{\frac{w}{2a}}\right) \quad (6)$$

$L$  es el espesor de la pared,  $a$  es la difusividad térmica, y  $T$  es el periodo (24 horas). Un material poseerá mayor o menor inercia cuando mayor retardo o menor amortiguamiento tenga.

## **5.2 Transferencia de calor a través de la envolvente**

La conducción térmica de la envolvente del edificio es dominante en las regiones frías, el rendimiento térmico de la envolvente del edificio juega un papel muy importante en la reducción del consumo de energía del edificio. En las zonas frías, el consumo de energía de calefacción de aire acondicionado anual de los edificios públicos, hay alrededor del 50% consumido por la transferencia de calor de la envolvente del edificio. Por lo tanto, el estudio sobre la envolvente del edificio de ahorro de energía es muy importante (Feng et al., 2016).

### **5.2.1 Transferencia de calor independiente del tiempo**

Denominadas también en estado estacionario es decir, que no dependen del tiempo. Este parámetro termofísico se utiliza para determinar el grado de aislamiento de los elementos constructivos que conforman la envolvente de una vivienda o edificación como son, piso, muros, techo, ventanas, y puertas, de las diferentes capas homogéneas de las cuales está elaborado o constituido cada elemento. Y como se mencionó en los antecedentes muchas normas consideran actualmente incluso la Norma Peruana EM.110 este tipo de cálculo para determinar el rendimiento térmico de los elementos constructivos de una edificación para lograr obtener ambientes interiores confortables (o su inversa la resistencia térmica).

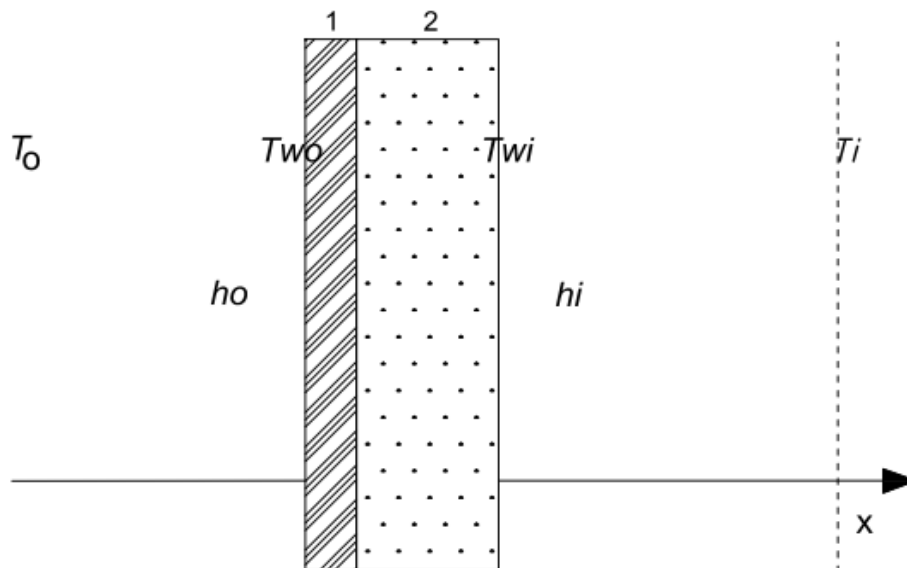
Dentro de los componentes fundamentales en el diseño bioclimático está el uso de materiales para los elementos, muros y techos, de la envolvente con propiedades físicas adecuadas al clima.

Debido a que en los países (de zonas templadas o polares) que más han estudiado el efecto de los materiales de la envolvente, el principal problema para el acondicionamiento térmico es en el invierno, donde la variación diaria de la temperatura externa es pequeña comparada con la diferencia entre la temperatura externa y la temperatura a la que se desea acondicionar la edificación y que las ganancias de calor por la energía solar no varían apreciablemente durante las 24 horas, es que los métodos para evaluar los materiales de la envolvente basados en un análisis de transferencia de calor en estado estacionario dan

resultados satisfactorios. Por ello y debido a la simplicidad de estos métodos, son los empleados para el desarrollo de las normas o reglamentos de construcción de estos países (Huelsz, G. et al., 2010; Huelsz, G. et al., 2009).

## MODELO FÍSICO

Para evaluar el comportamiento térmico de un muro o techo de la envolvente de una edificación es suficiente usar un modelo unidimensional del mismo, en adelante señalado genéricamente como muro, es decir, se desprecian los efectos bidimensionales y tridimensionales por las uniones con otros muros o techo, o por vanos en el muro. Los efectos de convección y radiación en las superficies del muro se modelan usando coeficientes de transferencia de calor de película,  $h_o$  para la superficie exterior y  $h_i$  para la interior, ambos en  $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ . El modelo físico se esquematiza en la Figura 28, en el caso particular de un muro compuesto por dos capas. Las temperaturas exterior e interior están denotadas por  $T_o$  y  $T_i$ , y las temperaturas en las superficie externa e interna del muro por  $T_{wo}$  y  $T_{wi}$  respectivamente (Huelsz, G. et al., 2009).



**Figura 28.** Modelo físico de la transferencia de calor a través de un muro de la envolvente. Caso de un muro de dos capas (Huelsz, G. et al., 2009).

Al utilizar el concepto de resistencia térmica ( $R$ ), el flujo de calor por unidad de área se puede expresar como:

$$q_x'' = \frac{T_o - T_i}{R} \quad (7)$$

Donde el valor  $R$  está dado por la suma de las resistencias de las superficies externa e interna,  $1/h_o$  y  $1/h_i$ , respectivamente, más las resistencias conductivas de las  $N$  capas,  $k$  es la conductividad térmica del material ( $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ), y  $L$  es el espesor del material (m).

$$R = \frac{1}{h_o} + \frac{L_1}{k_1} + \dots + \frac{L_j}{k_j} + \dots + \frac{L_N}{k_N} + \frac{1}{h_i} \quad (8)$$

Por lo tanto, en estado estacionario, la única propiedad  $N$  involucrada es la resistencia térmica del muro.

### 5.2.2 Transferencia de calor dependiente del tiempo

En climas donde la radiación solar es significativa y la oscilación de temperatura diaria es importante, condiciones en la que los métodos basados en un análisis de la transferencia de calor en estado estacionario no son aplicables y en ese sentido, es necesario considerar un análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo o en estado transitorio (Huelsz, G. et al., 2010; Rojas et al., 2016; Huelsz et al., 2016; Barrios et al., 2016).

Para analizar la transferencia de calor a través de un elemento compuesto por  $N$  capas de materiales, se emplea para cada  $j$ -ésima capa, la ecuación de conducción de calor en una dimensión dependiente del tiempo.

$$\frac{dT_j}{dt} - a_j \frac{d^2T_j}{d\chi^2} = 0 \quad (9)$$

Esta ecuación describe la variación de la temperatura dentro de la  $j$ -ésima capa  $T_j$  como función del tiempo, y de la posición transversal al muro  $\chi$ . El coeficiente  $a_j$  es la difusividad térmica del material de la  $j$ -ésima capa (m<sup>2</sup>/s) y se define como la relación entre la conductividad térmica  $k$  y la capacidad de almacenamiento térmico o capacidad calorífica del material  $C_j = \rho_j c_j$ .

$$a_j = \frac{k_j}{C_j} = \frac{k_j}{\rho_j c_j} \quad (10)$$

Donde,  $\rho_j$  es la densidad (kg/m<sup>3</sup>) y  $c_j$  es el calor específico (J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>).

## VI. DISEÑO BIOCLIMÁTICO DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES Y SUS COMPONENTES

“En la arquitectura tradicional de cualquier asentamiento, uno puede encontrar una relación muy fuerte entre las formas de la arquitectura y el clima local. La forma del refugio decide la mayor parte de su consumo de energía. El clima se convierte en la fuerza dominante para encontrar la solución cuando escasean los recursos disponibles, como los materiales de construcción y las técnicas de construcción. La fe irrealista de los edificios modernos en los sistemas artificiales conduce a diseños que ignoran el clima y producen edificios que son fisiológicos y psicológicamente inhóspitos y que consumen o demandan más energía ya que no ofrecen la protección térmica que se espera. El enfoque de diseño bioclimático en la arquitectura utiliza las condiciones microclimáticas locales del sitio para lograr el confort térmico en el edificio, al tiempo que se minimiza el uso de medios mecánicos y el consumo de energía” (Sarkar, A., 2010).

### 6.1 Diseño del sitio

Se describe la ubicación del lugar donde se construirá los módulos experimentales así como su forma y dimensiones, además de su orientación respecto a la trayectoria del Sol. Siendo la envolvente y constitución de materiales que la comprenden parte importante del diseño que definen el comportamiento térmico en una edificación junto a los sistemas de climatización natural, se describe cada una de ellas en los siguientes puntos.

#### 6.1.1 Ubicación geográfica de los módulos experimentales

Los módulos experimentales a estudiar se localizan en el Centro Poblado de Imata, Distrito de San Antonio de Chuca, provincia de Caylloma, región Arequipa. Las coordenadas geográficas de los módulos se detallan en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Ubicación geográfica de los módulos experimentales en Imata (Arequipa).

PARÁMETRO	VALOR
Latitud	-15,83°
Longitud	-71,84°
Zona relativa horaria GTM	-5
Altitud (m)	4469 msnm

La Figura 29 grafica en imágenes la ubicación donde se construirán los módulos experimentales en Imata (derecha parte baja) así como, su ubicación dentro del mapa de la provincia de Caylloma (derecha parte central), mapa de la región Arequipa (derecha parte superior), y por último, mapa del Perú (izquierda).



**Figura 29.** (Izq.) Mapa del Perú, (Der.) arriba, mapa de la región Arequipa; centro, mapa de la provincia de Caylloma, en círculo rojo la ubicación de Imata; y abajo, en marco rojo la ubicación donde se construirán los módulos experimentales (Google Maps y Google Earth, 2016).

### 6.1.2 Tamaño y forma de los módulos experimentales

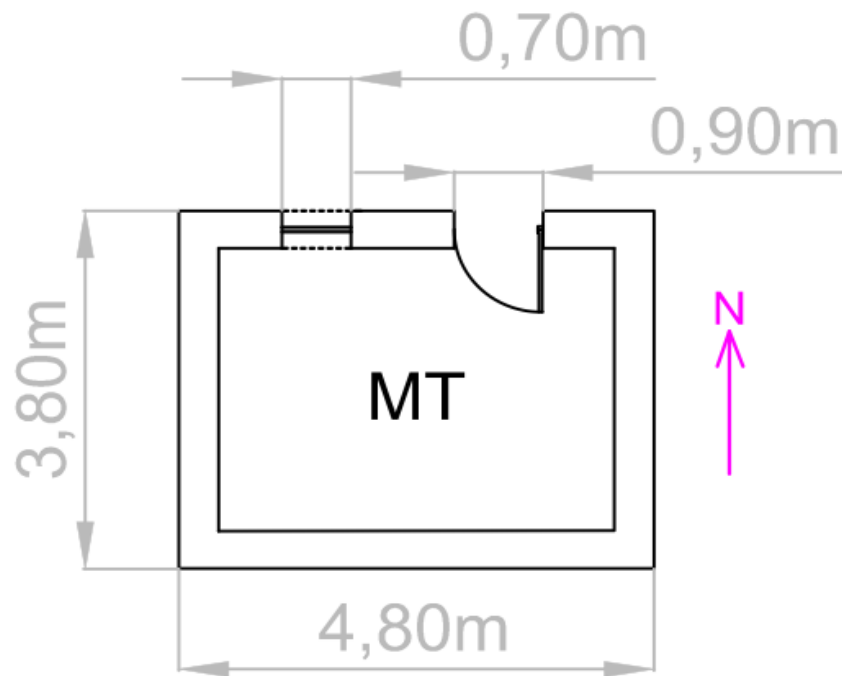
Se construirá un módulo experimental denominado, módulo típico (MT), en base al cual se adicionaran cambios a cada elemento constructivo cuyo resultado será según la modificación un módulo mejorado (MM), tal es así que mejorando el piso, paredes, techo, puertas y ventanas al MT se denominara MM1; adicionando a MM1 claraboyas en el techo y falso techo se denominara MM2; adicionando a MM1 un invernadero y falso techo se denominara MM3, y finalmente adicionando a MM1 claraboyas en el techo y falso techo además de un invernadero adosado se denominara MM4 (ver Tabla 9). Para cada cambio o adición de mejora por elemento constructivo del MT y MM1, se analizará el aporte térmico/energético.

El módulo por el interior es de 3m x 4m, con la parte larga orientado de este a oeste. Con una altura de muros de 2,20m interior (adobes de 0,4m x 0,4m x 0,12m), un techo a dos agua con una pendiente de 22°, y una puerta orientada al norte de 0,9m x 2,10m.

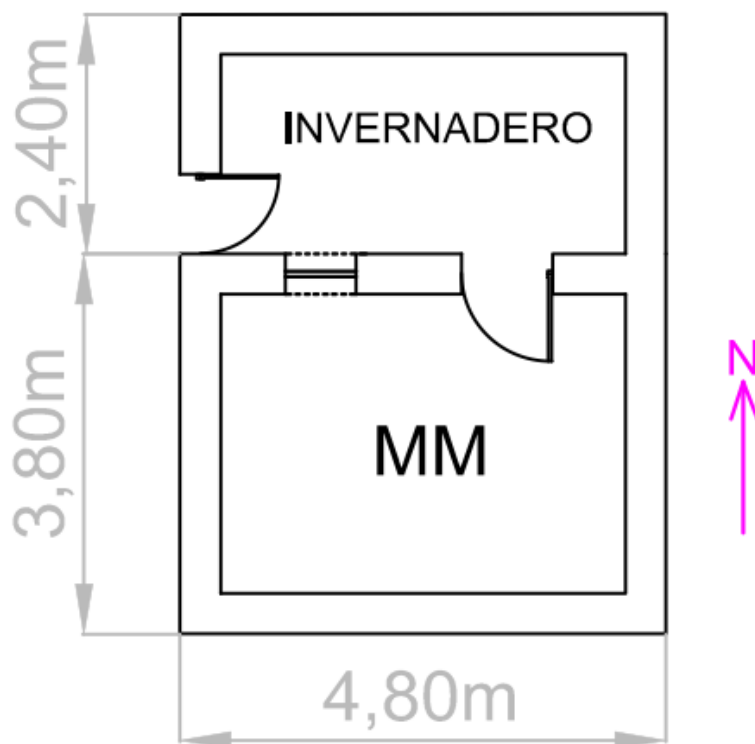
**Tabla 9.** Consideraciones entre el módulo experimental típico (MT) y mejorado (MM).

<b>ME</b>	<b>ELEMENTO CONSTRUCTIVO</b>	<b>MATERIALES</b>
<b>MT</b>	PARED	Adobe
	PISO	Tierra
	TECHO	Calamina
	VENTANA	Vidrio
	PUERTA	Calamina
<b>MM1</b>	PARED	Yeso+Adobe+Yeso
	PISO	Piedras+Aire+Madera
	TECHO	Fibro cemento
	VENTANA	Vidrio+Aire+Vidrio+Aire+Triplay
	PUERTA	Triplay+Aire+Triplay
<b>MM2</b>	PARED	Yeso+Adobe+Yeso
	PISO	Piedras+Aire+Madera
	TECHO	Fibro cemento
	CLARABOYA	Policarbonato
	FALSO TECHO	Triplay+Policarbonato+Poliestireno
	VENTANA	Vidrio+Aire+Vidrio+Aire+Triplay
	PUERTA	Triplay+Aire+Triplay
<b>MM3</b>	PARED	Yeso+Adobe+Yeso
	PISO	Piedras+Aire+Madera
	TECHO	Fibro cemento
	FALSO TECHO	Triplay+Poliestireno
	VENTANA	Vidrio+Aire+Vidrio+Aire+Triplay
	PUERTA	Triplay+Aire+Triplay
	INVERNADERO	Policarbonato
<b>MM4</b>	PARED	Yeso+Adobe+Yeso
	PISO	Piedras+Aire+Madera
	TECHO	Fibro cemento
	CLARABOYA+CV	Policarbonato+Madera
	FALSO TECHO	Triplay+Policarbonato+Poliestireno
	VENTANA	Vidrio+Aire+Vidrio+Aire+Triplay
	PUERTA	Triplay+Aire+Triplay
	INVERNADERO	Policarbonato

Los planos de planta de los módulos experimentales se presentan en la Figura 30:



(a)



(b)

**Figura 30.** Vistas de planta de los módulos experimentales, (a) módulo típico (MT) y (b) módulo mejorado (MM).

### 6.1.3 Orientación del módulo experimental

Dado a que la orientación es parte influyente al momento de estudiar el comportamiento térmico de viviendas y/o edificaciones ya que con ello se puede determinar la cantidad de

radiación solar que incide por cada superficie exterior de la envolvente, es decir las ganancias o pérdidas solares, se establece en principio que la orientación de los módulos experimentales será con la fachada principal mirando al norte y el lado más largo de este a oeste.



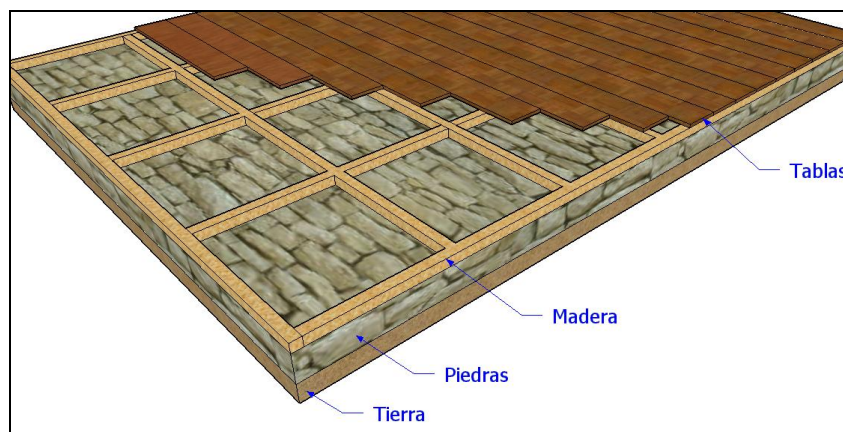
**Figura 31.** En recuadro rojo el terreno donde se construirá los módulos experimentales y la orientación con dirección al norte (Google Earth).

## 6.2 Diseño de la envolvente del módulo experimental

En las siguientes secciones se describirán los diferentes elementos constructivos que constituyen la envolvente del MT y MM, así como las características de los materiales empleados en cada una de ellas.

### 6.2.1 Pisos

En lo que respecta al MT el piso será de tierra apisonada, tal cual comúnmente se encuentra en las zonas rurales del país. Para el MM el piso llevará en un caso, a partir de un piso de tierra apisonada y nivelada, un encamado de piedras de 0,15 m de altura con una de sus caras planas, un entramado de madera de 2" de altura con espacios de aire, y tablas de madera de 0,02m de espesor.



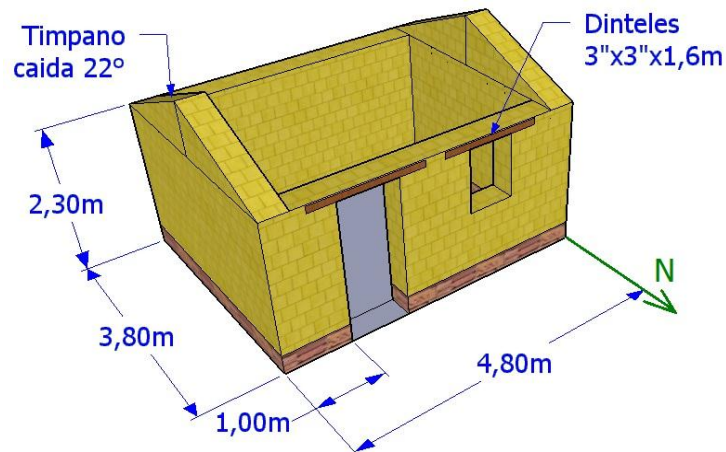
**Figura 32.** Configuración del piso aislado para el MM.

