

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

**Título del trabajo**

Diseño de medidas de eficiencia energético para mejorar confort térmico de vivienda sostenible en Ecuador

INGE-2558

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

**Presentado por:**

Alejandro Fabián Mayorga Delgado

Sebastián Andrés Castillo Villanueva

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## **Evaluadores**

---

Mgrt. Frank Vicente Porras Carrión

**Profesor tutor**

---

Ph.D. Ángel Diego Ramírez Mosquera

**Profesor de la materia**

## Declaración Expresa

---

Nosotros Mayorga Delgado Alejandro Fabián y Castillo Villanueva Sebastián Andrés acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, lunes 20 de mayo del 2024.



Mayorga Delgado  
Alejandro Fabián



Castillo Villanueva  
Sebastián Andrés

## Contents

Capítulo 1: Introducción, Objetivos y Marco Teórico .....	1
1.1 Introducción .....	2
1.2 Descripción del Problema .....	2
1.3 Justificación del Problema .....	3
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 Objetivo general .....	4
1.4.2 Objetivos específicos .....	4
1.5 Marco teórico .....	4
Capítulo 2: Metodología.....	14
2.1 Metodología de diseño.....	15
2.2 Requerimiento de diseño .....	18
2.3 Alternativas de solución.....	18
2.3.1 Alternativas para techo .....	18
2.3.2 Alternativas para pared.....	20
2.3.4 Alternativas de ventanas.....	22
2.4 Matriz de decisión.....	24
2.4.1 Matriz de decisión de alternativas para techo.....	24
2.4.2 Matriz de decisión de alternativas para paredes .....	26
2.4.3 Matriz de decisión de alternativas para ventanas .....	27
2.5 Diseño detallado de solución .....	28
2.5.1 Alternativa seleccionada para techo .....	28
2.5.2 Alternativa seleccionada para paredes.....	28
2.5.3 Alternativa seleccionada para ventanas.....	29
2.6 Diseño conceptual.....	29
Capítulo 3: Resultados .....	36
3.1 Resultados.....	37

Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones.....	61
4.1. Conclusiones.....	62
4.2. Recomendaciones.....	63
Referencias.....	64
Apéndice.....	67
Apéndice 1.....	67
Apéndice 2.....	74

## ***Índice de figuras***

Figura 1 <i>Carta psicométrica con zonas de confort identificadas</i> .....	9
Figura 2 <i>Diagrama de flujo de metodología de trabajo</i> .....	17
Figura 3 <i>Paneles de poliuretano</i> .....	19
Figura 4 <i>Tejas de arcilla</i> .....	19
Figura 5 <i>Techo frio Uniteja</i> .....	20
Figura 6 <i>Construcción con Hormi2</i> .....	21
Figura 7 <i>Bloques de adobe</i> .....	21
Figura 8 <i>Botellas con arena</i> .....	22
Figura 9 <i>Ventana con vidrio simple</i> .....	23
Figura 10 <i>Ventana con vidrio de baja emisividad (Low E)</i> .....	23
Figura 11 <i>Vidrio de doble acristalamiento</i> .....	24
Figura 12 <i>Modelo de casa sostenible de muestra ubicada en campus ESPOL Prosperina</i> ....	29
Figura 13 <i>Modelo CAD de vivienda VIS utilizado</i> .....	31
Figura 14 <i>Modelo de vivienda de interés social</i> .....	32
Figura 15 <i>Implantación de vivienda modelo utilizada</i> .....	33
Figura 16 <i>Temperatura interior en vivienda rural prototipo</i> .....	34
Figura 17 <i>Variación de NMBE Vs el cambio de coeficiente de conductividad térmica</i> .....	39
Figura 18 <i>Variación de CV(RMSE) Vs Coeficiente de conductividad térmica</i> .....	40
Figura 19 <i>Ubicación de las sondas para medición de temperatura de superficie interior</i> ....	41
Figura 20 <i>Ubicación de radio sonda para medición de temperatura exterior con equipo Testo 635</i> .....	41
Figura 21 <i>Medición de temperatura y transmitancia con equipo Testo 635</i> .....	42
Figura 22 <i>Datos obtenidos mediante la medición de transmitancia con equipo Testo 635</i> ....	43
Figura 23 <i>Comportamiento térmico de zona climática utilizada</i> .....	45
Figura 24 <i>Grafica comparativa en techos de horas de confort con las diferentes alternativas</i> .....	46
Figura 25 <i>Grafica comparativa en paredes de horas de confort con las diferentes alternativas</i> .....	48
Figura 26 <i>Grafica comparativa en ventanas de horas de confort con las diferentes alternativas</i> .....	50
Figura 27 <i>Comparativo de horas de confort en vivienda de interés social y vivienda con medidas de eficiencia energética</i> .....	53

Figura 28 Carta psicométrica de vivienda con alternativas de eficiencia implementadas.....	54
Figura 29 Temperatura de aire interior de vivienda de interés social.....	55
Figura 30 Temperatura de aire interior de vivienda con alternativas de eficiencia.....	56
Figura 31 Temperatura de aire interior de vivienda de interés social con sistema HVAC .....	57
Figura 32 Tiempo de retorno de inversión.....	60
Figura 33 Comparación costo – beneficio de alternativas de solución .....	60

### **Índice de tablas**

Tabla 1 Tasa metabólica promedio según actividad física.....	7
Tabla 2 Aislamiento térmico por tipo de ropa promedio .....	8
Tabla 3 Diferentes valores en invierno y verano .....	10
Tabla 4 Parámetros y ponderación de selección de alternativas para techo .....	24
Tabla 5 Valoración de alternativas de selección para techos .....	25
Tabla 6 Valores de alternativas para techos ponderadas respecto a los parámetros .....	25
Tabla 7 Parámetros y ponderación de selección de alternativas para paredes .....	26
Tabla 8 Valoración de alternativas de selección para paredes .....	26
Tabla 9 Valores de alternativas para paredes ponderadas respecto a los parámetros.....	26
Tabla 10 Parámetros y ponderación de selección de alternativas para ventanas.....	27
Tabla 11 Valoración de alternativas de selección para ventanas .....	27
Tabla 12 Valores de alternativas para ventanas ponderadas respecto a los parámetros .....	28
Tabla 13 Porcentaje de error en temperatura ambiente medida en sitio vs simulada .....	37
Tabla 14 Porcentaje de error en temperatura ambiente de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto José Joaquín de Olmedo vs simulada.....	38
Tabla 15 Porcentaje de error en temperatura interior medida en sitio vs simulada.....	38
Tabla 16 Variación de los valores NMBE y CV(RMSE) Vs el cambio de coeficiente de conductividad térmica.....	39
Tabla 17 Valores promedio en rango estable de temperaturas y transmitancia .....	43
Tabla 18 Cantidad de horas de confort anuales modificando alternativas de techo.....	46
Tabla 19 Cantidad de horas de confort anuales de alternativas de pared .....	48
Tabla 20 Cantidad de horas de confort anuales modificando alternativas de ventana.....	50
Tabla 21 Comparativo de horas de confort en modelo y con medidas de eficiencia energética .....	52

Tabla 22 *Aproximando de las horas de confort en el modelo de vivienda de interés social y modelo con medidas de eficiencia energética*.....56



## **Capítulo 1: Introducción, Objetivos y Marco Teórico**

## **1.1 Introducción**

Ecuador tiene una amplia variedad de climas, sin embargo, un 54% de su población vive en climas cálidos y húmedos. Las viviendas ubicadas en estas zonas climáticas dependen de diferentes métodos para mantener un confort térmico en los hogares, ya sea implementando sistemas de climatización o modificando la estructura del hogar para poder obtener un mejor confort térmico. Pero muchas familias enfrentan dificultades para acceder a estas condiciones que puedan brindarles el confort térmico adecuadas en sus viviendas.

Especialmente en las zonas rurales donde los recursos materiales y energéticos pueden ser limitados. Esta población rural en el Ecuador hasta el 2020 representa el 36 %, 1/3 del total de población ecuatoriana. Para poder obtener confort térmico se debe tener en cuenta los factores que influyen en su obtención. Como lo son la tasa metabólica, aislamiento de ropa, temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire y humedad, como lo define el estándar ASHRAE 55.

Este proyecto está centrado en el diseño de medidas de eficiencia energéticas para mejorar el confort térmico en viviendas sostenibles en la zona rural de Ecuador. Basándose en el comportamiento del material utilizado en la construcción de viviendas sostenibles y aplicándolas en una infraestructura comúnmente utilizada en la zona rural, mediante simulaciones realizadas en Grasshopper de Rhino, se observará el comportamiento dentro de la vivienda y así encontrar la solución más factible técnica y económicamente para aplicar.