### 6.2.2 Paredes

Las paredes del MT y MM son de adobes de 0,4m x 0,4m x 0,12m. Solo las paredes del MM



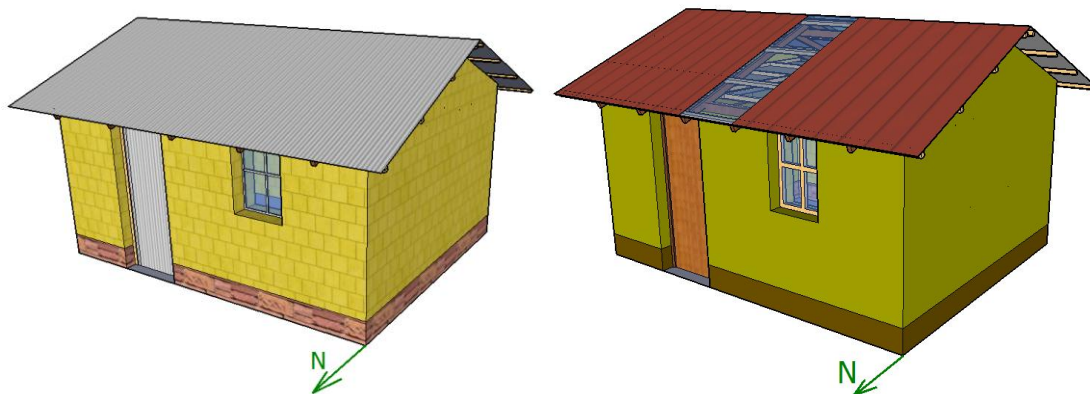
llevan un revestimiento de yeso de 0,02m por el exterior e interior, y los tímpanos también de adobes, tienen una caída de 22°C.



**Figura 33.** Vista de los muros del MT.

### 6.2.3 Techo y falso techo

El techo del MT es de calamina metálica de zinc de 0,0005m de espesor y no lleva falso techo, mientras que, del MM es de fibrocemento de 4mm de espesor con dos claraboyas a ambos lados de las alas del techo, de 0,8m x 2,5m, lleva falso techo de triplay de 4mm de espesor junto con poliestireno de 0,05m y claraboya de 0,8m x 3,0m (MM2), este último en la misma configuración del falso techo y por debajo de las claraboyas del techo. Las claraboyas son de policarbonato translucido de 5mm.



**Figura 34.** (Izq.) Vistas de los techos de los módulos experimentales. (Izq.) MT, (der.) MM2.

### 6.2.4 Ventanas

El MT lleva una ventana de vidrio de 3mm con marco de metal de 0,7mx1m, el MM1 lleva una ventana de doble vidrio de 3mm separados 0,01m y marco de madera también de 0,7mx1m.

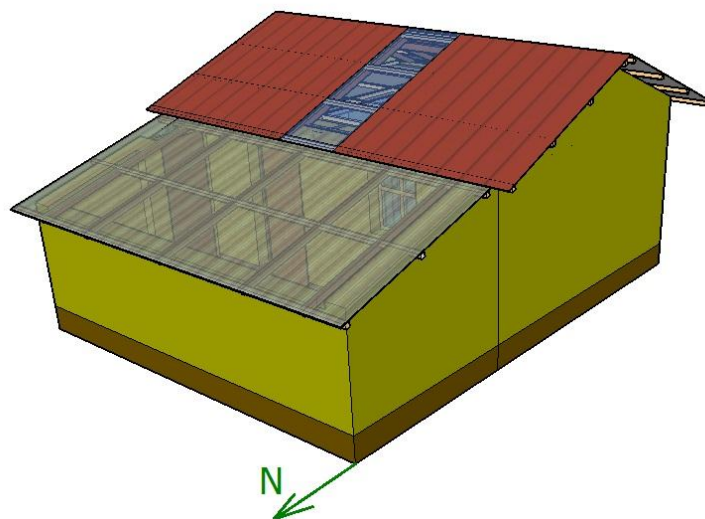
### 6.2.5 Puertas

La puerta del MT es de hoja de calamina metálica de zinc de 0,0005m de espesor y marco de madera, la puerta del MM es contraplacada de triplay de 4mm de espesor y con cámara de aire de 0,032m de espesor.

### 6.2.6 Sistemas de climatización solar pasiva

Solo el módulo mejorado lleva adosado un invernadero de 2m x 4m en la pared orientado al norte y una ventana y puerta que comunica el ambiente del invernadero con el ambiente del

mismo módulo experimental. La cubierta del invernadero es de polietileno de alta densidad de 0,0005m de espesor, y protegidas contra la radiación UV.

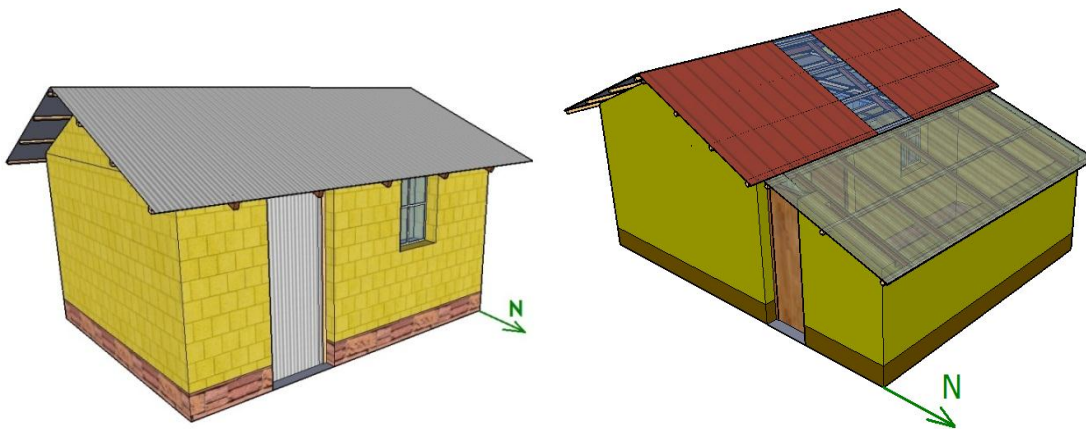


**Figura 35.** MM4 con invernadero y claraboyas.

## VII. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN Y MODELACIÓN DINÁMICA

En primer lugar, se definió la metodología para el modelado y la simulación. El uso de los tres softwares tiene un orden que debe seguirse. *SketchUp* proporciona la estructura del modelo, es decir, el diseño en 3D; *OpenStudio* define los espacios y el clima y las condiciones térmicas, es una interfaz que utiliza las herramientas del *SketchUp* para el uso del *EnergyPlus*; y finalmente el *EnergyPlus* que es con el cual se ejecuta la simulación dado a que es un motor de cálculo que basa su análisis de transferencia de calor en estado transitorio y además, proporciona los resultados o variables de salida.

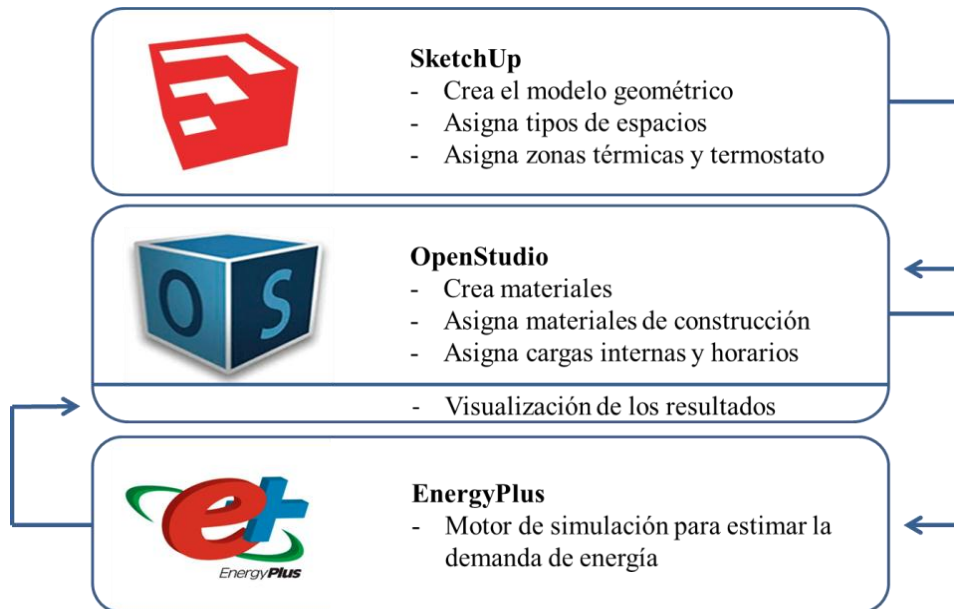
Las simulaciones se desarrollarán en base al MT y posteriores mejoras o adiciones de componentes de climatización natural como claraboyas e invernadero adosado, tales configuraciones se representaran como módulos mejorados (MM), MM1, MM2, MM3 y MM4, tal como se indicó en la Tabla 9. Se considerará los resultados de la simulación y su posterior análisis para el día más frío de todo el año como es el 15 de julio.



**Figura 36.** (Izq.) Módulo típico (MT); (Der.) Módulo mejorado 4 (MM4).

### 7.1 Modelación y simulación

Por estos tiempos, la simulación térmica/energética de edificaciones se ha convertido en una herramienta de utilidad representando modelos de edificaciones que imitan la realidad y, que en base a algoritmos de cálculos y correlaciones numéricas, permiten determinar las condiciones térmicas interiores y la demanda de energía tanto en calefacción como en refrigeración basados en un análisis de transferencia de calor en estado transitorio que realizarlos de manera analítica, resulta tedioso y engorroso. La Figura 37 muestra el diagrama de flujo requerido para la modelación y simulación partiendo del uso del programa de diseño en 3D *SketchUp*, donde, con las incorporaciones de las herramientas del *OpenStudio* en su entorno, se crean las zonas térmicas y se configuran todas las superficies que comprenden la envolvente de la edificación en estudio. Listo el diseño y guardado con extensión *.IDF* el cual representa un archivo de entrada para el *EnergyPlus*, se abre el *EnergyPlus* y se ingresan en primer orden junto con el archivo creado, el archivo de clima con extensión *.EPW*, y en segundo orden, las diferentes variables de entrada como, ubicación del edificio, periodos de simulación, materiales opacos, materiales transparentes, cámaras de aire, construcciones, horarios, infiltraciones, cargas internas, variables de salida, etc., para finalmente ejecutar la simulación y corregir errores obteniendo como salida, una tabla de datos en formato *.CSV*.



**Figura 37.** Diagrama de flujo de trabajo para modelar y simular el problema. Fuente: Adaptado de (Alghoul et al., 2017).

## 7.2 Descripción de los programas para la simulación

Se inicia con el *SketchUp* creando la geometría, posteriormente se utiliza las herramientas del *OpenStudio* en el *SketchUp* para crear las zonas térmicas, y finalmente el *EnergyPlus* para ejecutar la simulación y obtención de resultados. A continuación se describen cada uno de ellos.

### 7.2.1 Trimble *SketchUp*

Es un software de diseño gráfico y modelado en 3D utilizado en arquitectura, ingeniería, diseño industrial, etc. Se caracteriza por su simplicidad al usarlo y ofrece amplias posibilidades a la hora de diseñar. En la tesis se ha utilizado como base del proyecto, para definir la geometría del modelo, la composición y definición de los espacios interiores, la orientación, e inclusión de puertas y ventanas.

### 7.2.2 *OpenStudio*

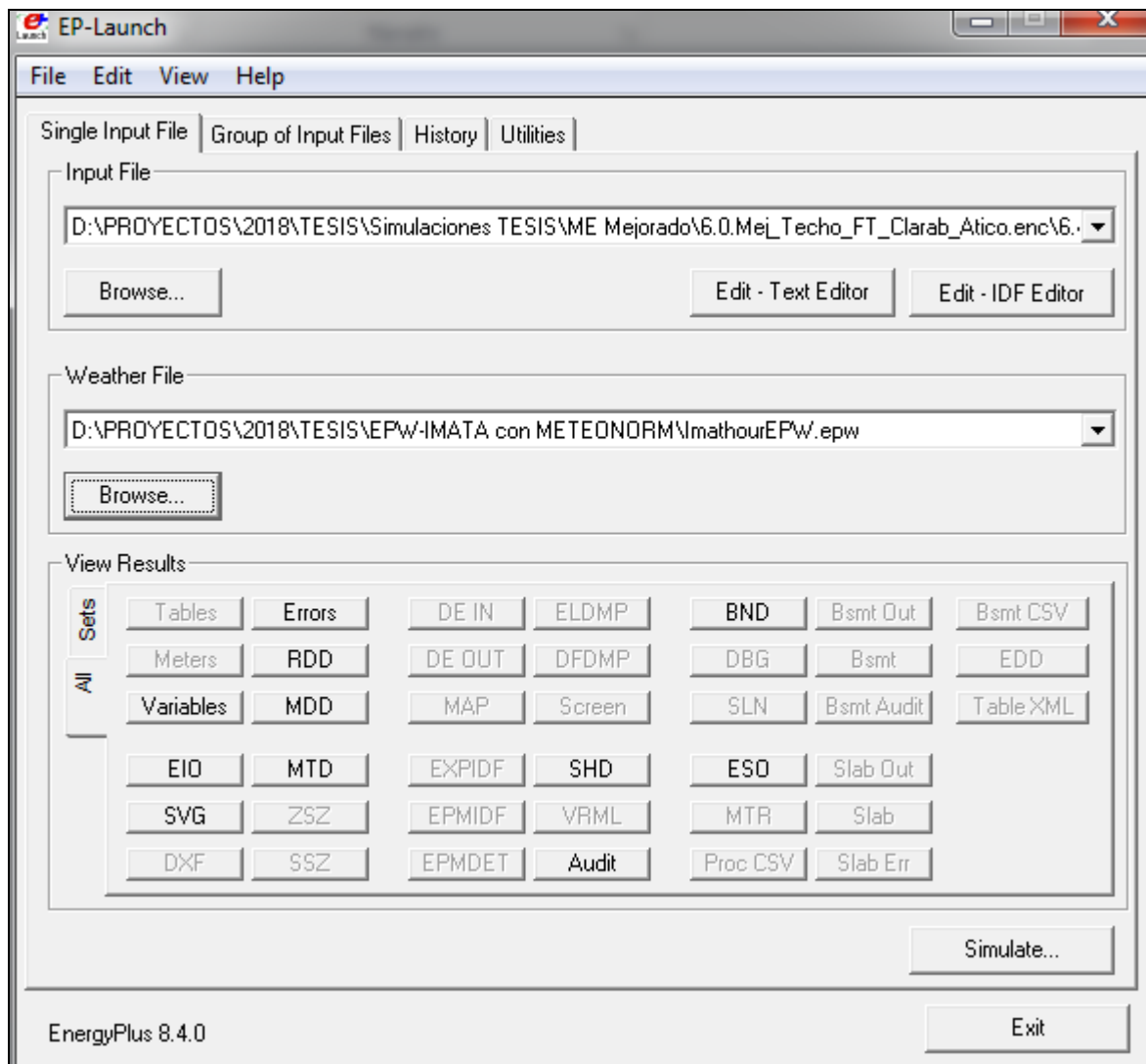
Es una interfaz gráfica que utiliza las herramientas de *SketchUp* para el uso del *EnergyPlus*. *OpenStudio* permite ejecutar simulaciones en un entorno más amigable con el usuario tal es así que se puede utilizar para modelar la demanda de energía en edificios. Dentro de *SketchUp*, hay una ventana llamada *OpenStudio*, donde es posible ingresar toda la información del edificio y decidir los datos que queremos extraer. Es posible definir el tipo y la composición de los cierres, los horarios de los equipos o los tipos de espacios y zonas térmicas, los sistemas de climatización de calentamiento, enfriamiento y aire acondicionado (HVAC), seleccionar el clima, etc. De todos estos datos es posible extraer mucha información, como las temperaturas de los espacios, pérdidas y ganancias de potencia a través de los cierres, niveles de radiación a través de las ventanas o la demanda de calor y frío estableciendo una temperatura confortable, entre otros.

### 7.2.3 *EnergyPlus*

Este es el programa o motor de cálculo de la simulación de la demanda de energía fundado por el Departamento de Energía de EEUU. Para modelar y calcular la calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y otros flujos de energía.

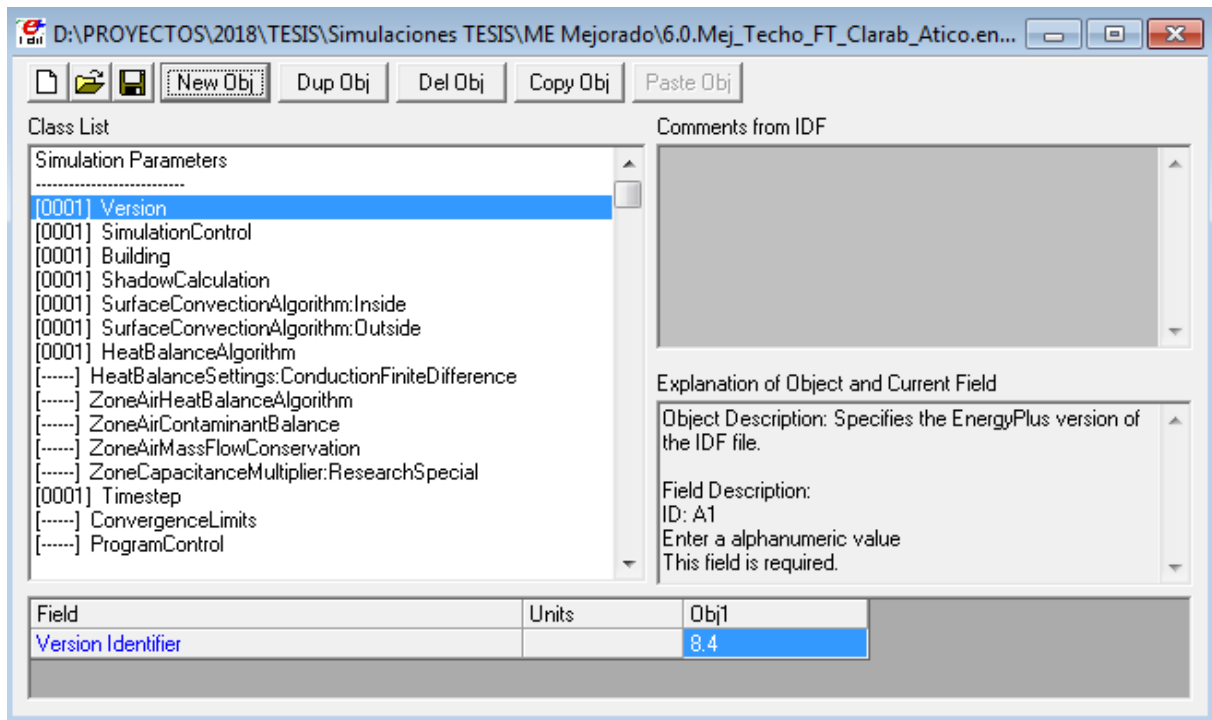
### 7.3 Entrada de datos al EP Launch e IDF Editor del *EnergyPlus*

*EnergyPlus* presenta dos ventanas de trabajo EP Launch e IDF Editor, el EP Launch es donde se ingresa el archivo con extensión IDF creado en el *SketchUp* con las herramientas del *OpenStudio*, se ingresa también el archivo de clima con extensión *EPW*, se ejecuta las simulaciones visualizando si existen los errores a corregir y, finalmente por medio de esta ventana se obtiene también las variables de salida seleccionadas.



**Figura 38.** Ventana EP Launch del *EnergyPlus*.

Por parte de la ventana IDF Editor al cual se tiene acceso desde el EP *Launch*, se utiliza para crear e ingresar los datos de entrada como, la versión del *EnergyPlus*, la localización de la propuesta a simular, el archivo de clima, el control de la simulación, los horarios de control, los materiales, la constitución de las construcción, las infiltraciones, termostatos, etc.



**Figura 39.** Ventana IDF Editor del *EnergyPlus*.

Solo por nombrar se describirá algunos parámetros de simulación utilizados en el presente trabajo en lo que respecta a la modelación y simulación de los módulos experimentales MT y MM.

### 7.3.1 Control de la simulación

Se designa ejecutar la simulación para un archivo de clima dado a que se cuenta con el *EPW* para Imata obtenido con el programa *Meteonorm*. En la Figura 40 del campo control de la simulación se activa esta parte con la afirmación Yes.

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

**Figura 40.** Campo para el control de la simulación.

### 7.3.2 Características del edificio o vivienda

En este campo (Figura 41), se ingresa un nombre a la edificación, ángulo de orientación respecto al norte (para nuestro caso 0°), el tipo de terreno elegimos campo abierto, y la distribución solar consideramos interior y exterior con reflexión, de acuerdo a esta consideración el programa calcula la cantidad de radiación que cae sobre cada superficie de la zona, incluyendo piso, paredes y ventanas, proyectando los rayos del sol a través de las ventanas exteriores, teniendo en cuenta el efecto de las superficies sombreadas exteriores y los dispositivos de sombreado de ventanas. Los otros parámetros como cargas de convergencia, temperatura de convergencia, y número máximo de días de calentamiento son predeterminados por el programa.

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

**Figura 41.** Campo para ingresar los parámetros del edificio.

### 7.3.3 Localización del edificio o vivienda

En este campo (Figura 42), se describe la localización del edificio y se empieza con darle un nombre, en nuestro caso colocamos Imata. Posteriormente se ingresa su latitud, longitud, zona horaria y altura.