## **1.2 Descripción del Problema**

La problemática se centra en la necesidad de garantizar un ambiente interior confortable a un costo asequible en las viviendas rurales de Ecuador. La sostenibilidad

añade una capa adicional de complejidad, ya que implica encontrar soluciones que sean ambientalmente responsables y económicamente viables a largo plazo. En contextos rurales, donde los recursos materiales y energéticos pueden ser limitados, el diseño y la construcción de viviendas deben adaptarse para proporcionar confort térmico sin comprometer la sostenibilidad. Los materiales utilizados, la configuración y diseño son unos de los principales causantes de no poder obtener un ambiente con confort térmico aceptable. Estos factores pueden generar cargas térmicas, deficiente circulación de aire, lo que finalmente produce desconfort térmico.

### **1.3 Justificación del Problema**

En las zonas rurales de Ecuador, muchas familias enfrentan dificultades para acceder a condiciones de confort térmico adecuadas en sus viviendas debido a limitaciones económica. De forma similar la pobreza energética es un problema común en estas áreas, donde las familias pueden tener dificultades para costear el uso de energía para su uso en climatización de sus viviendas. Al implementar medidas de eficiencia energética que reduzcan el consumo de energía, se ayuda a mitigar este problema al hacer que el confort térmico sea más asequible. Las medidas de eficiencia energética no solo mejoran el confort térmico, sino que también pueden generar ahorros significativos a largo plazo al reducir los costos de energía. Así también ayuda a reducir la huella ambiental al disminuir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto contribuye a la conservación del medio ambiente y al cumplimiento de los compromisos de Ecuador en materia de sostenibilidad y cambio climático. Al implementar las medidas de eficiencia energética asequibles permitirá que estas familias mejoren su calidad de vida sin incurrir en costos prohibitivos.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Diseñar medidas de eficiencia energética con un costo asequible para comunidades rurales de Ecuador para la mejora de confort térmico.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Recopilar bibliografía sobre rangos de confort térmico en el ámbito rural.
- Analizar confort térmico en una vivienda construida con materiales sostenibles.
- Analizar técnica y económicamente medidas de eficiencia energética.

## **1.5 Marco teórico**

De manera introductoria se analizaron diferentes proyectos, casos de estudio y normas que hacen referencia al confort térmico y sostenibilidad en viviendas y edificaciones, demostrando el interés en la mejora de confort térmico y eficiencia energética con el menor impacto negativo a nivel económico, social y ambiental. La American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) define confort térmico como la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico y es valorada mediante evaluación subjetiva. (ASHRAE55-Version2017, n.d.)

La mente consciente obtiene conclusiones del confort térmico a partir de las sensaciones de temperatura y humedad en la piel, temperaturas corporales profundas y esfuerzos para regular la temperatura corporal, el confort térmico se produce cuando la temperatura corporal se encuentra dentro de rangos, la humedad en la piel es baja y los esfuerzos de regulación se minimizan. El confort también depende de comportamientos que inician de forma consciente o inconsciente, que son guiadas por sensaciones térmicas

y de humedad para reducir el malestar. (Comment Help Main Menu Commercial Resources ASHRAE Bookstore, 2017)

El confort es una forma en la que se puede medir cuan satisfechos están los ocupantes, a su vez puede afectar a la concentración y productividad de las personas, puede depender de factores como el tipo de ropa que se usa, el nivel y el tipo de actividad que se realiza, el entorno físico en el que se encuentra la persona y si hay otras personas alrededor y espacios que se encuentran cercanos. Lo mejor que se puede esperar lograr es satisfacer al 80% de los ocupantes.(Indoor Air Quality Handbook A Practical Guide to Indoor Air Quality Investigations, 2003)

Se deben considerar seis factores al momento de definir las condiciones para tener un confort térmico aceptable: tasa metabólica, aislamiento de ropa, temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad de aire y humedad. (ASHRAE55-Version2017, n.d.)

Una persona se puede sentir cómoda térmicamente en su totalidad, sin embargo, puede sentirse incomoda si alguna parte de su cuerpo se siente demasiado caliente o muy fría, estas uniformidades pueden ser causa de una ventana por la que ingresa aire frío, una superficie caliente, una corriente de aire o es unas variaciones de estas. Inclusive con pequeños cambios en el flujo de calor hace que el sistema de regulación térmica se compense, aumentando el esfuerzo fisiológico para mantener la temperatura corporal. (Comment Help Main Menu Commercial Resources ASHRAE Bookstore, 2017)

Además de las variables ambientales y personales, factores como la falta de uniformidad en el medio ambiente, estímulos visuales, edad y clima exterior. (Comment Help Main Menu Commercial Resources ASHRAE Bookstore, 2017)

Para conocer las condiciones óptimas para el confort y la salud, se debe conocer el ritmo de trabajo realizado durante actividades físicas, porque la potencia metabólica

aumenta con el aumento de la intensidad del ejercicio, la tasa metabólica varia en un amplio rango, la siguiente tabla muestra las medidas de un adulto promedio para actividades físicas. (Comment Help Main Menu Commercial Resources ASHRAE Bookstore, 2017)