Field	Units	Obj1
Name		Imata
Latitude	deg	-15.846
Longitude	deg	-71.093
Time Zone	hr	-5
Elevation	m	4469

**Figura 42.** Campo para ingresar la localización de los módulos.

### 7.3.4 Materiales

En este campo (Figura 43), se ingresa todos los materiales utilizados en la construcción e incluso las cámaras de aire que existan en ventanas de doble vidrio, puertas contraplacadas, o espacios de aire entre materiales, todo ello acompañado de su rugosidad, espesor, conductividad térmica, densidad, calor específico y absortividad. En el caso del presente estudio estas propiedades de los materiales se han considerado los descritos en la norma EM.110. Norma cuyos datos presentados no han sido determinados localmente y que al respecto, se vienen desarrollando estudios para su obtención en especial del adobe por ser un material de uso tradicional en las zonas andinas (Abanto, G.A. et al., 2017).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		tierra10cm	adobe40cm	calamina	triplay4mm
Roughness		MediumRough	MediumRough	MediumSmooth	MediumSmooth
Thickness	m	0.1	0.4	0.0005	0.004
Conductivity	W/m-K	0.52	0.64	237	0.14
Density	kg/m3	2000	1800	2702	560
Specific Heat	J/kg-K	1840	828	903	1400

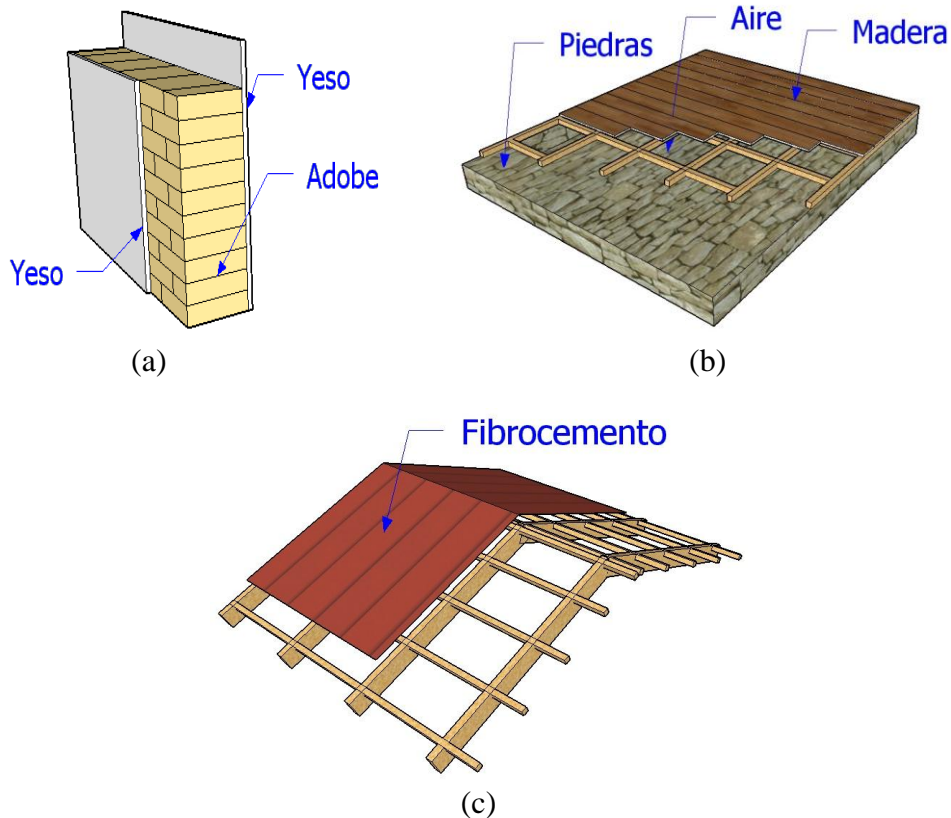
**Figura 43.** Campo de ingreso de los materiales y sus propiedades termofísicas.

### 7.3.5 Construcciones

Las construcciones se crean a partir de la lista de materiales ingresados al programa donde, cada construcción está constituido por uno o más materiales en forma de capas ingresados de afuera hacia dentro, por ejemplo, para el MT las construcciones a ingresar se muestran en la Figura 44 para piso, paredes, puerta, ventana y claraboya. Para el MM1 seria, paredes: yeso, adobe, yeso (Figura 45a); piso: piedras, aire-madera (Figura 45b), y techo: fibrocemento (Figura 45c).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		piso	paredes	puerta	ventana	clarab_techo
Outside Layer		tierra10cm	adobe40cm	calamina	vidriosimple 3mm	plocarbonato

**Figura 44.** Campo de creación de construcciones.



**Figura 45 .** Materiales para construcciones ingresados al *EnergyPlus*, (a) paredes, (b) piso, y (c) techo.

### 7.3.6 Superficies y subsuperficies

Estos campos tienen que ver con las superficies poligonales que dan forma al edificio, en ambos casos se ingresa un nombre ya sea para los tipos de superficies (Figura 46) como, pared, piso, techo, y falso techo; y tipo de subsuperficie (Figura 47) como ventanas, puertas y claraboyas. En seguida se ingresa el nombre de la construcción creada para tal superficie o subsuperficie, nombre de la zona térmica a la que pertenece, la frontera a la que está expuesta, y finalmente si está expuesta al Sol y viento.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		piso	wallS	wallN	FT_D	wallE	wallO
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Ceiling	Wall	Wall
Construction Name		piso	wallS	wallS	falso_techo	wallS	wallS
Zone Name		intME	intME	intME	intME	intME	intME
Outside Boundary Condition		Ground	Outdoors	Outdoors	Surface	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object					FTatico_D		
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	SunExposed	NoSun	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		NoWind	WindExposed	WindExposed	NoWind	WindExposed	WindExposed

**Figura 46.** Campo de ingreso de las superficies que dan forma al edificio.



Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		ventanaE	puerta	ventanaN	ventanaO	clarabFT
Surface Type		Window	Door	Window	Window	Window
Construction Name		ventana	puerta	ventana	ventana	clarab_FT
Building Surface Name		paredE	paredN	paredN	paredO	FT_cen
Outside Boundary Condition Object						clarabFT_atico
View Factor to Ground						
Shading Control Name		Control_CV		Control_CV	Control_CV	

**Figura 47.** Campo de ingreso de las subsuperficies que dan forma al edificio.

### 7.3.7 Control de contraventanas

En este campo (Figura 48), se ingresa un nombre al tipo de control de la protección, el tipo de protección que en este caso la contraventana va por el interior, el tipo de control de la protección de acuerdo al horario, abierto o cerrado, y el nombre del horario de control.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Control_CV	Control_clarab
Shading Type		InteriorShade	InteriorShade
Construction with Shading Name			
Shading Control Type		OnIfScheduleAllow s	OnIfScheduleAllow s
Schedule Name		Cal_CV	Cal_Clarab
Setpoint	W/m2, W or deg C		
Shading Control Is Scheduled		Yes	Yes
Glare Control Is Active		No	No
Shading Device Material Name		contraventana	CV_Clarab

**Figura 48.** Campo de ingreso del control de contraventanas.

### 7.3.8 Infiltraciones o intercambios por flujo de aire

Los ACH o infiltraciones son los ingresos de aire no intencionados al interior de una edificación. En este campo (Figura 49), se ingresa un nombre, nombre de la zona a la cual corresponde la información a proporcionar, calendario u horario asignado al flujo de aire infiltrado, y el método de cálculo del diseño del flujo de aire que para este estudio consideramos intercambios de aire por hora.

Field	Units	Obj1
Name		ACHs_ME2
Zone or ZoneList Name		interiorME
Schedule Name		CAL_ACHs_5.10.5. 10.5
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	1
Constant Term Coefficient		1

**Figura 49.** Campo de ingreso de las infiltraciones de aire (ACH).

### 7.3.9 Termostatos

Los termostatos regulan la temperatura interior a partir de unos valores máximos (calefacción) y mínimos (enfriamiento) que son permisibles dentro de una zona térmica o ambiente interior. En este campo (Figura 50), se ingresa dos termostatos, uno de calentamiento y otro de enfriamiento a la temperatura a la cual se desea mantener el interior, en este caso a 15°C.

Field	Units	Obj1
Name		termostato MT
Heating Setpoint Schedule Name		Cal calentamiento
Constant Heating Setpoint	C	15
Cooling Setpoint Schedule Name		Cal enfriamiento
Constant Cooling Setpoint	C	15

**Figura 50.** Campo de ingreso para termostatos.

#### 7.4 Variables de salidas de la simulación

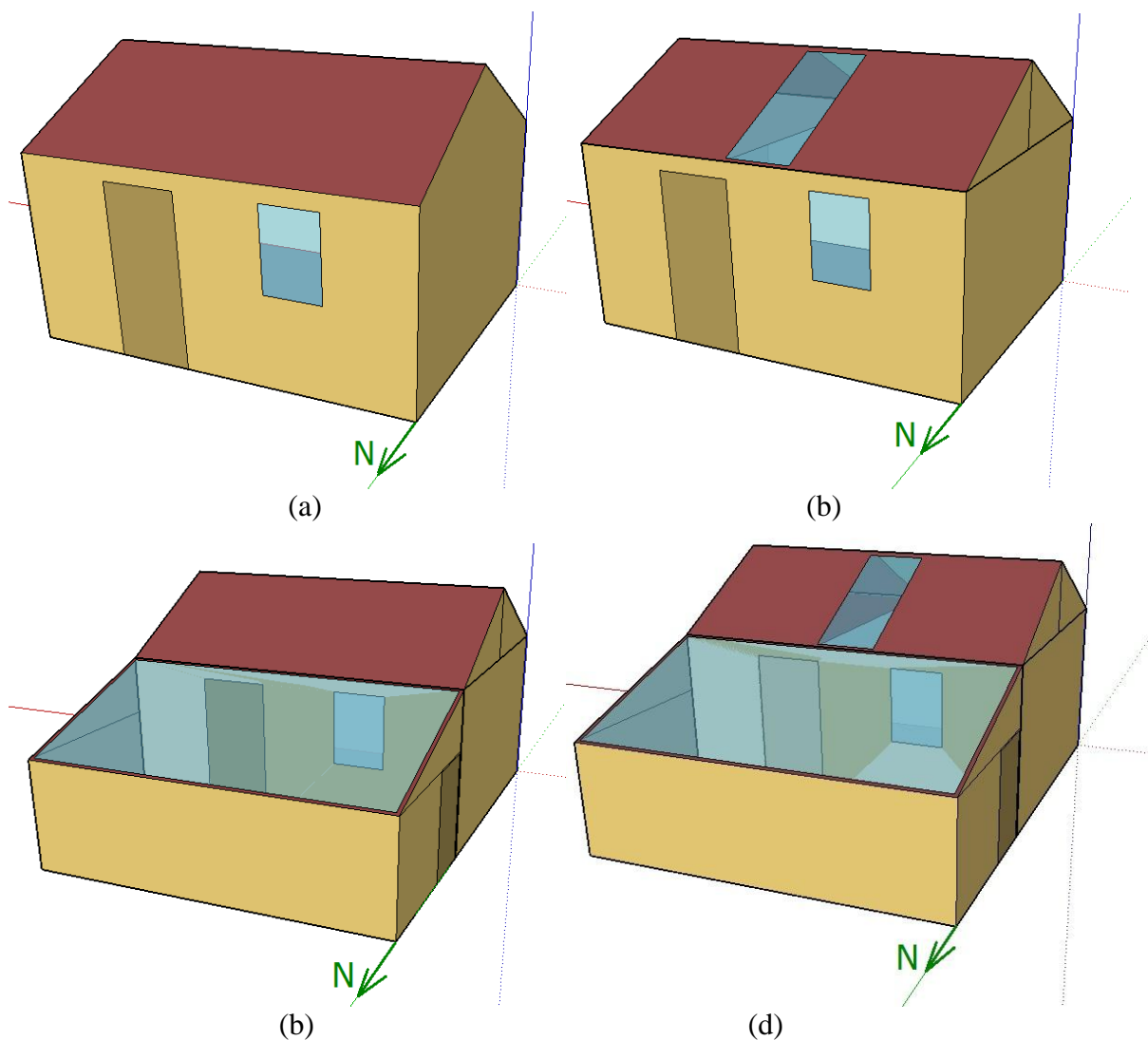
De entre las muchas variables de salida en el presente estudio vamos a considerar la temperatura interior, requerimientos energéticos para calefacción para una temperatura de confort estandarizada y temperatura de confort o bienestar térmico para Imata según modelo adaptativo empleado (Figura 51).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Key Value		*	*	*	*
Variable Name		Site Outdoor Air Drybulb Temperature	Site Outdoor Air Relative Humidity	Zone Windows Total Heat Gain Energy	Zone Windows Total Heat Loss Energy
Reporting Frequency		Hourly	Hourly	Hourly	Hourly

**Figura 51.** Campo de selección de las variables de salida.

## VIII. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO ENERGÉTICO DE LOS MÓDULOS EXPERIMENTALES

Se presentan los resultados y análisis térmico del diseño de módulos experimentales para el día más frío y de “helada” en Imata, 15 de julio, de acuerdo a la data climática considerada para la simulación y generada con *Meteonorm* para un año típico meteorológico. Se considera como prioridad el análisis de la temperatura interior partiendo del MT al cual se le van adicionando mejoras en el aislamiento y sistemas de climatización natural que aprovechen la radiación solar directa o indirecta como las claraboyas en el techo o invernadero adosado por la cual, cada adición o mejora diferente se analizará como un nuevo diseño de módulo mejorado, MM1, MM2, MM3, y MM4 (ver Tabla 9). El diseño de los módulos en 3D se realiza empleando el entorno del *SketchUp* con las herramientas del *Legacy OpenStudio* dando como resultado las imágenes mostradas en la Figura 52. Las simulaciones dinámicas empleando el *EnergyPlus 8.4*, se realizan considerando que desde la concepción del diseño e implementación de la vivienda o edificación, las infiltraciones están corregidas o eliminadas.



**Figura 52.** Vistas modificadas en *SketchUp* de los módulos a simular con el *EnergyPlus*, (a) MM1, (b) MM2, (c) MM3, y (d) MM4.

## **8.1 Comportamiento térmico interior a partir de materiales en pisos, paredes y techo**

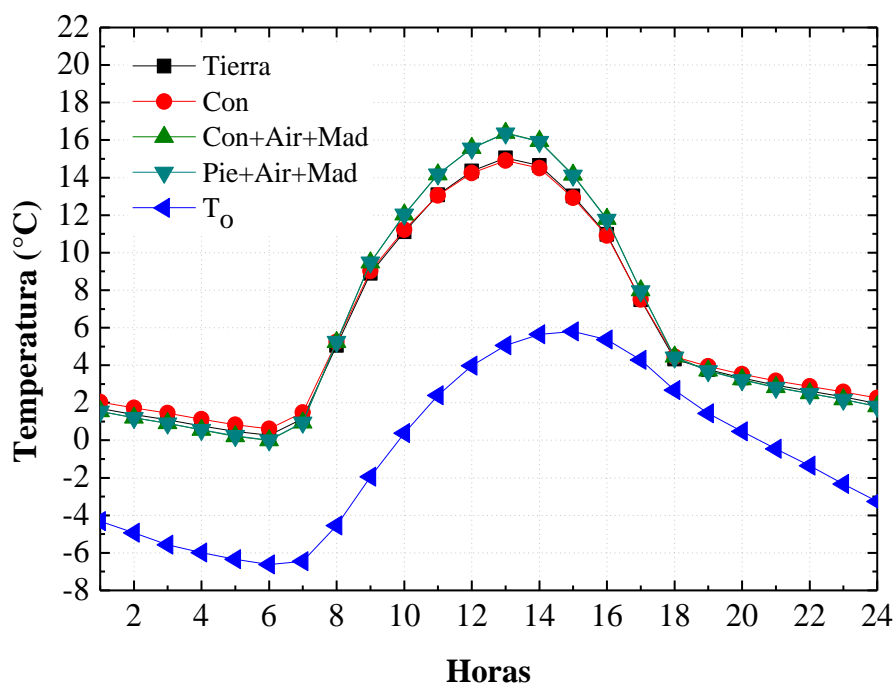
Se considera al menos tres materiales distintos o configuraciones de ellos sobre la envolvente del módulo típico (MT) para que con las mismas condiciones meteorológicas y geográficas, se determine el comportamiento y aporte térmico en su interior, y a partir de ello, elegir el material que presente mayor desempeño, y diseñar los módulos mejorados, teniendo presente como prioridad el uso de materiales locales, facilidad en su acceso en el mercado de materiales, y bajo costo.

### **8.1.1 Pisos**

En Imata como en muchas zonas rurales del Perú, los pisos son de tierra, y si a esto le adicionamos que son húmedas debido a las filtraciones del agua de lluvia por el interior del suelo, van a tener un comportamiento tipo sumidero de calor. En vista de ello, se hace necesario su aislamiento. En ese sentido, se considera 4 tipos de pisos a ser simulados, de tierra con 0,10m de espesor, de concreto (Con) y dos configuraciones vistas de abajo hacia arriba de, uno, 0,10m de espesor de concreto seguido de un entramado de madera con espacios de aire de 0,05m de espesor y finalmente tablas de madera de 0,02m de espesor (Con+Air+Mad), y otro de, 0,15m de espesor de cama de piedras, 0,05m de espesor de entramado de madera con aire, y como piso final también tablas de madera de 0,02m de espesor (Pie+Air+Mad).

Ejecutando la simulación para obtener la  $T_i$  se obtiene la Figura 53 que muestra el comportamiento de la  $T_i$  de acuerdo a los cuatro tipos o configuraciones de piso propuesto para el MT. En horas críticas de frío extremo (06:00 a.m.), se observa en la gráfica que prácticamente las cuatro propuesta presentan el mismo comportamiento térmico interior con un mínimo extremo de alrededor  $0^{\circ}\text{C}$ , y un incremento en promedio respecto del exterior de  $7^{\circ}\text{C}$ . Si bien en la gráfica el piso de concreto y tierra presentan un ligero comportamiento térmico superior al de concreto con madera, y al de piedras, aire y madera en horas de la madrugada, se puede inferir que es debido a su masa o inercia térmica, a diferencia de los otros dos que se presentan como aislantes y que se aprecia en el día donde se invierte el comportamiento de la  $T_i$  por estos tipos de pisos.

En lo que respecta al material a elegir para incluirlo al o los diseños de módulos mejorados, la tierra y el concreto se presentan como sumideros de calor, si bien el concreto presenta una alta densidad ( $2300 \text{ kg/m}^3$ ) superando a la tierra ( $2050 \text{ kg/m}^3$ ), su conductividad es mayor que la tierra, esto quiere decir que tiene un buen carácter de almacenamiento pero también pierde rápido el calor y más aún si el suelo esta húmedo y este se coloca en contacto con ella, por conducción se asegura la pérdida de calor. Respecto a los otros dos tipos de pisos que llevan un espacio de aire tipo cámara como aislamiento natural, presentan casi el mismo comportamiento térmico de la  $T_i$ , el piso de concreto, cámara de aire, y tablas de madera, lleva cemento como material no local, y su adquisición localmente esta sobrecostado por el transporte y se presenta como dificultad a los pobladores de condiciones económicas bajas. Entonces, la mejor opción es el piso de piedras, cámara de aire, y tablas de madera, las piedras son un recurso local y abundante en Imata, y las maderas son asequibles a la económica y a la disposición en cualquier mercado local, además, su instalación es una labor que no requiere de un adiestramiento o técnica especial y el poblador puede realizarla.



**Figura 53.** Comportamiento de la temperatura interior ( $T_i$ ) horaria respecto al uso de materiales en el piso, Tierra, concreto (Con), concreto+cámara de aire y madera (Con+Air+Mad), piedras+aire+madera (Pie+Air+Mad), respecto a la temperatura exterior ( $T_o$ ).

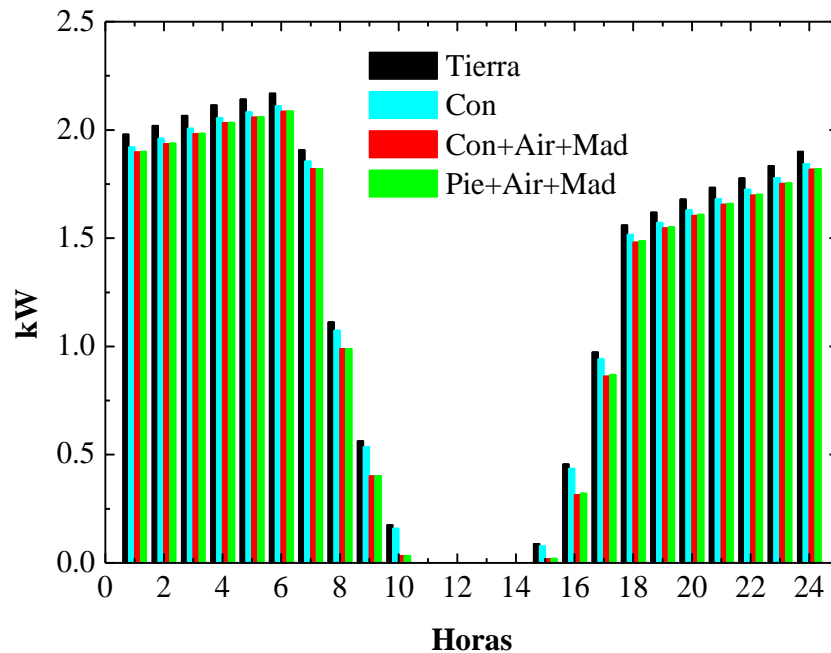
La Tabla 10 muestra las oscilaciones térmicas de la  $T_i$  y  $T_o$  y se observa que los primeros son mayores que el segundo, esto se debe al pobre aislamiento de la envolvente del MT y en especial, al techo, dado que lleva calamina metálica como cubierta y esto hace que en el día, el interior se comporte como un horno y, en las noches o madrugada, como una refrigeradora (los resultados del uso de este material se describen en el punto 8.1.3).

**Tabla 10.** Oscilaciones térmicas de la temperatura interior ( $T_i$ ) por materiales en piso en el MT.

<i>Pisos</i>	<i>Oscilaciones Térmicas</i>	
	interior	exterior
Tierra	14,8°C	
Con	14,3°C	
Con+Air+Mad	16,4°C	12,4°C
Pie+Air+Mad	16,3°C	

Con la simulación también se puede obtener la cantidad de energía requerida para mantener el interior del MT a 15°C (temperatura de bienestar para Imata según modelo adaptativo). En base a ello y considerando en la simulación los materiales para piso que se ha venido analizando, se obtiene la gráfica de la Figura 54, donde, se aprecia que la demanda de energía para calefacción del MT por cada uno de los cuatro materiales o configuraciones de piso, presentan ligeras diferencias en horas de frío extremo (06:00 a.m.), tal es así que para dicha hora con el piso de tierra se requiere 2,17kWh, concreto 2,11kWh, y 2,09 kWh para ambas configuraciones de piso compuestas de, concreto+aire+madera y piedras+aire+madera. Con requerimientos totales de energía para el día de referencia en estudio (15 de julio), en el mismo orden descrito anteriormente se obtiene, 29,88kWh, 28,97kWh, 28kWh, y 28,05kWh. Si bien todos presentan casi el mismo requerimiento energético, optamos por el piso de

Pie+Air+Mad que presenta un valor bajo en energía en horas extremas, y porque los materiales de su configuración son asequibles a la población.

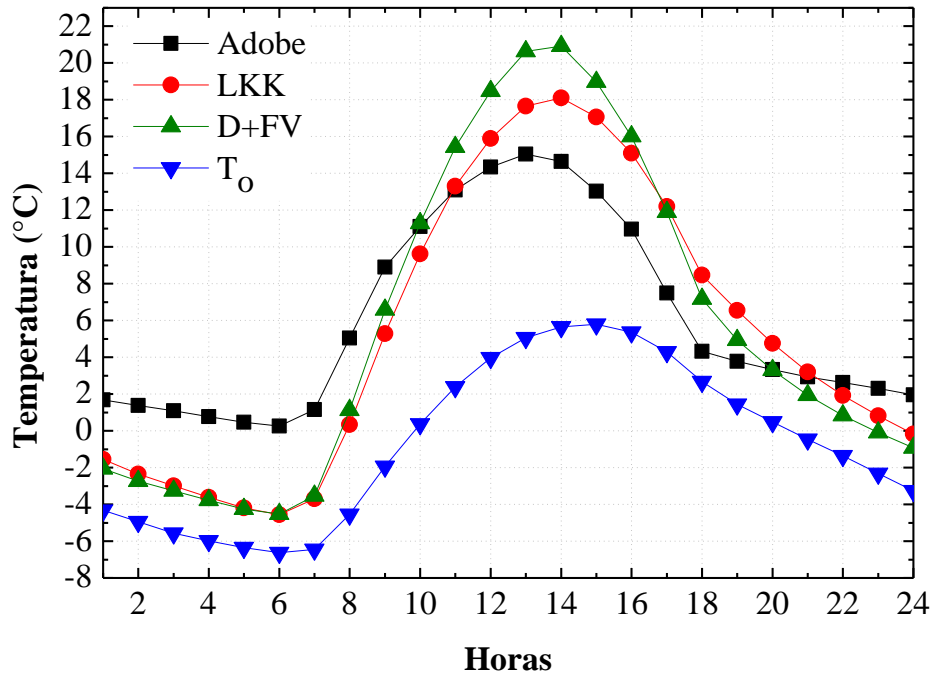


**Figura 54.** Requerimiento de energía en el MT de acuerdo a materiales en pisos para alcanzar una  $T_i$  constante de  $15^{\circ}\text{C}$ . Tierra, concreto (Con), concreto+aire+madera (Con+Air+Mad), y piedras+aire+madera (Pie+Air+Mad).

### 8.1.2 Paredes

De acuerdo al diagnóstico realizado en Imata, en su mayoría las paredes son de adobe. Se simuló el MT considerando 3 tipos de materiales para paredes, adobe de 0,40m de espesor, ladrillos solidos de arcilla denominados King Kong (LKK) de 0,12m de espesor, y paneles drywall de yeso de 0,02m de espesor con fibra de vidrio en su interior de 0,10m de espesor (son dos paneles al interior y exterior que en su centro llevan la fibra de vidrio, D+FV, en conjunto tienen un espesor de 0,14m). Como resultado de la simulación del comportamiento de la  $T_i$  en el MT con los materiales en paredes considerados, se tiene la Figura 55, donde, se puede inferir que el adobe por su masa térmica en la noche y madrugada aísla mejor y contribuye a un mejor amortiguamiento de la  $T_o$  en el día, que los demás materiales. Con el adobe el incremento de la  $T_i$  en horas de frío extremo y “heladas” (de 05:00 a 06:00 a.m.), es de  $7^{\circ}\text{C}$  respecto del exterior, en comparación de los  $2^{\circ}\text{C}$  que presenta el LKK y configuración de pared drywall en dichas horas extremas.

El comportamiento del LKK y D+FV respecto a la  $T_i$  en horas de frío extremo y “heladas”, hacen de estos materiales no idóneos para las condiciones meteorológicas de Imata llegando a alcanzarse incluso temperaturas interiores por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ , todo lo contrario pasa en el día donde su aporte térmico interior es favorable, por ello, su uso en escuelas en especial de la configuración de pared drywall, no es descabellado dado a que dichos ambientes son de uso diurno.



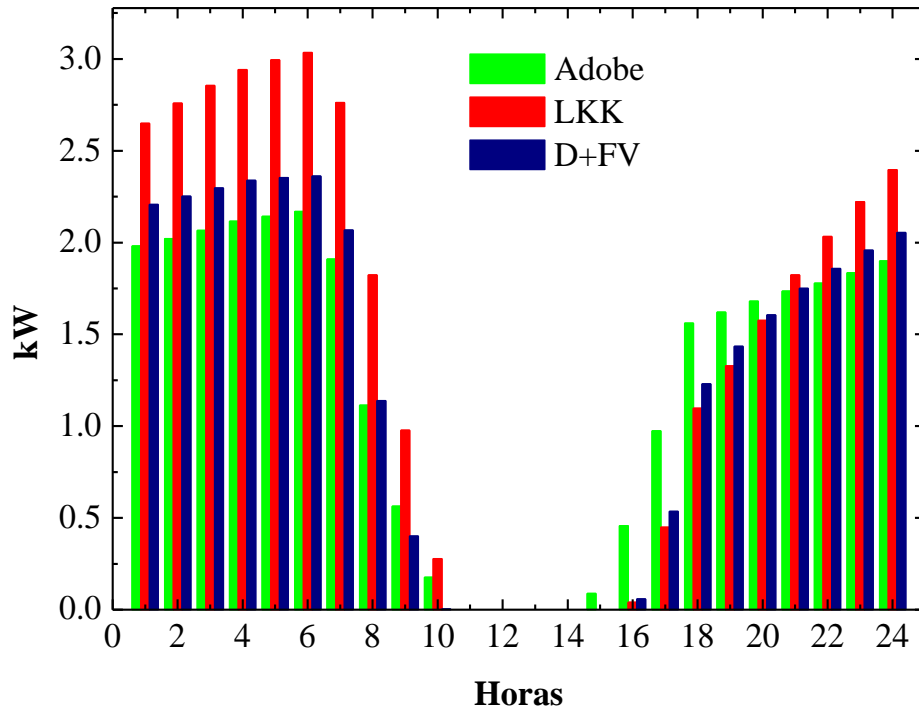
**Figura 55.** Comportamiento de la temperatura interior ( $T_i$ ) horaria respecto al uso de materiales en paredes, Adobe, ladrillo King kong (LKK), y paneles drywall con fibra de vidrio (D+FV), respecto a la temperatura exterior ( $T_o$ ).

La Tabla 11 muestra los resultados de las oscilaciones de la  $T_i$  y  $T_o$  de acuerdo a los materiales considerados en las paredes del MT. Se aprecia que el adobe por su masa térmica, contribuye a una menor oscilación de la temperatura interior a diferencia de los otros materiales. Entonces, dado a que el adobe es un material local, económico, orgánico, natural, y amigable con el medio ambiente, su uso es idóneo y recomendable para construcciones vernáculas en zonas andinas, en ese sentido, este material se utilizará en los diseños y simulaciones de módulos mejorados propuestos.

**Tabla 11.** Oscilaciones térmicas de la temperatura interior ( $T_i$ ) por materiales en paredes en el MT. Ladrillo King Kong (LKK) y paneles drywall con fibra de vidrio (P+FV)

<i>Paredes</i>	<i>Oscilación Térmica</i>	
	interior	exterior
Adobe	14,8°C	
LKK	22,2°C	12,4°C
D+FV	25,2°C	

Con respecto a la cantidad de energía que se requiere con cada uno de los materiales considerados en la pared del MT, para mantener una temperatura interior constante de 15°C (temperatura de bienestar térmico para Imata según modelo adaptivo), se obtiene como resultado de la simulación la Figura 56.



**Figura 56.** Requerimiento de energía en el MT de acuerdo a materiales en paredes para alcanzar una  $T_i$  constante de  $15^{\circ}\text{C}$ . Adobe, ladrillo King Kong (LKK), y paneles drywall con fibra de vidrio (P+FV).

De la Figura 56, en horas de frío extremo se requiere en el MT con la pared de adobe, 2,17kWh, con LKK 3,03kWh, y con D+FV 2,36kWh. El ladrillo demanda una mayor energía acompañada de un mayor costo, el drywall presenta una menor demanda pero el acceso a dichos materiales, costo, y por su sistema constructivo de desconocimiento de la población, no lo hacen asequible como material en paredes. El adobe por lo que ya se explicó, debiera revalorizarse como uso en paredes de viviendas en zonas andinas.

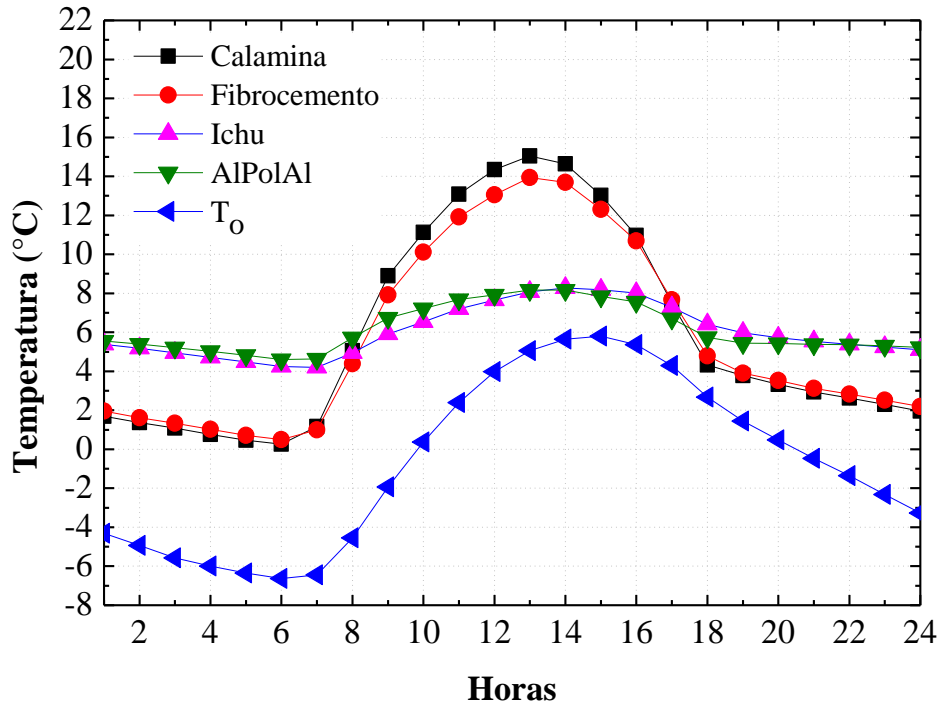
### 8.1.3 Techo

Para este elemento constructivo de la envolvente se considera cuatro tipos de materiales y configuraciones a utilizar en la simulación, desde lo ancestral o tradicional como antiguamente se utilizaba, el ichu, hasta lo industrial como es el material tipo sándwich que lleva poliuretano expandido en su configuración (ver Figura 58), el cual por su costo y disponibilidad, no está al alcance del poblador andino, no por ello cabe resaltar el buen aporte térmico que brinda a la  $T_i$ .

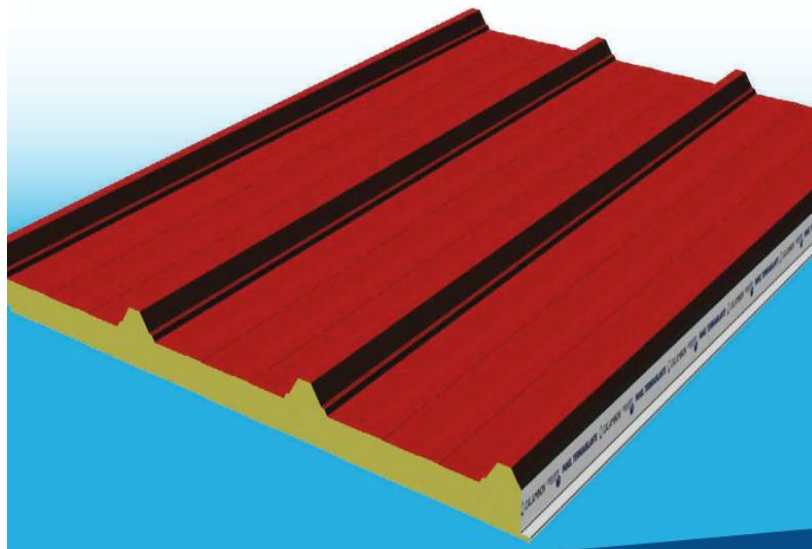
La Figura 57 muestra los resultados de la simulación utilizando como cubiertas de techo, calamina metálica de 0,2mm de espesor, planchas de fibrocemento de 4mm de espesor, ichu o paja de 0,10m de espesor, y el material industrial tipo sándwich que lleva por extremos una chapa de aluzinc de 0,5mm de espesor, y en su centro lleva poliuretano expandido de 0,04m de espesor (AlPolAl). De la gráfica es notorio el amortiguamiento de la temperatura interior respecto del exterior por el uso de materiales con un alto poder de aislamiento o resistencia térmica alta (baja transmitancia térmica ( $U$ )), como el ichu ( $U=0,8\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), y AlPolAl ( $U=0,74\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), resultado que no se vio en las gráficas de paredes y pisos utilizando también materiales de alta resistencia térmica como la fibra de vidrio en el caso de paredes tipo drywall ( $U=0,35\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Esto da a entender que con las mismas condiciones meteorológicas, e igual elementos de la envolvente en el MT, el techo es un elemento clave de



la envolvente para determinar el comportamiento térmico del ambiente interior, esto se debe a que el techo se presenta como el colector directo de la radiación solar en el transcurso del día a diferencia de las paredes que por su inclinación vertical, orientación y diseño, en todo momento no es posible captar la radiación solar directa, y menos aún el piso.



**Figura 57.** Comportamiento de la temperatura interior ( $T_i$ ) horaria respecto al uso de materiales en el techo, Calamina metálica, Fibrocemento, Ichu, y Aluzinc+Poliuretano+Aluzinc (AlPolAl), respecto a la temperatura exterior ( $T_o$ ).



**Figura 58.** Material de cubierta tipo sándwich, con chapas metálicas en los costados y poliuretano expandido en el centro.

No se puede decir lo mismo del aporte térmico al interior de la calamina y fibrocemento que, prácticamente presentan un comportamiento similar con las ventaja que el fibrocemento reduce considerablemente el ruido producido por impacto de la granizada sobre su superficie

(es decir, se mejora el confort acústico). El costo del fibrocemento es de \$4,5/m<sup>2</sup>, y el de calamina \$1,7/m<sup>2</sup> sin considerar costo de transporte. De acuerdo a ello, el costo es lo que determina el uso de la calamina en zonas de extrema pobreza y vulnerables, además de la facilidad en su instalación.

Si bien el ichu es un material local y en “abundancia” en zona andina como Imata, su uso ha pasado al olvido por un tema social de sentimiento de inferioridad y de desconocimiento de sus propiedades térmicas, además que por estos tiempos no es fácil conseguir dicho elemento o su crecimiento no es el mismo que el de antes, el sobrepastoreo también es otra de las consecuencia de no encontrar este material. Por todo ello, la población ha dejado de lado el ichu a pesar que empíricamente saben de sus bondades. Por otro lado, el material industrializado AlPolAl presenta un comportamiento casi similar el ichu pero su costo, aproximadamente de \$40/m<sup>2</sup> (sin considerar transporte), no lo hace asequible a la población,

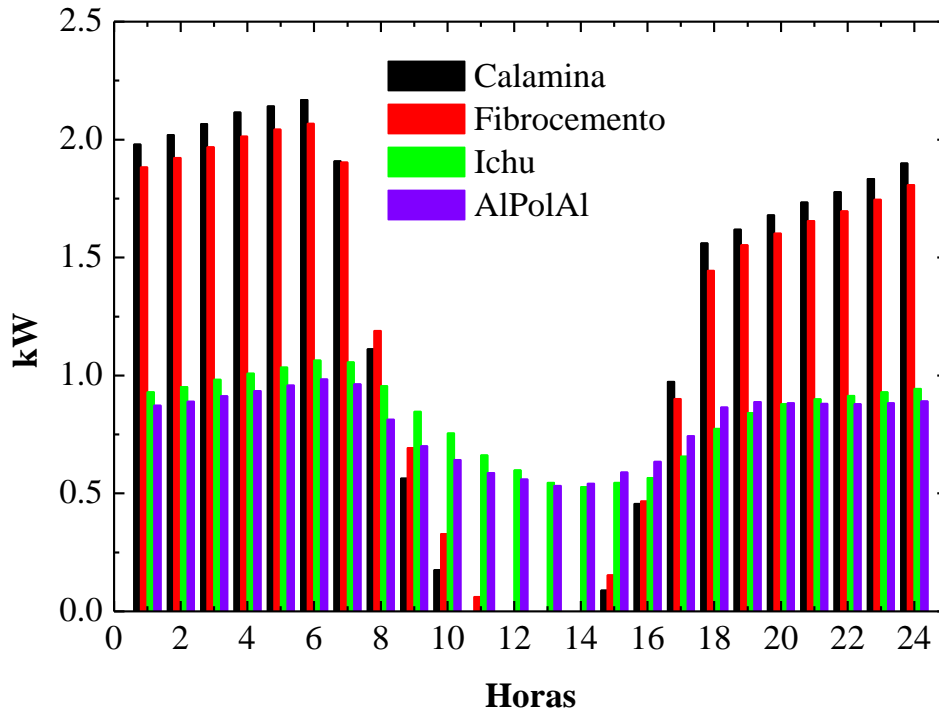
El aporte o incremento de la temperatura interior respecto del exterior por parte de los materiales considerados para el techo en horas extremas de la madrugada como las 06:00 a.m., es, 7°C por la calamina metálica y fibrocemento, 11°C por el ichu, y 11,2°C por el AlPolAl. Respecto de la calamina el ichu aporta 4°C más que dicho material y, el AlPolAl 4,4°C, con similares valores respecto al fibrocemento. Una alternativa de aislar el techo es colocando un falso techo como se vera en el punto 8.2.3, que colocando al techo de fibrocemento un falso techo de triplay más poliestireno, el comportamiento respecto a la Ti se incrementa casi igual al AlPolAl, con un costo menor y materiales más asequibles, en vista de ello, ese tipo de configuracion es el que se utilizó en la simulacion de techos de los módulos mejorados propuestos más adelante.