**Tabla 1***Tasa metabólica promedio según actividad física*

	W/m <sup>2</sup>	met*
<b>Resting</b>		
Sleeping	40	0.7
Reclining	45	0.8
Seated, quiet	60	1.0
Standing, relaxed	70	1.2
<b>Walking (on level surface)</b>		
3.2 km/h (0.9 m/s)	115	2.0
4.3 km/h (1.2 m/s)	150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s)	220	3.8
<b>Office Activities</b>		
Reading, seated	55	1.0
Writing	60	1.0
Typing	65	1.1
Filing, seated	70	1.2
Filing, standing	80	1.4
Walking about	100	1.7
Lifting/packing	120	2.1
<b>Driving/Flying</b>		
Car	60 to 115	1.0 to 2.0
Aircraft, routine	70	1.2
Aircraft, instrument landing	105	1.8
Aircraft, combat	140	2.4
Heavy vehicle	185	3.2
<b>Miscellaneous Occupational Activities</b>		
Cooking	95 to 115	1.6 to 2.0
Housecleaning	115 to 200	2.0 to 3.4
Seated, heavy limb movement	130	2.2
<b>Machine work</b>		
sawing (table saw)	105	1.8
light (electrical industry)	115 to 140	2.0 to 2.4
heavy	235	4.0
Handling 50 kg bags	235	4.0
Pick and shovel work	235 to 280	4.0 to 4.8
<b>Miscellaneous Leisure Activities</b>		
Dancing, social	140 to 255	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	175 to 235	3.0 to 4.0
Tennis, singles	210 to 270	3.6 to 4.0
Basketball	290 to 440	5.0 to 7.6
Wrestling, competitive	410 to 505	7.0 to 8.7

Sources: Compiled from various sources. For additional information, see Buskirk (1960), Passmore and Durnin (1967), and Webb (1964).

\*1 met = 58.1 W/m<sup>2</sup>

Las formas para determinar el aislamiento de la ropa son mediciones en maniqués calentado, debido a que el aislamiento térmico de la ropa no se puede medir para la

mayoría de las aplicaciones de ingeniería, se presenta una tabla con diferentes valores de aislamiento de diferente ropa. (Comment Help Main Menu Commercial Resources ASHRAE Bookstore, 2017)

**Tabla 2**

*Aislamiento térmico por tipo de ropa promedio*

Ensemble Description <sup>a</sup>	$I_{cl}$ <sup>a</sup> clo	$I_{tr}$ <sup>b</sup> clo	$f_{cl}$	$i_{cl}$	$i_m$ <sup>b</sup>
Walking shorts, short-sleeved shirt	0.36	1.02	1.10	0.34	0.42
Trousers, short-sleeved shirt	0.57	1.20	1.15	0.36	0.43
Trousers, long-sleeved shirt	0.61	1.21	1.20	0.41	0.45
Same as above, plus suit jacket	0.96	1.54	1.23		
Same as above, plus vest and T-shirt	1.14	1.69	1.32	0.32	0.37
Trousers, long-sleeved shirt, long-sleeved sweater, T-shirt	1.01	1.56	1.28		
Same as above, plus suit jacket and long underwear bottoms	1.30	1.83	1.33		
Sweat pants, sweat shirt	0.74	1.35	1.19	0.41	0.45
Long-sleeved pajama top, long pajama trousers, short 3/4 sleeved robe, slippers (no socks)	0.96	1.50	1.32	0.37	0.41
Knee-length skirt, short-sleeved shirt, panty hose, sandals	0.54	1.10	1.26		
Knee-length skirt, long-sleeved shirt, full slip, panty hose	0.67	1.22	1.29		
Knee-length skirt, long-sleeved shirt, half slip, panty hose, long-sleeved sweater	1.10	1.59	1.46		
Same as above, replace sweater with suit jacket	1.04	1.60	1.30	0.35	0.40
Ankle-length skirt, long-sleeved shirt, suit jacket, panty hose	1.10	1.59	1.46		
Long-sleeved coveralls, T-shirt	0.72	1.30	1.23		
Overalls, long-sleeved shirt, T-shirt	0.89	1.46	1.27	0.35	0.40
Insulated coveralls, long-sleeved thermal underwear, long underwear bottoms	1.37	1.94	1.26	0.35	0.39

Source: From McCullough and Jones (1984) and McCullough et al. (1989).

<sup>a</sup>All ensembles include shoes and briefs or panties. All ensembles except those with panty hose include socks unless otherwise noted.

<sup>b</sup>For  $t_r = t_a$  and air velocity less than 0.2 m/s ( $I_a = 0.72$  clo and  $i_m = 0.48$  when nude).  
1 clo = 0.155 (m<sup>2</sup>·K)/W.

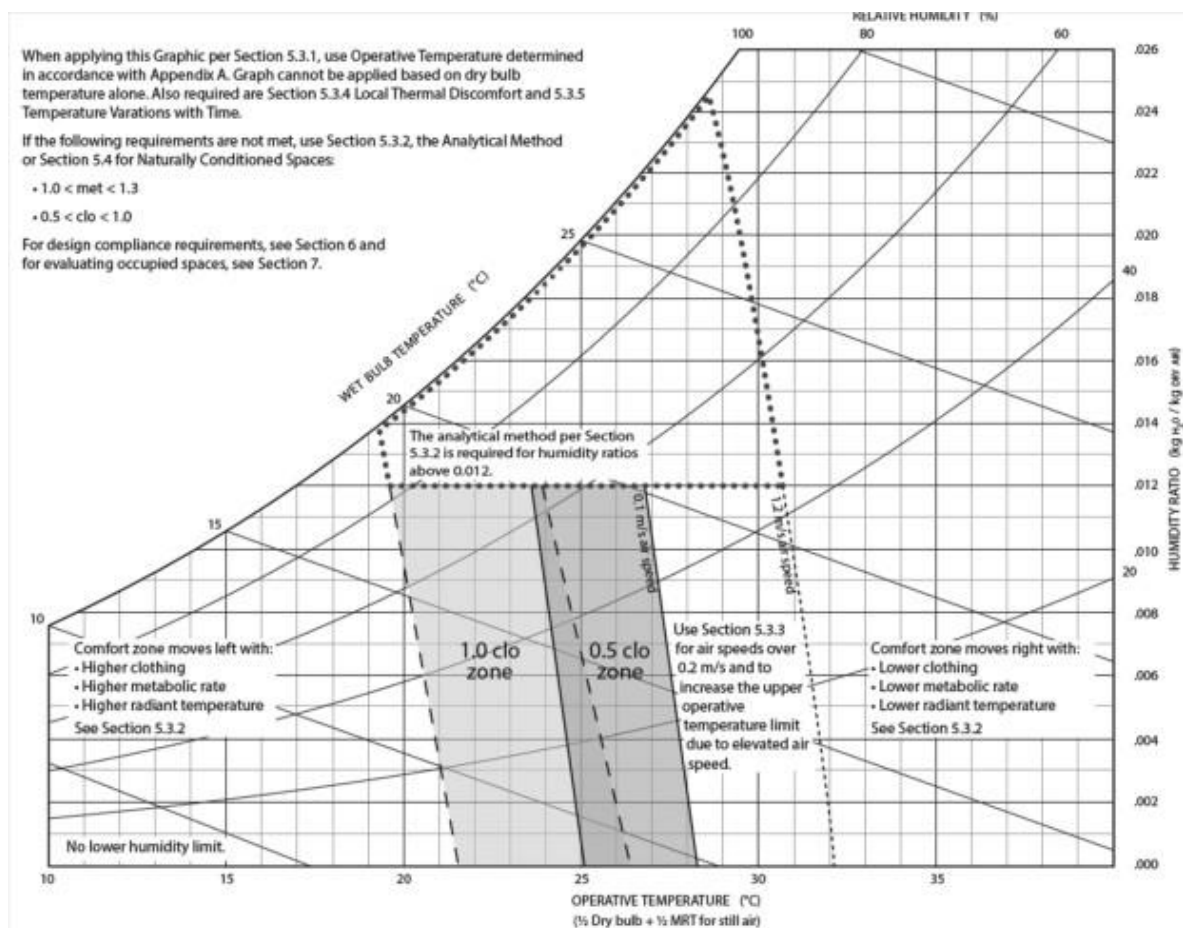
El grafico de la zona de confort está limitado para tasas metabólicas entre 1.0 y 1.3 met, y aislamiento térmico entre 0.5 y 1.0 clo. (Comment Help Main Menu Commercial Resources ASHRAE Bookstore, 2017)



En la figura 1, la región que comprende el valor de 1 clo del aislamiento de ropa se encuentra a la izquierda de la carta psicrométrica en la carta psicrométrica, este valor indica un mayor número de prendas de vestir con lo cual la persona está más cubierta, mientras que a la derecha de se encuentra la región con 0.5 clo de aislamiento de ropa, lo cual indica que la persona esta menos cubierta.