La Tabla 12 muestra los valores de las oscilaciones termicas interior y exterior para el día referencial de frío extremo, 15 de julio. Se aprecia una amortiguacion considerable de la temperatura exterior por el ichu de 8,4°C, y 8,8°C por el AlPolAl, dado su alto nivel de aislamiento.

**Tabla 12.** Oscilaciones térmicas de la temperatura interior (Ti) por materiales en techos en el MT.

<i>Techos</i>	<i>Oscilación Térmica</i>	
	interior	exterior
Calamina metálica	14,8°C	
Fibrocemento	13,4°C	12,4°C
Ichu	4,0°C	
AlPolAl	3,6°C	

En términos de aporte a la demanda en calefacción para mantener el interior del MT a 15°C, la Figura 59 muestra que con la calamina y el fibrocemento se requieren en horas de frío extremo, 2,17 y 2,07kWh, mientras que con el ichu y AlPolAl, 1,06 y 0,98kWh, prácticamente casi el 50% menos de energía. En total para el día referencial de estudio (15 de julio) se requiere en el mismo orden considerado, 29,88kWh, 29,10kWh, 19,88kWh y 19,04kWh. El ichu y AlPolAl, dado su carácter de buenos aisladores, contribuyen amortiguar mejor la temperatura exterior frente a los otros dos materiales, por ello demandan un mínimo de energía promedio entre las 11:00 a.m. y 14:00 p.m. de 0,57kWh, que en parte puede ser cubierto considerando claraboyas o invernadero adosado al MT.



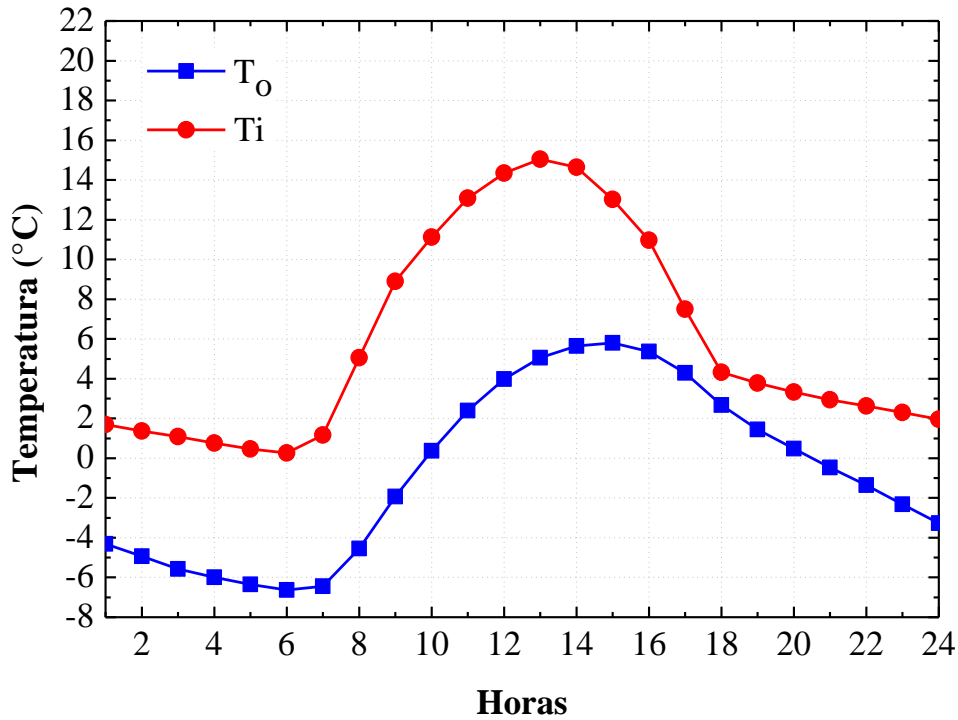
**Figura 59.** Requerimiento de energía en el MT de acuerdo a materiales en techos para alcanzar una  $T_i$  constante de  $15^{\circ}\text{C}$ . Calamina metálica, fibrocemento, Ichu, y aluzinc-poliuretano-aluzinc (AlPolAl).

## 8.2 Comportamiento térmico de los diseños de módulos experimentales

Se presentan los resultados y análisis de la simulación de cada uno de los diseños de módulos, desde el módulo referencial o típico (MT), hasta el último módulo mejorado (MM4), considerando en cada caso, mejoras de aislamiento en los elementos de la envolvente o, adicionando sobre ello, sistemas de climatización natural pasiva utilizando el Sol como fuente natural de energía, ya sea de forma directa utilizando claraboyas en el techo, o indirectamente con un invernadero adosado.

### 8.2.1 Módulo típico (MT)

De acuerdo a las características de la envolvente del MT descrita en la Tabla 9, donde el piso es de tierra, paredes de adobes, techo de calamina metálica, ventana de marco de fierro y vidrio simple, y una puerta de hoja metálica y marco de madera, se obtiene la gráfica que se muestra en la Figura 60, que representa la temperatura promedio horaria interior ( $T_i$ ), y la temperatura exterior ( $T_o$ ), para el día más frío de julio.



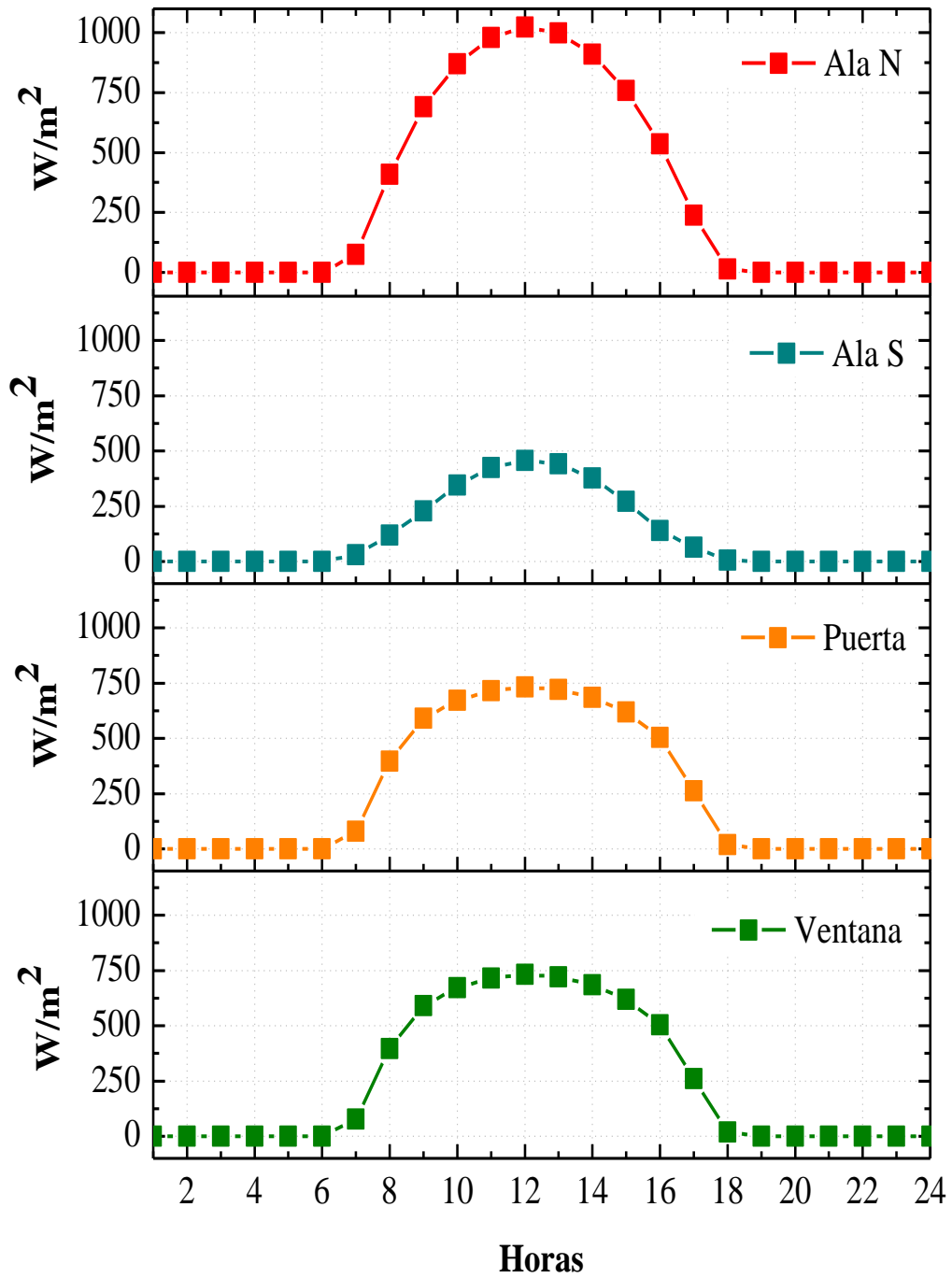
**Figura 60.** Temperatura promedio horaria interior (Ti) para el MT y exterior (To).

De la Figura 60 y Tabla 13, la envolvente del MT no está cumpliendo con el propósito de amortiguamiento de la  $T_o$  como se desearía esperar y ello, se puede asegurar que se debe al material de cubierta del techo como es la calamina metálica, primero, por ser muy delgado presenta poca resistencia al paso del calor de un lado a otro y segundo, por ser altamente conductivo, por ello, el interior del MT en el día presenta temperaturas altas, y en la madrugada la temperatura desciende considerablemente al punto de estar por los  $0^{\circ}\text{C}$ , esto justifica porque la oscilación térmica interior es mayor que la exterior. Además, porque en el día el techo es el que recibe de forma directa la irradiancia solar en mayor proporción que los demás elementos de la envolvente (Figura 61 y 62), y en la madrugada la temperatura superficial más baja también se presenta por este elemento constructivo (Figura 62). Esto no podría deberse a los otros elementos constructivos como las paredes de adobe, piso de tierra, ventanas, o puerta, debido a que presentan una menor conductividad, mayor espesor, y/o menor área expuesta al exterior.

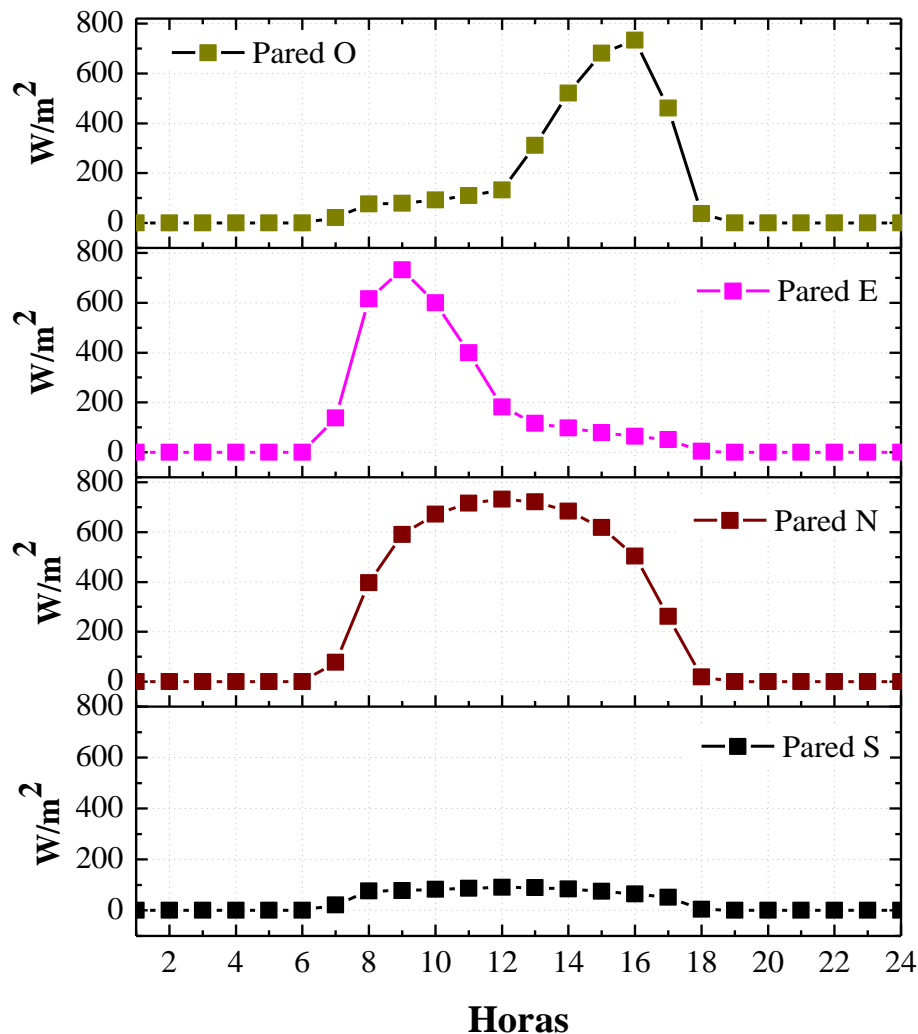
El retardo térmico de la envolvente del MT si bien es de 22 horas (Tabla 13), no se presenta idóneo en las horas que se desearía se recupere el calor almacenado en la envolvente como son en las horas críticas de la madrugada, este se recupera según los resultados en horas de alrededor del mediodía del día siguiente.

**Tabla 13.** Oscilación y retardo térmico para el MT.

	<i>exterior</i>	<i>interior</i>
Oscilación	12,4°C	14,8°C
Retardo	22h	



**Figura 61.** Irradiancia solar horaria sobre superficie exterior en el ala norte y sur (Ala N y Ala S), puerta y ventanas para el día representativo de frío extremo, 15 de julio.



**Figura 62.** Irradiancia solar horaria sobre superficie exterior en paredes para el día representativo de frío extremo, 15 de julio.

De la Figura 61 y 62, gráficas para el día 15 de julio considerado como referencial en el análisis por ser el día de frío extremo, la irradiancia promedio que incide por cada superficie exterior que comprende la envolvente del MT es:

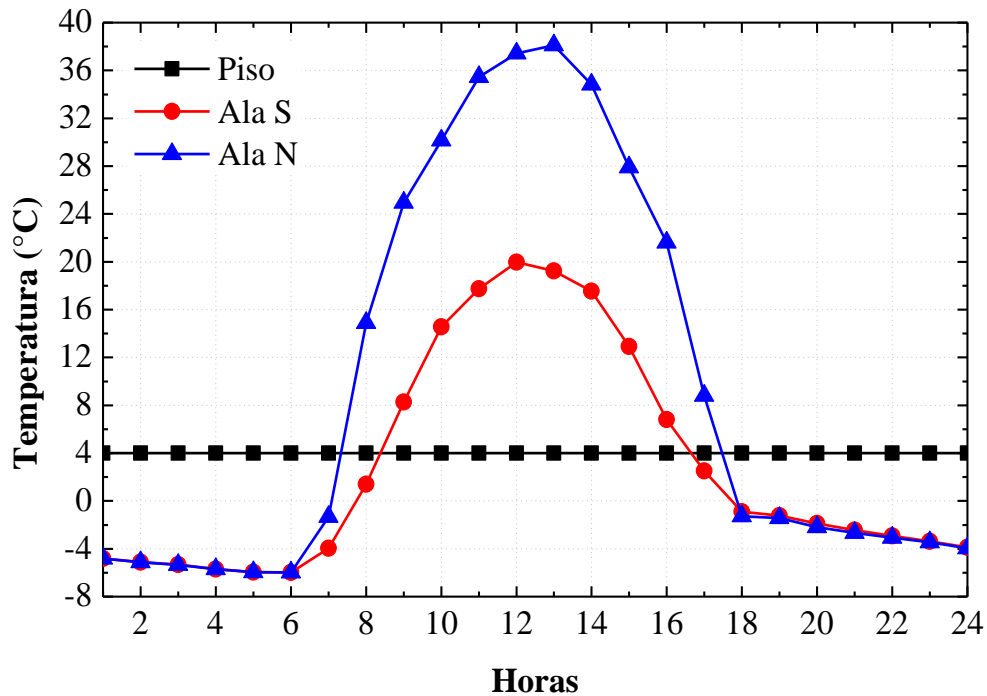
**Tabla 14.** Irradiancia solar promedio para el 15 de julio que incide sobre la envolvente del MT.

	<i>Pared E</i>	<i>Pared O</i>	<i>Pared N</i>	<i>Pared S</i>	<i>Puerta</i>	<i>Ventana</i>	<i>Ala S</i>	<i>Ala N</i>
Irradiancia Solar (W/m <sup>2</sup> )	128,24	135,68	249,63	33,63	249,58	249,84	121,09	312,65

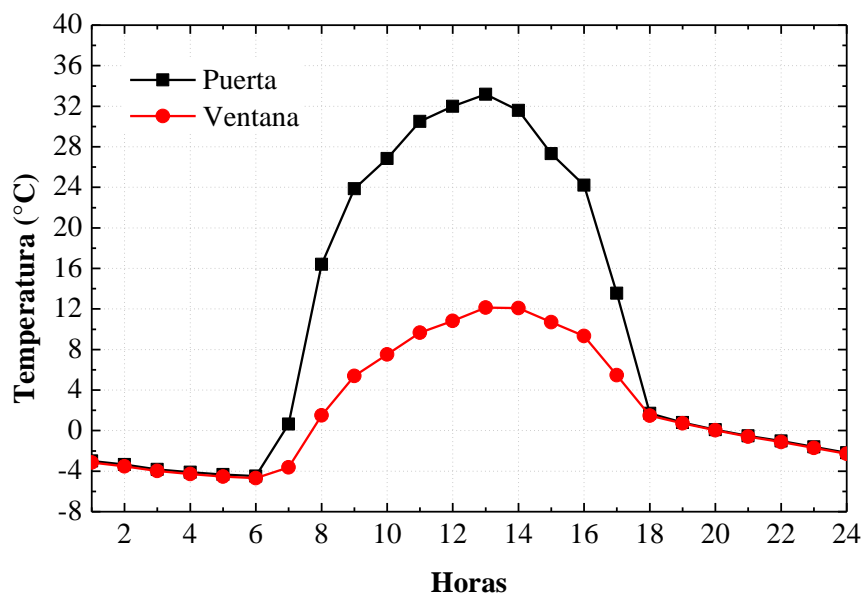
De la Tabla 14 y Figura 61 y 62 se puede inferir que un diseño de vivienda alargado de Este a Oeste asegura aprovechar en mayor medida la incidencia de la irradiancia solar sobre la fachada Norte para edificaciones o viviendas en la latitud Sur. En ese sentido conviene dimensionar en mayor medida ventanas, invernaderos adosados, y claraboyas en el techo orientados hacia el Norte dado a que para el día referencial en análisis y para meses de

heladas, el Sol esta tirado hacia el Norte como también se aprecia en la carta estereográfica (Figura 14).

La Figura 63, 64 y 65 muestra el comportamiento de las temperaturas horarias superficiales exteriores para el día referencial de análisis de frío extremo, 15 de julio. Se aprecia que tanto para las horas diurnas como nocturnas, el techo (Figura 63) el cual lleva calamina metálica, presenta resultados indeseados ya que en el día se comporta como una fuente de emisión de calor excesivo al interior, y en las noches y madrugada, como sumidero, resultado de su pobre nivel de aislamiento dado a que es un conductor del calor.

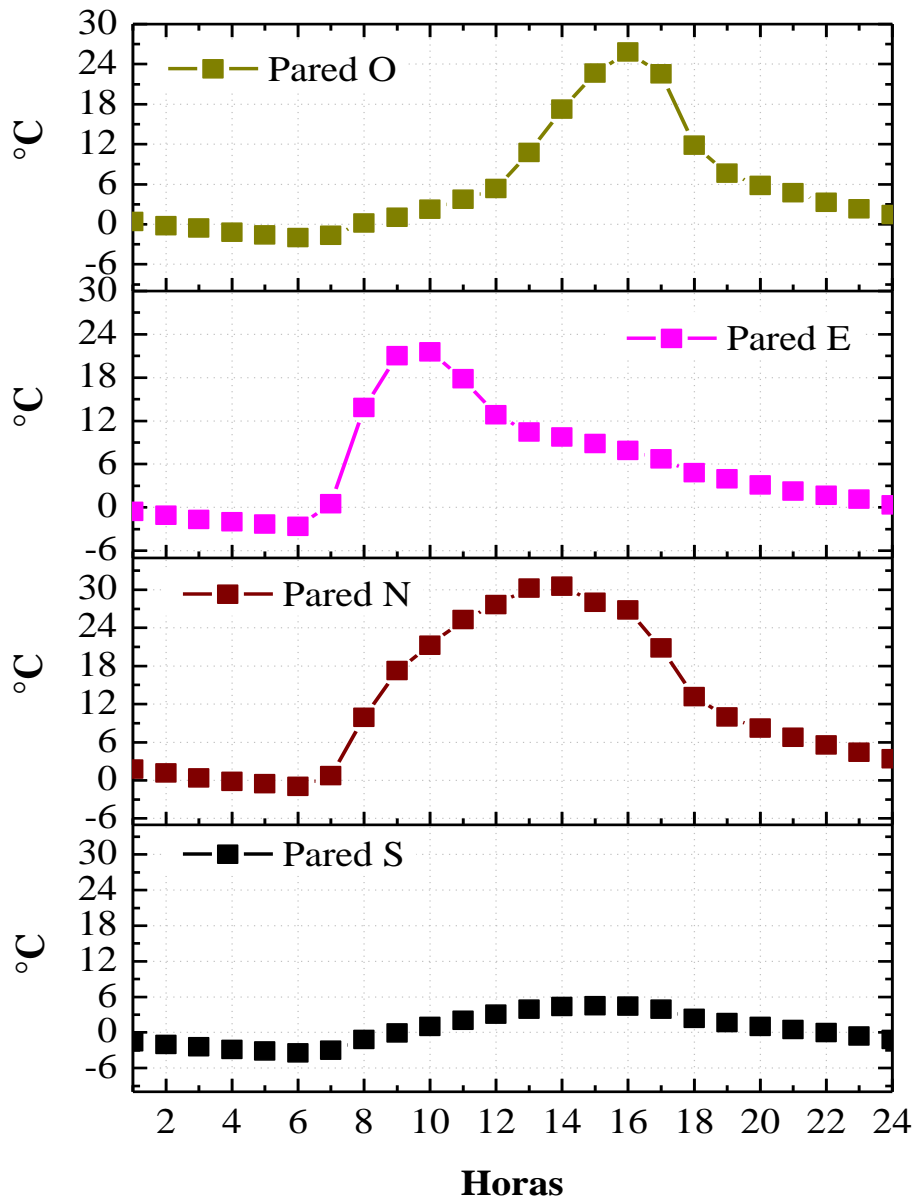


**Figura 63.** Temperaturas horarias superficiales exteriores en el ala sur y norte (Ala S y Ala N), y piso en el MT para el día referencial de frío extremo, 15 de julio.



**Figura 64.** Temperaturas horarias superficiales exteriores en la puerta y ventana del MT para el día referencial de frío extremo, 15 de julio.

En la Figura 64 la puerta presenta una temperatura superficial exterior casi similar al ala Norte del techo debido al día referencial en estudio, 15 de julio, dado a que ambos son de calamina metálica. El ala Sur a pesar de ser del mismo material no presenta el mismo comportamiento debido a que para ese día, el Sol está más tirado al Norte y por ello mismo, la pared Sur respecto de las otras paredes permanece bajo sombra y presenta un comportamiento de su temperatura superficial exterior muy por debajo del resto de paredes tal como se aprecia en la Figura 65.



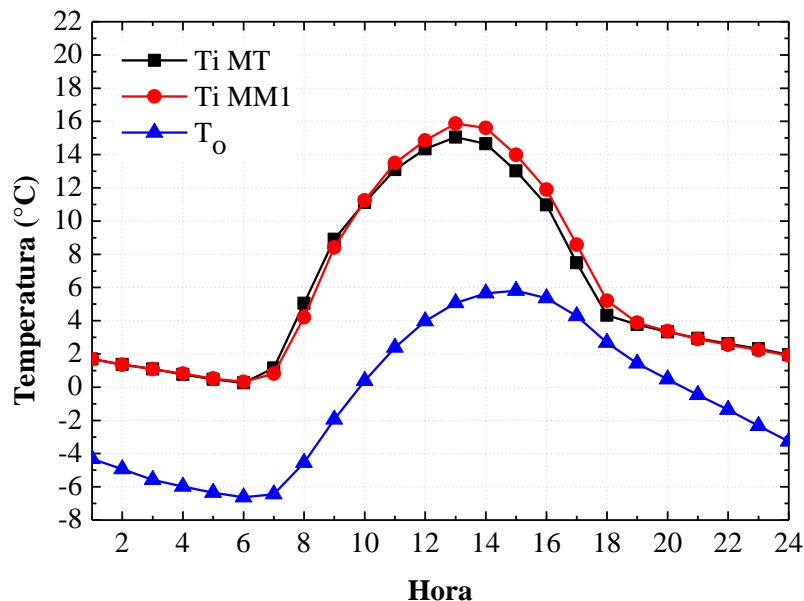
**Figura 65.** Temperaturas horarias superficiales exteriores de paredes del MT para el día referencial de frío extremo, 15 de julio.



### 8.2.2 Módulo mejorado 1 (MM1)

El MM1 comprende las mejoras en cuanto al aislamiento del MT, el piso lleva en este caso una cama de piedras, entramado de madera con espacios de aire tipo cámara de aire, y tablas de madera. Las paredes de adobe llevan enlucido interior y exterior con yeso, el techo es de fibrocemento, la puerta es contraplacada con cámara de aire, y la ventana lleva marco de madera con doble vidrio.

Con las mejoras en el aislamiento de la envolvente del MT se obtiene la Figura 66 donde la  $T_i$  se incrementa en promedio  $0,2^\circ\text{C}$ . Igual que el MT la envolvente de MM1 no está amortiguando la  $T_o$  dado a que la oscilación térmica interior es mayor que la exterior e incluso, en este caso la oscilación térmica interior aumenta aún más respecto al MT (Tabla 15). Esto se debe también al material de la cubierta del techo dado a que este lleva solo una capa de fibrocemento de 4mm de espesor mientras que, los demás elementos se han aislado adicionado materiales o cámaras de aire en su composición. La ventaja del fibrocemento es que disminuye considerablemente el ruido producido por el choque de la granizada sobre su superficie, es decir, mejora el confort acústico. Entonces, en base a los resultados del MT y MM1, el techo tiene que llevar un aislamiento adicional para lograr mejorar la  $T_i$ .



**Figura 66.** Temperatura promedio horaria interior ( $T_i$ ), y exterior ( $T_o$ ), para el MT y MM1.

De la Tabla 15 se muestra que el retardo para el caso del MM1 es 22 horas, si bien es un valor alto, no es el adecuado para esperar mejorar las condiciones interiores justo en las horas de frío extremo.

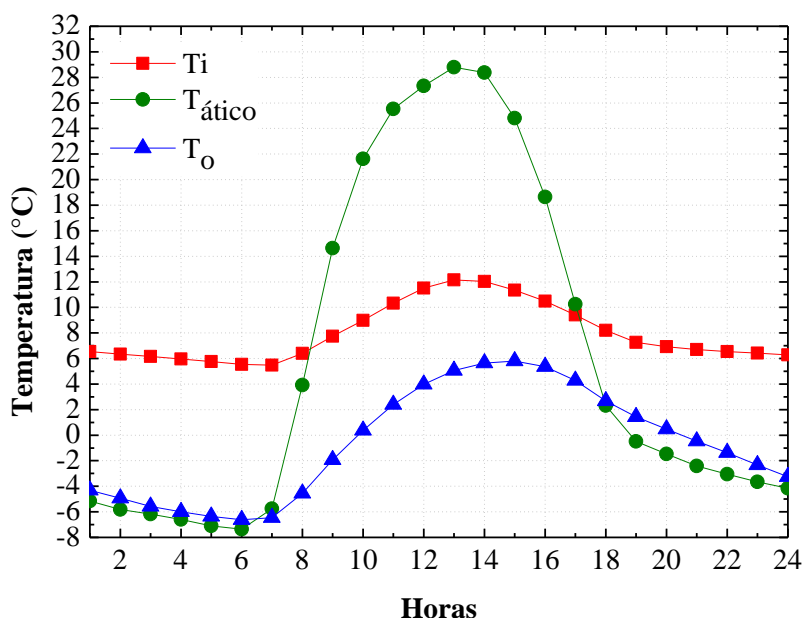
**Tabla 15.** Oscilación y retardo térmico para el MM1.

	<i>exterior</i>	<i>interior</i>
Oscilación	12,4°C	15,6°C
Retardo	22h	

### 8.2.3 Módulo mejorado 2 (MM2)

El MM2 comprende la adición de cielo raso al MM1 utilizando para ello triplay y poliestireno, así como, la adición de claraboyas tanto en el techo como en el cielo raso. Se resaltará el aporte térmico solo por dichas implementaciones frente al MM1.

La Figura 67 muestra la gráfica del comportamiento de la temperatura horaria interior (Ti) del MM2 y la del espacio entre techo y falso techo denominado como ático ( $T_{\text{ático}}$ ), frente a la temperatura horaria exterior ( $T_o$ ). Es notorio el amortiguamiento de la Ti con la configuración de techo y falso techo especialmente, y demás configuraciones de la envolvente para este caso. Como se mencionó anteriormente, esta configuración de techo y falso techo presenta mejores prestaciones térmicas frente al material tipo sándwich y la ventaja de un menor costo, además de que los materiales utilizados están más a disposición de ser ubicados en las regiones de zonas rurales.



**Figura 67.** Temperatura horaria interior, MT (Ti), y ático ( $T_{\text{ático}}$ ); y temperatura horaria exterior ( $T_o$ ).

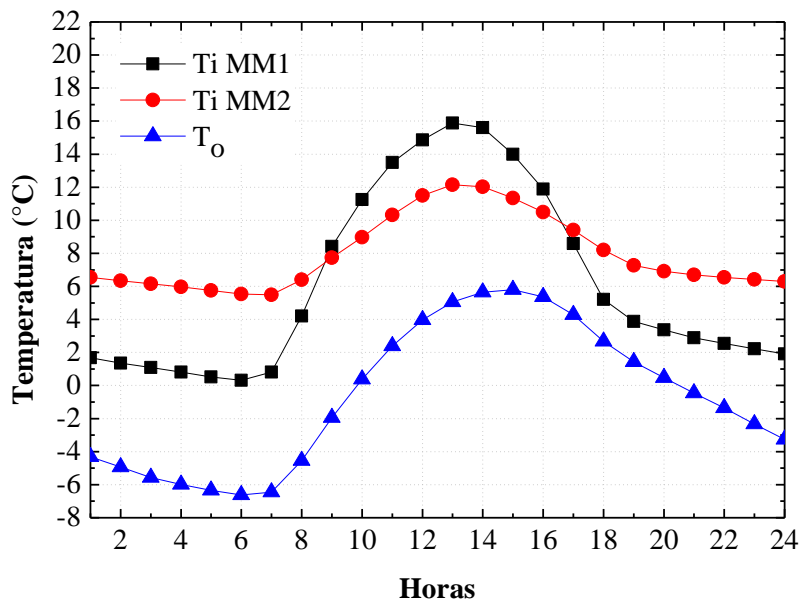
El amortiguamiento se debe a que la configuración de techo y falso techo crea una cámara de aire entre ellos (ático), como aislamiento natural, así como, la configuración permite reducir el volumen a calentar y facilitar el control del espacio frente a las infiltraciones no deseadas, todo ello lo conlleva a una amortiguamiento de 6°C. El retardo térmico se mantiene en 22 horas.

**Tabla 16.** Oscilación y retardo térmico para el MM2 con techo y falso techo, y claraboyas.

	<i>exterior</i>	<i>interior</i>
Oscilación	12,4°C	6,5°C
Retardo	22h	

De la Figura 68 dado a que el MM2 se diferencia del MM1 en que el primero lleva claraboyas en el techo y falso techo, se puede inferir que el aporte de las claraboyas en horas extremas de la madrugada, 06:00 a.m., es de 5,2°C, y respecto al exterior de 12.1°C. De la misma figura se observa que en entre las 09:00 a.m. y 16:00 p.m., la Ti del MM1 está por encima de la Ti del MM2, y el resto de horas y en especial en horas de la madrugada se invierte el comportamiento, de este resultado se puede inferir que esto sucede porque en el día la radiación solar que ingresa por las claraboyas se almacena en las paredes de adobe de alta masa térmica, por eso la temperatura interior en el día del MM2 es menor al del MM1, y en la madrugada este calor almacenado es devuelto paulatinamente al interior del MM2 y por eso

en la madrugada se invierte el comportamiento.



**Figura 68.** Comportamiento de la temperatura interior (Ti) horaria del MM1 y MM2 frente a la temperatura exterior ( $T_o$ ).

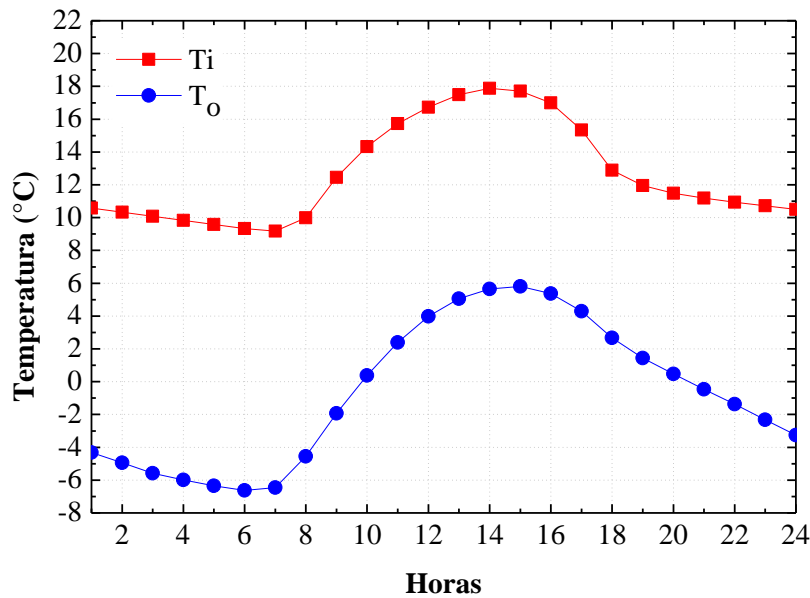
Cabe resaltar de la Figura 68 el comportamiento de la temperatura horaria del ático, esta desde las 09:00 a.m., hasta las 17:00 p.m., se mantiene por encima de los  $10^{\circ}\text{C}$  y a partir de la 1 p.m., supera los  $12^{\circ}\text{C}$  de la Ti, estos resultados sugieren investigar de qué forma puede aprovecharse este calor almacenado en el ático, que repercuta al interior del módulo, tal vez con algún sistema de ductos mecánicos eléctricos que lleven el aire caliente al interior mediante circulación forzada.

#### 8.2.4 Módulo mejorado 3 (MM3)

En este caso al MM2 se le adiciona el falso techo de triplay y poliestireno, y un invernadero adosado a la pared orientada al norte donde, la puerta de ingreso al ambiente mismo del módulo, está en su interior, es decir, la puerta de ingreso principal es por el invernadero. Esta configuración de la puerta de ingreso al módulo por el invernadero hace de este último una especie de esclusa aparte de invernadero, así se evita que si la puerta de ingreso principal está en contacto con el aire exterior, al ingresar en su interior, también ingrese el aire frío y remueva el aire caliente, cosa que con el invernadero adosado incluso convendría abrir la puerta para que ingrese aire caliente del invernadero al módulo.

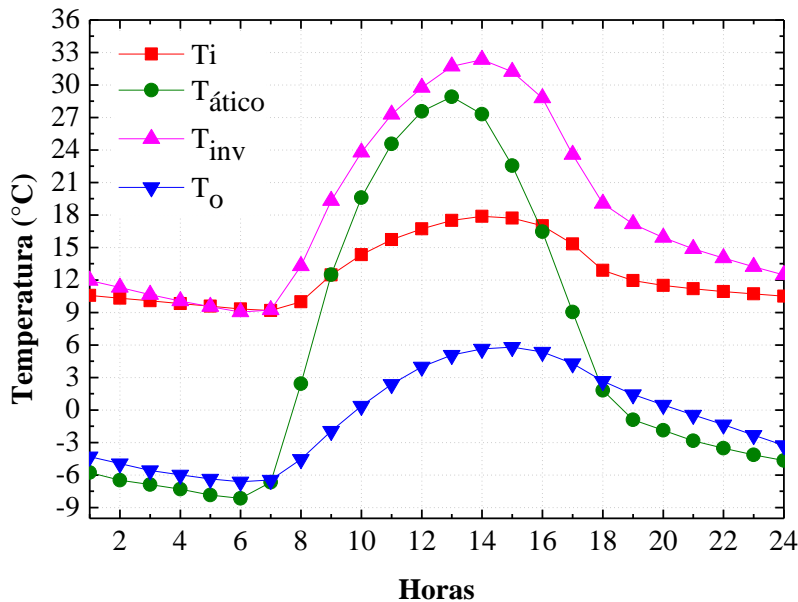
El invernadero además de comportarse como una trampa de calor, permite realizar pequeños cultivos de hortalizas que a campo abierto es difícil su cultivo y en especial en Imata por su altitud, o como una especie de espacio social de uso en el día.

La Figura 69 muestra el comportamiento de la Temperatura horaria interior (Ti), con la temperatura exterior ( $T_o$ ) para el día 15 de julio. Se observa un incremento de la Ti en horas extremas de frío de  $15^{\circ}\text{C}$  respecto del exterior,  $3,8^{\circ}\text{C}$  respecto del MM2,  $9^{\circ}\text{C}$  respecto del MM1, y de  $9,1^{\circ}\text{C}$  del MT. Se puede inferir de estos resultados que el invernadero adosado tiene un aporte térmico al interior mayor en  $3^{\circ}\text{C}$  que el uso de las claraboyas en techo y falso techo. Considerando utilizar policarbonato como cubierta de claraboya o invernadero, el costo por material del invernadero por su mayor dimensión es mucho mayor pero, lo que se pretende alcanzar son resultados que garanticen en lo posible el costo-beneficio.



**Figura 69.** Temperatura horaria, interior (Ti) y exterior (To) para el MM3.

Graficando en conjunto las temperaturas horarias al interior del módulo (Ti), exterior (To), ático ( $T_{\text{ático}}$ ), e invernadero ( $T_{\text{inv}}$ ), se obtiene sus comportamientos en la Figura 70. El invernadero de acuerdo a su comportamiento térmico mantiene el calor acumulado en el día en piso y paredes incluso después de las 06:00 p.m. por encima de la Ti hasta alrededor la medianoche.



**Figura 70.** Temperaturas horarias, interior (Ti), exterior (To), ático ( $T_{\text{ático}}$ ) e invernadero ( $T_{\text{inv}}$ ), para el 15 de julio.

La Tabla 17 muestra la oscilación térmica diaria para el 15 de julio, con un amortiguamiento de la temperatura exterior de  $3,8^{\circ}\text{C}$ , y retardo térmico de 23 horas.

**Tabla 17.** Oscilación y retardo térmico para el MM3 con techo y falso techo, e invernadero adosado a la fachada Norte.

	<i>exterior</i>	<i>interior</i>
Oscilación	12,4°C	8,6°C
Retardo	23h	

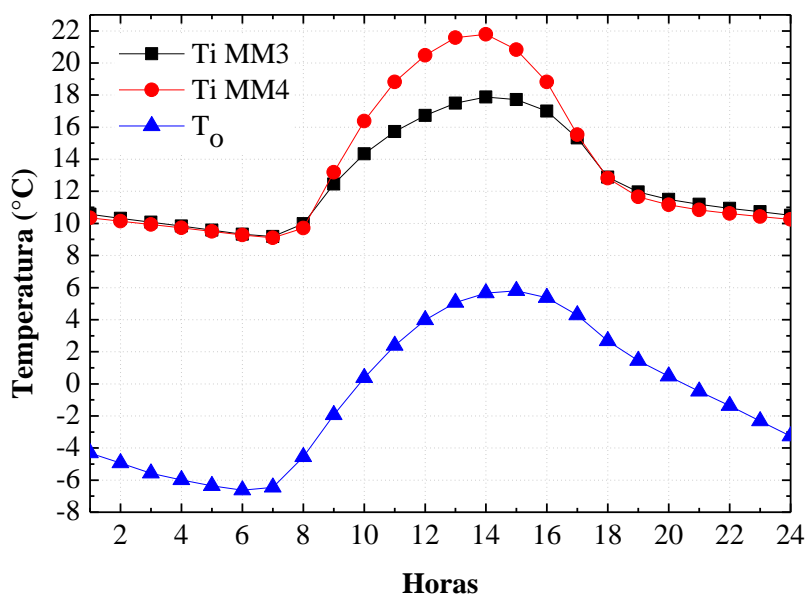
### 8.2.5 Módulo mejorado 4 (MM4)

El MM4 es el diseño final y lleva claraboyas en el techo y falso techo, invernadero adosado en la fachada Norte, y control de contraventanas en las claraboyas del techo. A diferencia del MM3, por llevar claraboyas, en el día la temperatura horaria máxima se incrementa en 4°C (Ver Figura 71). La temperatura horaria mínima extrema prácticamente se mantiene.