**Figura 1**

*Carta psicrométrica con zonas de confort identificadas*



En la tabla 3 se muestran valores de aislamiento de ropa típicos para las temporadas de invierno y verano, en la temporada de invierno se usa típicamente 0.9 clo

de aislamiento de ropa, en la temporada de verano se usa típicamente 0.5 clo de aislamiento de ropa, en verano las temperaturas son mayores que el invierno.

**Tabla 3**

*Diferentes valores en invierno y verano*

	Typical clothing insulation, clo	Optimum operative temperature	Indoor design temperature range
Winter	0.9	71°F (22°C)	69–74°F (20.5–23.5°C)
Summer	0.5	76°F (24.5°C)	74–79°F (23.5–26°C)

Además de los factores antes mencionados que afectan al confort térmico, hay otros que son secundarios e influyen en el confort térmico, las variaciones del día a día, la edad, adaptación al entorno, sexo de la persona y ritmos estacionales. (Comment Help Main Menu Commercial Resources ASHRAE Bookstore, 2017)

Los propietarios realizan ampliaciones por cuenta propia, sin considerar los códigos de construcción ni las normativas municipales, que rara vez se cumplen. Estos problemas afectan de manera significativa su bienestar y calidad de vida.(Bouillon, n.d.)

Estas viviendas suelen estar construidas con materiales como bambú o tierra en las paredes (adobe, bahareque y tapial), pisos sin terminar de cemento, madera o piedra, y techos hechos de palma, paja o lona.(Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2006)

Los materiales comúnmente usados en las viviendas rurales son bloques de concreto hueco y adobe en las paredes, y tejas y zinc en los techos. Estos materiales corresponden a los dos principales tipos de vivienda práctica en la región rural de los Andes. El primero es un sistema de construcción liviano sin aislamiento (bloques de concreto hueco para las paredes y techos de zinc), y el segundo es un modelo de

arquitectura tradicional con masa térmica expuesta (paredes de bloques de tierra y techos de tejas).(Miño-Rodríguez et al., 2016)

La importancia de mejorar la calidad del ambiente interior está vinculada a la reducción de problemas de salud y al aumento del bienestar de los habitantes. En consecuencia, esto proporciona beneficios para la salud de las personas y ventajas económicas para la sociedad.(Miño-Rodríguez et al., 2016)

Un caso de estudio realizado en Zumbahua, una parroquia rural de la provincia de Cotopaxi, en la cual hay dos estaciones, invierno y verano, se seleccionaron dos viviendas para el caso de estudio, el Caso A es una casa hecha con bloques de Adobe, y el Caso B corresponde a una vivienda común sin aislamiento construida con bloques de concreto y techo de zinc.(Miño-Rodríguez et al., 2016)

El rango de temperatura del exterior en esa zona es de 1.9 [°C] a 16.5 [°C], en el Caso A de la vivienda construida con Adobe el rango de temperatura interior es de 6.3 [°C] a 16.4 [°C], en el Caso B de la vivienda construida con bloques de concreto el rango de temperatura interior es de 5.2 [°C] a 20 [°C], el caso A muestra estabilidad térmica con una reducción de 4.7 [°C] en la oscilación de la temperatura.(Miño-Rodríguez et al., 2016)

Esto significa que la temperatura exterior tiene más efecto en la temperatura interior de una vivienda sin aislamiento.(Miño-Rodríguez et al., 2016)

La ciudad de Portoviejo posee humedad relativa alta durante todo el año, posee dos estaciones, una lluviosa conocida como invierno, la cual esta comprendida entre los meses de enero a abril, otra estación es la seca la cual comprende los meses de mayo a diciembre.(Véliz-Párraga & González-Couret, 2019)

Los valores mínimos y máximos de temperatura de esta zona están comprendida entre 19 [°C] a 34 [°C], sin embargo, se ha verificado que los valores de temperatura del aire en zonas urbanas son más altos a los registrados.(Véliz-Párraga & González-Couret, 2019)

Uno de los proyectos trata del análisis del comportamiento térmico del techo zinc en viviendas dominicanas, que estudia comparando el comportamiento de las cubiertas de acero galvanizado y diferentes soluciones para disminuir la transmisión de calor, lo que mejoraría el confort térmico de los usuarios en la vivienda. Realizando como primer paso una recopilación bibliográfica de investigaciones en el campo de transferencia de calor a través de cerramientos y de mejoras del comportamiento térmico aplicadas, luego de seleccionar las estrategias de aislamiento y protección térmica disponibles, se adecuó un modelo de cálculo para el estudio mediante la recopilación de datos e información necesaria para el análisis de los diferentes casos a plantear. (Díaz, 2012)