La Tabla 18 muestra los resultados de las oscilaciones de temperatura interior y exterior. Se aprecia que prácticamente la oscilación de la temperatura exterior e interior son la misma y que esta ocurre con un retardo de 23 horas.

**Tabla 18.** Oscilación y retardo térmico para el MM4 con techo y falso techo con claraboyas, e invernadero adosado a la fachada Norte.

	<i>exterior</i>	<i>interior</i>
Oscilación	12,4°C	12,5°C
Retardo	23h	

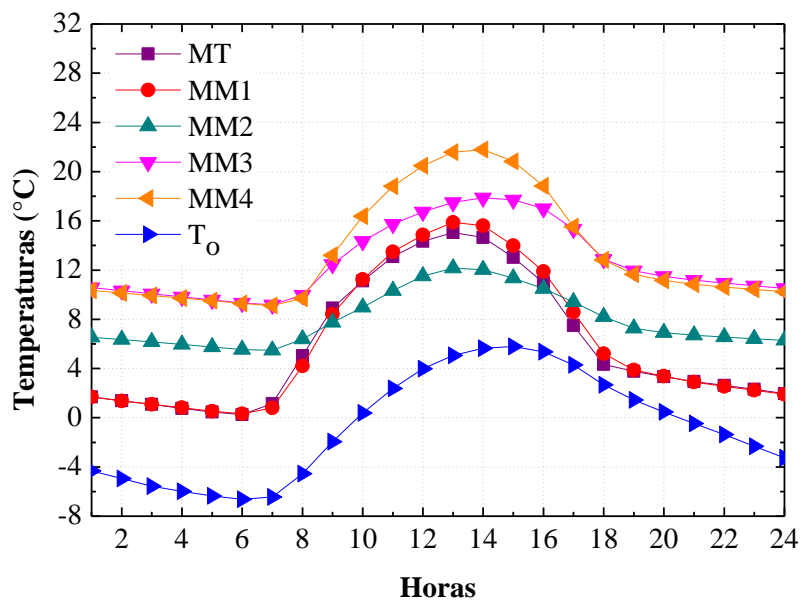


**Figura 71.** Comportamiento de la temperatura interior (Ti), horaria y exterior (To), para el MM3 y MM4 en el día referencial, 15 de julio.

La Figura 72 muestra en conjunto el comportamiento de los módulos considerados en la simulación y como propuestas de diseño, MT, MM1, MM2, MM3, y MM4, y la tabla 19 muestran los valores de dichos comportamiento. Se aprecia como desde el MT al MM4 la temperatura en horas extremas de frío se incrementan de acuerdo a las adiciones consideradas en cada módulo ya sea de aislamiento o inclusión de sistemas de climatización natural directo e indirecto aprovechando la radiación solar como claraboyas o invernaderos adosados, además del uso de contraventanas para evitar las fugas de calor en la noche y madrugada,

horas donde el MM3 y MM4 presentan prácticamente el mismo comportamiento, en tal sentido, se infiere que con el diseño y consideraciones, más allá de lo alcanzado en cuanto a incrementar la  $T_i$ , no será posible de forma pasiva. Incrementar la temperatura en dichas horas será posible con la inclusión de algún sistema mecánico – eléctrico de climatización activo renovable.

La temperatura interior alcanzada en horas de la noche y madrugada con el MM3 y MM4, a consideración del autor, son más que suficientes, ya que el incremento con el exterior es de  $15^{\circ}\text{C}$ , y  $10^{\circ}\text{C}$  respecto al módulo referencial o típico. Temperaturas a alcanzar más allá de lo mencionado, podría generar malestar o incomodidad ya que el poblador andino con todas sus necesidades y carencias, está obligado a adaptarse a su clima. Este es otro punto de investigación que aún está pendiente, que tiene que ver con los índices bioclimáticos para la región andina, no se sabe a ciencia cierta para la población peruana, cuanto debería ser la temperatura y rango de bienestar térmico para su población.



**Figura 72.** Temperatura horaria interior para el módulo típico, (MT), mejorado 1, 2, 3 y 4 (MM1, MM2, MM3, Y MM4), para el día referencial de frío extremo, 15 de julio.

La Tabla 19 muestra los valores de las temperaturas interiores ( $T_i$ ) horarias de los 5 diseños de módulos desde el MT hasta el MM4, y la temperatura exterior ( $T_o$ ). De la tabla se observa que en el día, el MM3 y MM4 a partir de las 09:00 a.m., hasta las 18:00 p.m., está en la zona de bienestar e incluso el MM4 sobrepasa unos grados por 5 horas dicha zona. Los otros módulo presentan menos horas en la zona de bienestar, e incluso el MM2 no se ubica en dicha zona su  $T_i$  se incrementa en horas de la madrugada por encima de los  $5^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 19.** Resumen de los valores de  $T_i$  en los módulos y  $T_o$  para el día de frío extremo, 15 de julio, considerado como referencia del estudio.

<b>Horas</b>	<b>MT (°C)</b>	<b>MM1 (°C)</b>	<b>MM2 (°C)</b>	<b>MM3 (°C)</b>	<b>MM4 (°C)</b>	<b><math>T_o</math> (°C)</b>
1	1,7	1,7	6,5	10,6	10,4	-4,3
2	1,4	1,4	6,3	10,3	10,1	-4,9
3	1,1	1,1	6,2	10,1	9,9	-5,6
4	0,8	0,8	6,0	9,8	9,7	-6,0
5	0,5	0,5	5,8	9,6	9,5	-6,4
6	0,3	0,3	5,5	9,3	9,3	-6,6
7	1,2	0,8	5,5	9,2	9,1	-6,5
8	5,1	4,2	6,4	10,0	9,7	-4,6
9	8,9	8,4	7,7	<b>12,5</b>	<b>13,2</b>	-1,9
10	11,1	11,2	9,0	<b>14,3</b>	<b>16,4</b>	0,4
11	13,1	13,5	10,3	<b>15,7</b>	<b>18,8</b>	2,4
12	14,3	14,9	11,5	<b>16,7</b>	<b>20,5</b>	4,0
13	15,0	15,9	12,2	<b>17,5</b>	<b>21,6</b>	5,1
14	14,6	15,6	12,0	<b>17,9</b>	<b>21,8</b>	5,7
15	13,0	14,0	11,3	<b>17,7</b>	<b>20,8</b>	5,8
16	11,0	11,9	10,5	<b>17,0</b>	<b>18,8</b>	5,4
17	7,5	8,6	9,4	<b>15,3</b>	<b>15,5</b>	4,3
18	4,3	5,2	8,2	<b>12,9</b>	<b>12,8</b>	2,7
19	3,8	3,9	7,3	12,0	11,7	1,4
20	3,3	3,4	6,9	11,5	11,2	0,5
21	2,9	2,9	6,7	11,2	10,8	-0,5
22	2,6	2,5	6,6	10,9	10,6	-1,4
23	2,3	2,2	6,4	10,7	10,4	-2,3
24	2,0	1,9	6,3	10,5	10,2	-3,3
<b>Prom.</b>	<b>5,9</b>	<b>6,1</b>	<b>7,9</b>	<b>12,6</b>	<b>13,5</b>	<b>-0,7</b>

### 8.3 Requerimiento energético del MT y MM4 para alcanzar una temperatura de bienestar térmico

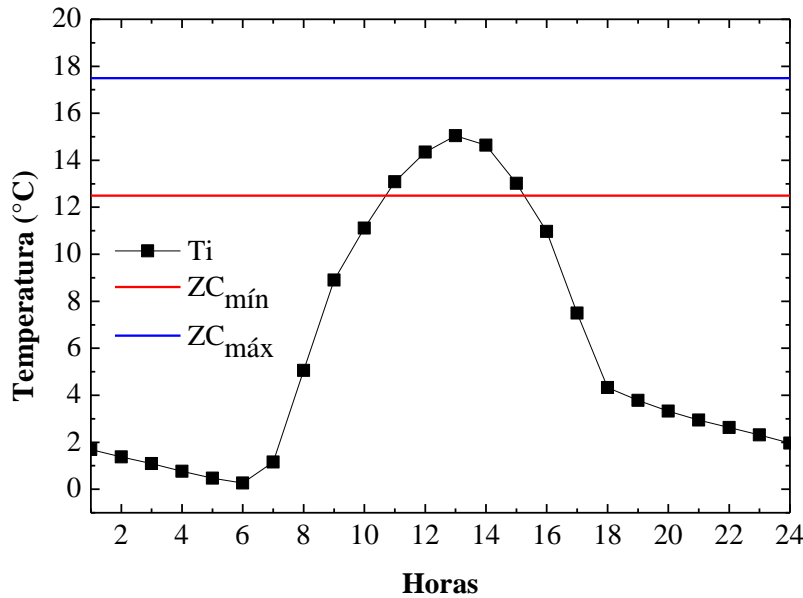
Se presenta los resultados de las simulaciones energéticas para el MT y MM4, y se determina los requerimientos en carga térmica de calefacción que se alcanza con cada uno de ellos en términos de ahorro de energía a partir de una temperatura interior a mantener constante. Para ello, se considera una temperatura referencial de bienestar térmico ( $T_n$ ) a alcanzar según modelo adaptativo, que para Imata resulta ser  $T_n=15^\circ\text{C}$ , con límites o amplitud máximo ( $ZC_{\text{máx}}$ ) y mínimo ( $ZC_{\text{mín}}$ ) de bienestar de  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  (ver punto 4.4 Mediciones del confort térmico), para el mes más frío donde se ubica la temperatura extrema (15 de julio) que se ha venido analizando según los resultados alcanzados del comportamiento térmico interior de los módulos típico y mejorados. Respecto de una temperatura de confort estandarizada utilizada por el ASHRAE de  $23^\circ\text{C}$  y amplitud de  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  (ver Tabla 4).

#### 8.3.1 Requerimiento de carga térmica en calefacción en el MT

Se simula el MT con el interior a una temperatura constante de  $15^\circ\text{C}$  para determinar la carga térmica o energética de calefacción que se requiere para alcanzar dicha temperatura de acuerdo a su diseño, ubicación, uso de materiales, configuración de los elementos

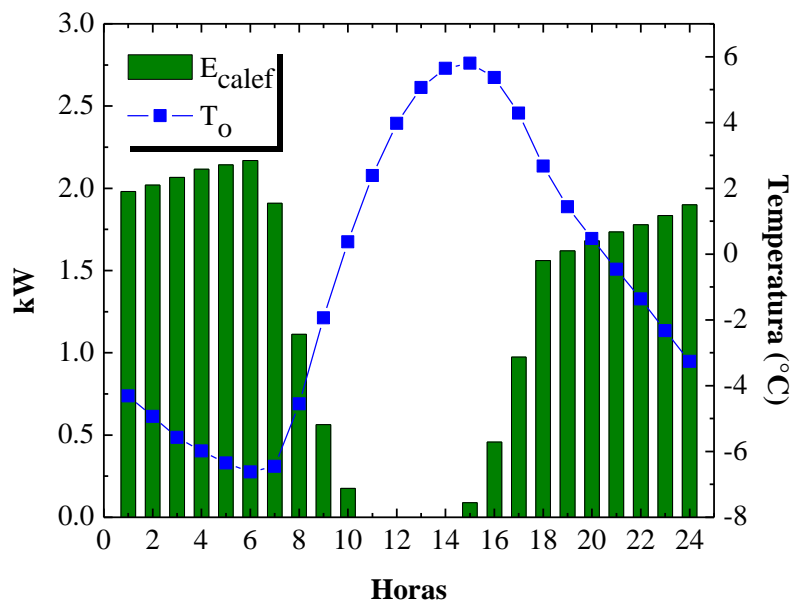
constructivos de la envolvente, y archivo de clima. Con las mismas condiciones mencionadas se simula el mismo módulo pero a una temperatura estandarizada de 23°C.

La Figura 73 representa la temperatura interior (Ti) y los límites de la zona de bienestar térmico comprendidos por la zona entre las líneas roja y azul. Se observa que para el día referencial en estudio de frío extremo, 15 de julio, el MT presenta 4 horas de bienestar térmico.



**Figura 73.** Temperatura interior (Ti) horaria y límites de la zona de bienestar térmico en el MT (temperatura de bienestar, 15°C), máximo ( $ZC_{máx}=17,5^{\circ}C$ ) y mínimo ( $ZC_{mín}=12,5^{\circ}C$ ).

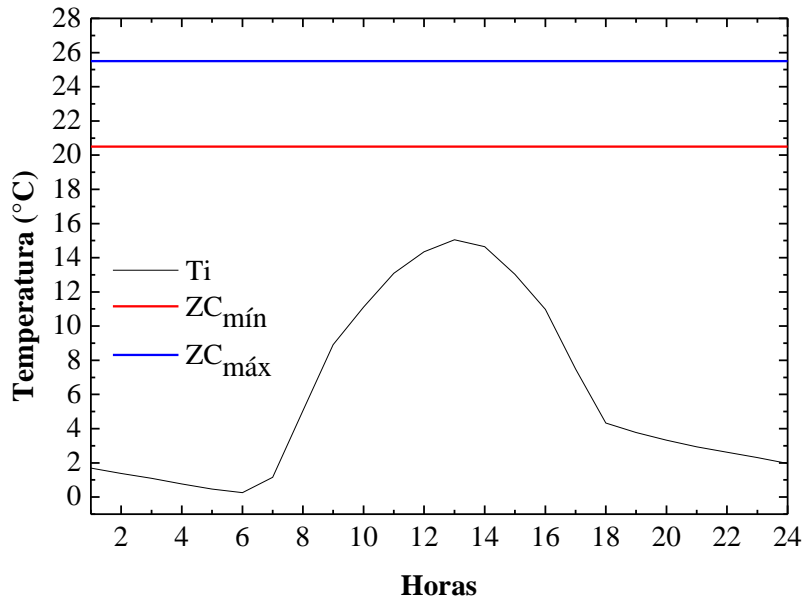
La Figura 74 corresponde a la cantidad de energía que se requiere en el MT para alcanzar una temperatura interior de 15°C constante. Con un mínimo de 0,09kWh a las 15:00 p.m., y máximo de 2,17kWh a las 06:00 a.m., durante las 24 horas requiere en total 30kWh para cubrir cada hora la demanda en calefacción. Entre las 11:00 a.m., y 14:00 p.m., no existe requerimiento de calefacción.



**Figura 74.** Requerimiento de energía de calefacción horaria ( $E_{calef}$ ) para el MT a 15°C.

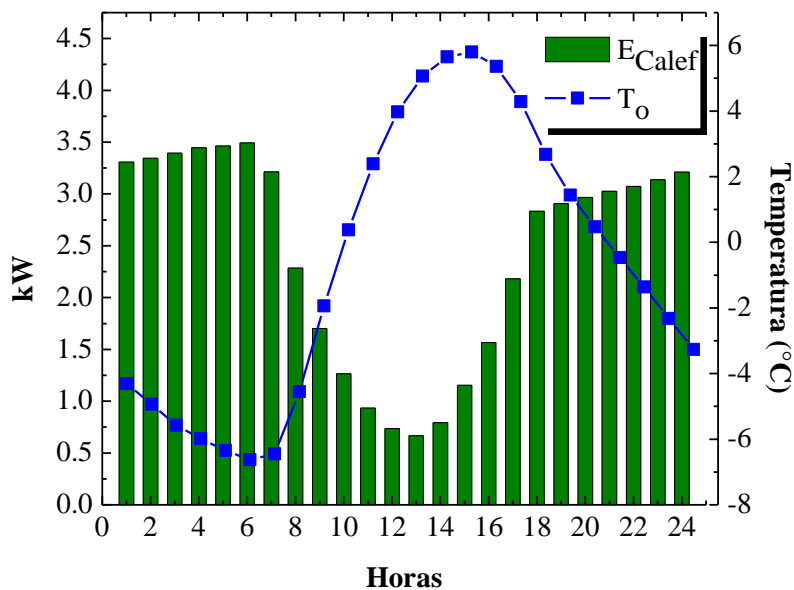


Ahora, considerando una temperatura estandarizada de 23°C constante en el interior del MT, se obtiene la zona interior de bienestar térmica comprendida entre las líneas azul y rojo tal como se muestra en la Figura 75. Para esta temperatura los requerimientos de energía para calefacción son necesarios las 24 horas tal como se aprecia en la Figura 76.



**Figura 75.** Temperatura interior (Ti) horaria y límites de la zona de bienestar térmico en el MT (temperatura de bienestar, 23°C), máximo (ZC<sub>máx</sub>=25,5°C) y mínimo (ZC<sub>mín</sub>=20,5°C).

La Figura 76 representa la cantidad de energía de calefacción que requiere el MT para mantener una temperatura interior constante de 23°C en diferentes horas del día referencial en estudio. Con un mínimo de 0,67kWh a las 13:00 p.m., y máximo de 3,49kWh a las 06:00 p.m. En total se requiere 58,1kWh.

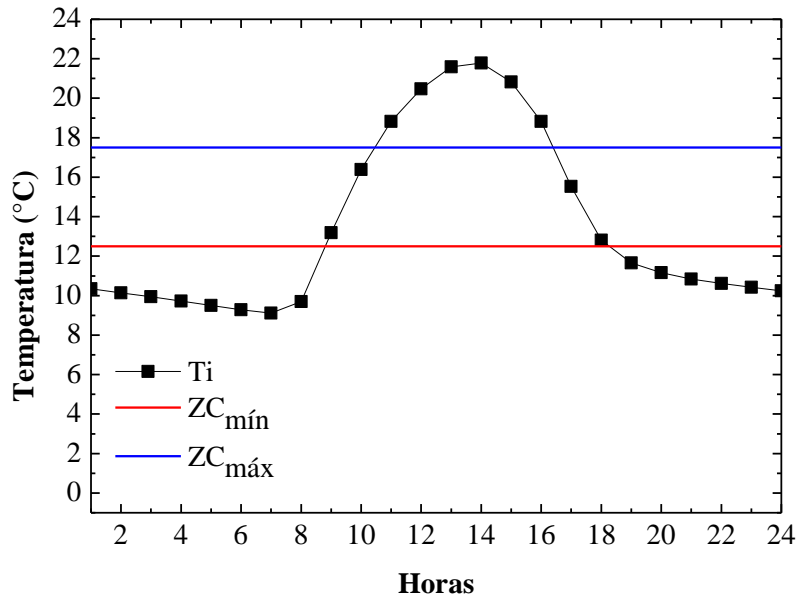


**Figura 76.** Requerimiento de energía de calefacción horaria (E<sub>caleg</sub>) para el MT a 23°C.

### 8.3.2 Requerimiento de carga térmica en calefacción en el MM4

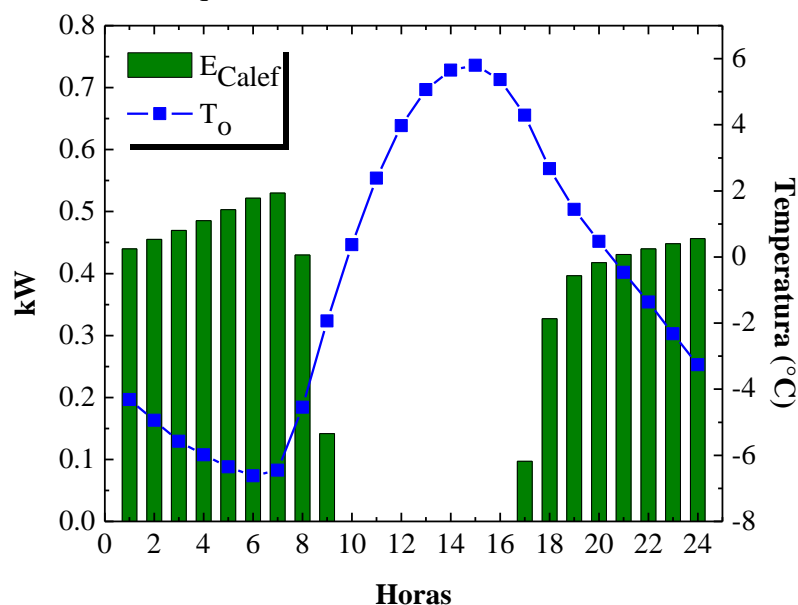
Se presenta los resultados de la simulación dinámica para el diseño final de módulo mejorado

MM4, sobre la cantidad de energía de calefacción que requiere para mantener la temperatura interior constante en 15°C, temperatura de bienestar térmica según modelo adaptativo para Imata. La Figura 77 muestra la temperatura interior (Ti) del MM4 respecto de la zona de bienestar que comprende el interior de las líneas en azul y rojo. Se aprecia de la gráfica que hay horas donde la Ti está por encima de la zona de bienestar entre las 11:00 a.m., hasta 16:00 p.m., y en la misma zona de 09:00 a 10:00 a.m., y de 17:00 a 18:00 p.m.