En Colombia se hizo un análisis del comportamiento térmico de las envolventes de las viviendas VIS en Tunja enfocado en tecnologías limpias, que se centraba en analizar el comportamiento térmico de las viviendas VIS (vivienda de interés social) obteniendo cargas térmicas con las que evaluaron diferentes estrategias de control térmico para generar recomendaciones de diseño en estas viviendas. Respondiendo a las preguntas relacionadas con confort térmico, eficiencia energética, VIS y tecnologías limpias. (Giraldo-Castañeda et al., 2021)

Otro caso relevante presentado en el congreso brasileño de energía solar, con el tema "Análisis térmico y recomendaciones para el diseño de casas solares pasivas y la difusión de viviendas sostenibles", el cual se centra en las casas solares pasivas como una

estrategia para mejorar las condiciones de confort térmico en viviendas sustentables en la región de central de Chile. El cual centro su metodología de investigación en las simulaciones térmicas de una vivienda unifamiliar de dimensiones típicas con el programa DEROB-LTH de la Universidad de Lund (Suecia), usando datos climáticos preparados con una metodología propia y las condiciones de confort térmico fueron definidos por grados-horas diarios de calor. (Comelles Filardi, n.d.)

## **Capítulo 2: Metodología**

## 2.1 Metodología de diseño

La metodología de diseño utilizada para obtener una mejora en el confort térmico en viviendas sostenibles en zonas rurales de Ecuador está dividida en diferentes etapas importantes. A continuación, detallaremos cada una de las etapas:

**Identificación del Problema:** Como fase inicial, se realiza una investigación de las condiciones actuales de las viviendas en las zonas rurales, identificando los principales factores que afectan el confort térmico dentro de una vivienda.

**Modelo CAD de una Vivienda Sostenible Modelo:** Se procede a realizar un modelo en CAD (diseño asistido por computadora) de una vivienda fabricada con materiales sostenibles que nos servirá como base para las simulaciones y análisis posteriores.

**Simulación del Modelo con Materiales Sostenibles:** Utilizando el modelo CAD, se realiza una simulación utilizando diferentes materiales hasta obtener un comportamiento similar al material de la vivienda sostenible, para luego evaluar el impacto en el confort térmico de la vivienda.

**Requerimientos de Diseño:** Se establecen los requisitos de selección del diseño basado en factores que afecten la aplicación de estos.

**Alternativas de Solución:** Se generan diferentes alternativas de solución que satisfagan los requerimientos de diseño establecidos.

**Matriz de Decisión:** Estableciendo una ponderación a los requerimientos de diseño dependiendo del impacto que tengan en la aplicación, se realizó una matriz de decisión para evaluar y comparar las diferentes alternativas de solución.

**Modelo CAD de Vivienda Sostenible Aplicando la Alternativa de Solución:** Con la información investigada, se generó un nuevo modelo CAD de una vivienda estándar de la zona rural.

**Simulación del Modelo Aplicando la Alternativa de Solución:** Utilizando el nuevo modelo CAD se realiza una nueva simulación para evaluar la efectividad de la alternativa de solución en términos de confort térmico.

**Resultado Satisfactorio:** Si los resultados de la simulación son satisfactorios y cumplen con los objetivos de diseño establecidos, se define como la solución final. Si no, se itera nuevamente mediante fases anteriores para obtener una solución satisfactoria.

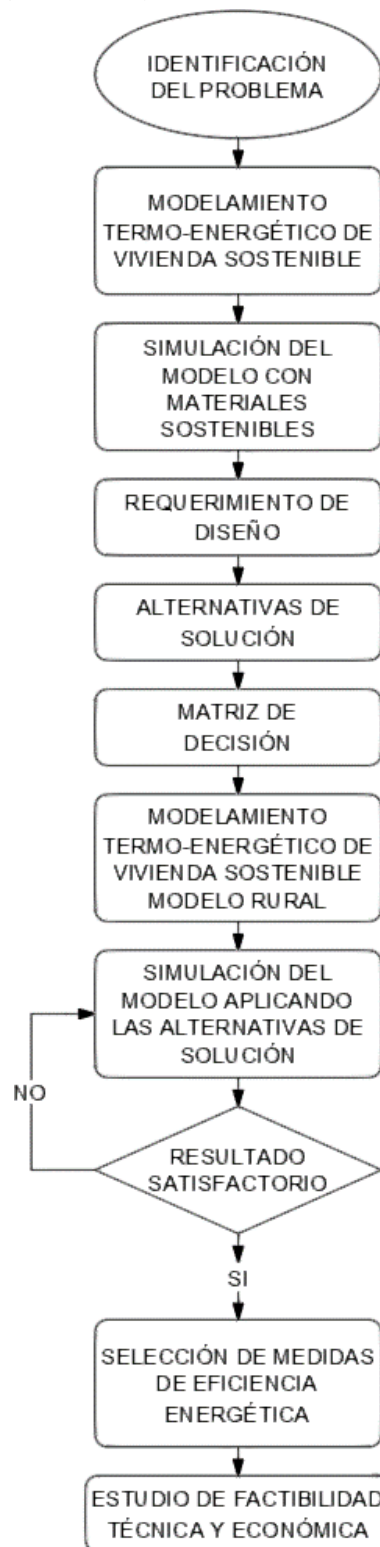
**Diseño de Medidas de Eficiencia Energética:** Se detallan las medidas de eficiencia energética específicas que se implementarán en la vivienda sostenible, basadas en los resultados de las simulaciones y el análisis de las alternativas de solución.