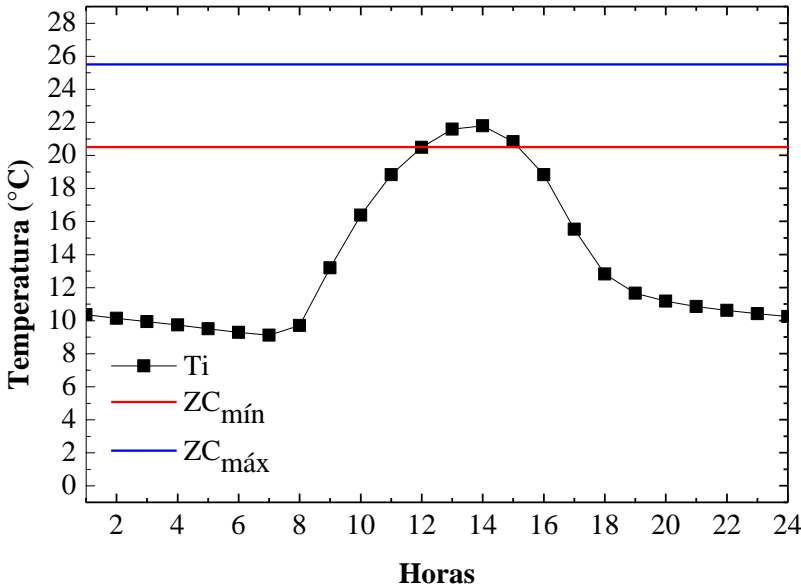
**Figura 77.** Temperatura interior (Ti) horaria y límites de la zona de bienestar térmico en el MM4 (temperatura de bienestar, 15°C), máximo ( $ZC_{máx}=17,5^{\circ}C$ ) y mínimo ( $ZC_{mín}=12,5^{\circ}C$ ).

La Figura 78 muestra la cantidad de energía horaria requerida para alcanzar la temperatura de bienestar térmico al interior MM4. Se observa que desde las 10:00 a.m., hasta las 16:00 p.m., no hay requerimiento de calefacción. En las demás horas hay un requerimiento mínimo de 0,1kWh a las 17:00 p.m., y máximo de 0,53kWh a las 07:00 a.m., en total para el día de referencia de frío extremo se requiere 7kWh.



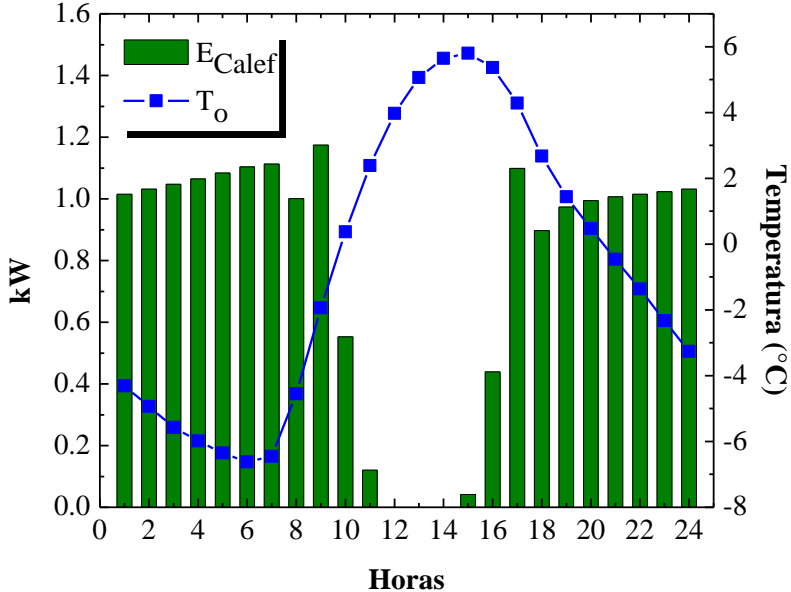
**Figura 78.** Requerimiento de energía de calefacción horaria ( $E_{calef}$ ) para el MM4 a 15°C.

Para el caso de considerar una temperatura estandarizada interior en el MM4 de 23°C se obtiene la gráfica de la Figura 79. Se aprecia un mínimo de 3 horas de bienestar térmico que se alcanza al interior. Las demás horas requieren calefacción.



**Figura 79.** Temperatura interior (Ti) horaria y límites de la zona de bienestar térmico en el MM4 (temperatura de bienestar, 23°C), máximo (ZC<sub>máx</sub>=25,5°C) y mínimo (ZC<sub>mín</sub>=20,5°C).

La Figura 80 muestra la energía requerida de calefacción (E<sub>Calef</sub>) para alcanzar una temperatura constante al interior del MM4 de 23°C. Con un mínimo de 0,04kWh a las 15:00 p.m., y máximo de 1,17kWh a las 09:00 a.m., y en total para el día referencial de estudio, 15 de julio, 18,8kWh.



**Figura 80.** Requerimiento de energía de calefacción horaria (E<sub>calef</sub>) para el MM4 a 23°C.

La Tabla 20 resumen el requerimiento de energía de calefacción (en kWh) para mantener una temperatura interior constante de 15 y 23°C. Al considerar una temperatura de bienestar térmico estandarizada, los equipos o artefactos a considerar para suplir la demanda de calefacción estarían sobrestimados. Mientras que a temperaturas interiores de bienestar

relacionadas con la temperatura exterior mediante modelos de bienestar adaptativos, la demanda de energía en calefacción se reduce en un 77%, claro está que para ello también hay que mejorar la envolvente utilizando materiales idóneos al clima, utilizar estrategias y técnicas de aislamiento pasivo que aprovechen la radiación solar de forma directa e indirecta, y evitar todo tipo de infiltraciones, tal como se llegó al MM4 partiendo del MT según la metodología propuesta en el estudio.

**Tabla 20.** Resumen del requerimiento de energía de calefacción en el MT y MM4 a temperatura interiores constantes de 15°C, y 23°C.

<b>Energía de calefacción (<math>E_{\text{Calef}}</math>) en kWh</b>						
Módulos	15°C			23°C		
	Mínimo	Máximo	Total	Mínimo	Máximo	Total
MT	0,09	2,17	30	0,67	3,49	58,1
MM4	0,1	0,53	7	0,04	1,17	18,8

## IX. CONCLUSIONES

Del análisis de materiales como cubierta de techo, el uso del fibrocemento más allá de mejorar el confort acústico del ruido producido por la granizada que entorpece el descanso o actividades que requieran concentración, térmicamente su uso no es idóneo para zonas andinas dado a que presenta un comportamiento casi igual al de la calamina metálica.

La configuración de techo y falso techo con espacio tipo cámara de aire y poliestireno como aislamiento, siempre y cuando se presente un aire estanco libre de infiltraciones, se presenta como propuesta inmejorable con respuestas térmicas altas de amortiguamiento tan igual que los materiales industrializados de elevado costo y accesibilidad por el poblador andino.

El adobe de acuerdo a los resultados se presenta como un material idóneo de almacenamiento de energía para la zona de Imata, y zonas con características similares como la altura y costumbre de su sistema constructivo, frente a materiales convencionales de uso masivo en las ciudades como el ladrillo de arcilla cocida tipo King Kong.

Los pisos a diferencia de los otros dos elementos constructivos, presenta más holgura en la selección de materiales y configuraciones de aislamiento, incluso esto mismo se aprecia en las consideraciones de la norma EM.110 donde la transmitancia máxima para dicho elementos constructivo no debe pasar  $3,26\text{W/m}^2\text{°C}$ , frente a las paredes de  $1\text{W/m}^2\text{°C}$ , o techo  $0,83\text{W/m}^2\text{°C}$ .

El módulo típico en horas de frío extremo presenta un incremento de temperatura interior respecto del exterior de  $7\text{°C}$ , gran parte de este calor en su interior se debe al aporte del muro de adobe que por su masa y espesor se convierte en un barrera para evitar la transferencia de calor de adentro hacia afuera, además de su propiedad de inercia térmica.

El módulo mejorado (MM4), sólo con técnicas de aislamiento pasivo e integración en su envolvente de claraboyas e invernadero adosado, con contraventanas controladas para que en las noche se evite la perdida de calor por las ventanas, mejora considerablemente los incrementos de temperatura a tal punto que se llega en horas extremas de frío a  $16\text{°C}$  como mínimo, y  $9\text{°C}$  respecto a lo alcanzado en el módulo típico (MT). Si bien con este diseño gran parte del día se encuentra dentro de la zona de bienestar según modelo adaptativo, en horas de frío extremo para el día referencial de estudio, 15 de julio, y considerando una temperatura interior constante de  $15\text{°C}$ , se requiere para el MT  $2,17\text{kW}$  de potencia instantánea en horas extremas, y  $30\text{kWh}$  durante el día; mientras que para el MM4 se requiere  $0,53\text{kW}$  de potencia instantánea en horas extremas, y  $7\text{kWh}$  durante el día. Se aprecia un ahorro de energía considerable pero no suficiente considerando solo técnicas pasivas de aislamiento en una vivienda.

El invernadero se presenta como una propuesta de climatización indirecta de mayor aporte de calor que las claraboyas en el techo, dado su volumen para atrapar el calor su aporte es  $3\text{°C}$  superior al de las claraboyas. Aparte de ser un ambiente donde se atrape el calor, se puede cultivar algunas hortalizas, o utilizar como un espacio social de descanso en determinadas horas, y al estar la puerta de ingreso al módulo en su interior, se comporta como una especie de esclusa que evita el ingreso de aire frío en caso estuviese en contacto con el exterior y más bien, contribuye al ingreso de aire caliente proveniente del invernadero, así como la ventana que comunica el ambiente del módulo con el invernadero.

Los requerimientos de energía de calefacción para mantener el interior a 15°C en comparación con temperaturas estandarizadas de bienestar térmico interior de 23°C, permiten un ahorro de energía del 77% y costo económico considerable junto a un dimensionamiento más racional de los equipos a utilizar. Con el diseño del MM4 se puede inferir que la temperatura interior alcanzada para el día referencial de frío extremo, puede ser suficiente para mejorar las condiciones térmicas interiores dado a que se llega a casi 10°C respecto del módulo típico, incrementar o aumentar más la temperatura podría generar discomfort dado a que la población de Imata está de alguna forma adaptada a su clima.

Lograr las condiciones de mejoras térmicas en las viviendas típicas de Imata que en su totalidad es de calamina, conllevaría a una rehabilitación según los resultados encontrados (la calamina y el fibrocemento tienen casi el mismo comportamiento), entonces habría que colocar a las viviendas un falso techo aislado con poliestireno, este más la cámara de aire que se crea con la configuración de techo y falso techo, incrementa el aislamiento y presenta resultados similares a materiales industrializados de costos inalcanzables al poblador de Imata.

Las simulaciones dado a que brindan la posibilidad de realizar cálculos dependientes del tiempo, brindan resultados más realistas lo que conlleva a resultados de ahorro de energía, y eficiencia energética frente a consideraciones de análisis estacionario que solamente dependen del conocimiento del espesor y conductividad térmica. Claro está que esto depende de la consideración de temperatura interior que se desea mantener y que aún para nuestras regiones, son tomadas como resultado del uso de modelos del estudio de otros climas. Este estudio que engloba conocer los índices de bienestar térmico aún está pendiente en el Perú.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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.
- Ashrae, 2005. *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Refrigerating American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE Fundamentals, 1993. *1993 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. ASHRAE.
- Attia, S., Gratia, E., De Herde, A., Hensen, J.L.M., 2012. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy Build.* 49, 2–15.
- Barrios, G., Huelsz, G., Rojas, J., Ochoa, J.M., Marincic, I., 2012. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy Build.* 50, 120–127.
- Bravo, V., 2016. Metodología para la simulación energética de un edificio terciario empleando la herramienta Energy Plus. <http://oa.upm.es/42923/>
- Caderot, N., 2018. Modelización energética de edificios con herramienta de simulación dinámica.
- Cannon, W.B., 1932. *The wisdom of the body*.
- Cengel, Y., Ghajar, A., 2015. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5ta. ed. McGraw-Hill Interamericana.
- Cengel, Y., Ghajar, A., 2011. *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana, México, D.F.
- Chandel, S.S., Aggarwal, R.K., 2012. Thermal Comfort Temperature Standards for Cold Regions. *Innov. Energy Policies* 2, 1–5.
- Chen, X., Yang, H., Zhang, W., 2018. Simulation-based approach to optimize passively designed buildings: A case study on a typical architectural form in hot and humid climates. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 1712–1725.
- Climate Consultant, n.d. <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/climate-consultant>
- CTE, 2016. Herramienta unificada LIDER-CALENER (HULC). Código Téc. Edificación. <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener>
- Del Castillo, B., García, J., Matsumoto, Y., 2017. Analysis and evaluation of bioclimatic systems to characterize their performance in experimental modules. *Energy Procedia*, CISBAT 2017 International Conference Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale 122, 1093–1098.
- Delgado, N., 2014. Prototipo de vivienda rural bioclimática en la reserva ecológica de Chaparrí, Chongoyape. Univ. Católica St. Toribio Mogrovejo - USAT.
- Fanger, P.O., 1973. Assessment of man's thermal comfort in practice. *Br. J. Ind. Med.* 30, 313–324.
- Feng, G., Sha, S., Xu, X., 2016. Analysis of the Building Envelope Influence to Building Energy Consumption in the Cold Regions. *Procedia Eng.*, The 8th international cold climate HVAC Conference 146, 244–250.

- Fumo, N., Mago, P., Luck, R., 2010. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy Build.* 42, 2331–2337.
- Gómez, A., Saavedra, G., Espinoza, R., 2010. Estudio térmico en módulos de vivienda ubicadas en alturas mayores a 3500msnm en la provincia de Castrovirreyna, región Huancavelica. Presented at the Memoria del Simposio Peruano de Energía Solar, Cusco, p. 11.
- Gómez, A.G., Bojórquez, M.G., Ruiz, T.R., 2007. El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados. *Palapa* 2, 45–57.
- González, E., 1986. Proyecto Clima y Arquitectura. Gustavo Gili, México.
- Henning, H.-M., Döll, J., 2012. Solar Systems for Heating and Cooling of Buildings. *Energy Procedia*, 1st International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2012) 30, 633–653.
- Huaylla, F., 2010. Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú [Tesis de Ingeniería Física]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú.
- Huelsz, G., Barrios, G., Rechtman, R., Rojas, J., 2010. Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación, “Anuario de Arquitectura 2009”. Universidad Autónoma Metropolitana. México, p. 12.
- Huelsz, G., Rechtman, R., Rojas, J., 2009. Altos valores de la resistencia térmica no aseguran un buen desempeño térmico de la envolvente de una edificación. Guadalajara, Jalisco, México, pp. 237–240.
- INEI, 2016. Más del 30% de la población que vive en zonas afectadas por heladas está en edad vulnerable. <https://www.inei.gov.pe>
- ISO 7730, 1994. Moderate thermal environments -- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Int. Organ. Stand. <https://www.iso.org/standard/14567.html>
- Košir, M., Gostiša, T., Kristl, Ž., 2018. Influence of architectural building envelope characteristics on energy performance in Central European climatic conditions. *J. Build. Eng.* 15, 278–288.
- Mateus, N.M., Pinto, A., Graça, G.C. da, 2014. Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. *Energy Build.* 75, 511–522.
- Meteonorm, n.d. Global meteorological database for engineers. Planners and education. <http://www.meteonorm.com>
- Molina, J.O., 2018. Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar [Tesis para optar el grado académico de Maestro en Ciencias con Mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú.
- Molina, J.R., 2016. Evaluación bioclimática de una vivienda rural alto andina de la Comunidad San Francisco de Raymina de Ayacucho [Tesis para optar el grado académico de Maestro en Ciencias con Mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú.
- Montoro, G., 2003. Criterios de diseño bioclimático en el Perú [Tesis de Arquitectura]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú.
- Morillón, D., 2004. Atlas del bioclima de México. México, D.F.
- Mosher, M., McGee, C., 2013. Your Home Australia’s Guide to Environmentally Sustainable Homes, 5th Edition. ed. Australia.
- Muñoz, J., Prado, I., 2018. Estudio experimental del comportamiento térmico de una vivienda en Quito situada en el barrio La Vicentina.



- MVCS, 2014. Norma EM.110 Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética. Reglamento Nacional de Edificaciones.  
<http://www.construccion.org.pe/normas/rne2012/rne2006.htm>
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy Build.*, Special Issue on Thermal Comfort Standards 34, 563–572.
- NREL, n.d. OpenStudio. <https://www.openstudio.net/>
- Pérez, J., 2004. Manual de Diseño Bioclimático para la ciudad de Veracruz. México.
- PREDES, 2016. Heladas. PREDES. URL <http://www.predes.org.pe/mapas/heladas/>
- Protzen, J.P., 2005. Arquitectura y construcción incas en Ollantaytambo. Univ Católica Peru, Perú.
- Rincón, M.L., 2015. Confort Térmico en Bioclima Semi-Frío: Estimación a partir de los Enfoques de Estudio Adaptativo y Predictivo. Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Rojas, J., Barrios, G., Huelsz, G., Tovar, R., Jalife-Lozano, S., 2016. Thermal performance of two envelope systems: Measurements in non air-conditioned outdoor test cells and simulations. *J. Build. Phys.* 39, 452–460.
- Ruiz, T.P., 2007. Estándar local de confort térmico para la ciudad de Colima (Tesis). Universidad de Colima, Colima, México.
- Saavedra, G., 2014. Diseño, construcción y evaluación térmica de un módulo de vivienda rural en la localidad de Vilcallamas Arriba, distrito de Pisacoma, provincia Chucuito, región Puno [Tesis de Ingeniería Física]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sarkar, A., 2010. A Methodology for Energy-Efficient Shelter Design with Bioclimatic Design Tools (SSRN Scholarly Paper No. ID 1668440). Social Science Research Network, Rochester, NY.
- SENAMHI, 2003. Atlas Solar - Proyecto PER/98/G31: Electrificación rural a base de energía fotovoltaica en el Perú.
- SENAMHI-FAO, 2010. Atlas de heladas del Perú: convenio interinstitucional Senamhi-FAO. Lima - Perú.
- SENAMHI-MINAM, n.d. Datos históricos. <http://www.senamhi.gob.pe/?p=data-historica>
- Serrano, S., Rincón, L., González, B., Navarro, A., Bosch, M., Cabeza, L.F., 2017. Rammed earth walls in Mediterranean climate: material characterization and thermal behaviour. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 12, 281–288.
- Szokolay, S., 2004. Introduction to Architectural Science: The Basic of Sustainable Design, ilustrada, reimpresa. ed. Architectural Press.
- Trimble Navigation, n.d. SketchUp: 3D modeling for everyone. <https://www.sketchup.com/es>
- Tudela, F., 1982. Bioclima y confort térmico.
- Verbeke, S., Audenaert, A., 2018. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 2300–2318.
- World Bank Group, n.d. Global Solar Atlas. <http://globalsolaratlas.info/downloads/peru>.

## ANEXO

Se presentan en imágenes el avance de la construcción de los módulos bioclimáticos experimentales en Imata cuyas medidas interiores son, base rectangular de 3mx4m y altura 2,20m. La construcción, implementación y evaluación de los módulos experimentales va a permitir validar el modelo y simulación mediante el análisis del comportamiento térmico/energético en campo en la realización de otras tesis, formando recursos humanos en el tema de investigación del bienestar térmico Alto Andino como marco de estudio en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

### MÓDULOS BIOCLIMÁTICOS EXPERIMENTALES EN IMATA



**Figura 1.** (Izq.) Moldeado del barro con ichu y vista de los adobes, (der.) retirando la nieve caída en plena elaboración de adobe en el mes de julio. La nieve llegó a una altura de 10 cm.



**Figura 2.** (Izq.) Secado de canto de los adobes, (der.) levantamiento de muro.



**Figura 3.** (Izq.) Estructura de madera del techo, (der.) vista del módulo típico.



**Figura 4.** Vista del módulo típico al fondo, y delante de él la construcción de los muros del módulo mejorado.



**Figura 5.** Vista de los módulos bioclimáticos con techo de fibrocemento.



**Figura 6.** Vista actual de los módulos bioclimáticos enlucidos con yeso por el exterior.