**Estudio de Factibilidad Técnica y Económica:** Finalmente, se realiza un estudio de factibilidad técnica y económica para asegurar que las medidas de eficiencia energética propuestas sean viables y sostenibles en el contexto rural de Ecuador.



**Figura 2**

*Diagrama de flujo de metodología de trabajo*



## 2.2 Requerimiento de diseño

**Costo:** La solución debe ser económicamente accesible, se deben priorizar las soluciones que sean de bajo costo para que esta forma la solución tenga un mayor alcance de usuarios, sobre todo los de bajos recursos económicos.

**Mantenimiento:** Se deben optar por soluciones que requieran un mantenimiento mínimo, la alternativa de solución debe estar orientada a tener una vida útil prolongada, reduciendo así la necesidad de intervenciones frecuentes y asegurando una operación continua.

**Instalación:** La forma en la que se instala no debe ser compleja, no se debe requerir de equipos avanzados y el trabajo debe poder ser realizado por una persona.

**Vida útil:** Se debe garantizar que la solución tenga una larga vida útil para asegurar el confort térmico,

## 2.3 Alternativas de solución

### 2.3.1 Alternativas para techo

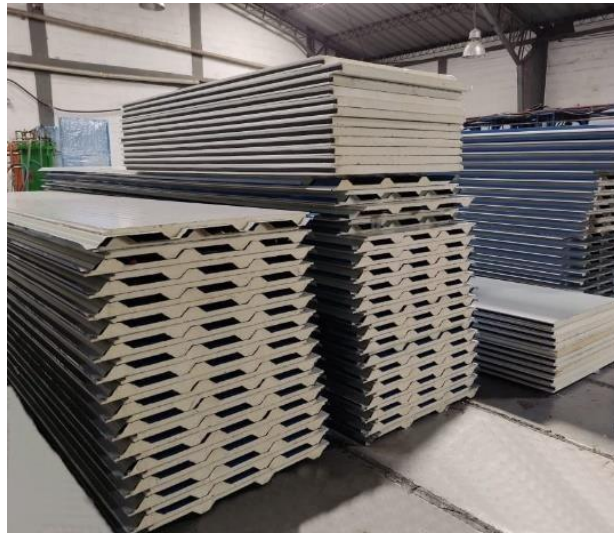
Como la superficie en una vivienda rural con mayor transmisión térmica es el techo, las posibles medidas a aplicar para disminuir esta transmitancia y mejorar el confort térmico dentro de la vivienda se aplicarían en el techo.

#### 2.3.1.1 Alternativa A: Paneles de poliuretano

Los paneles se los ubican en las paredes del lugar que se vaya a proteger térmicamente, consiste de un núcleo de espuma rígida de poliuretano, está revestido con materiales de lámina de acero o aluminio que protegen al poliuretano, el poliuretano posee un bajo coeficiente de conductividad térmica que minimiza las pérdidas de calor de la vivienda.

**Figura 3**

*Paneles de poliuretano*



#### **2.3.1.2 Alternativa B: tejas de arcilla**

Son piezas cerámicas elaboradas a partir de arcilla, que se moldean y luego se cocinan a altas temperaturas. Este proceso de cocción les confiere una gran dureza, resistencia y durabilidad. Se utilizan principalmente como elemento de cobertura en techos inclinados, protegiendo las edificaciones de las inclemencias del tiempo como la lluvia, el granizo y los fuertes vientos.

**Figura 4**

*Tejas de arcilla*



### 2.3.1.3 Alternativa C: Techos fríos

El techo frío refleja la luz solar y absorbe menos calor que un techo común utilizado en viviendas, su aplicación en color blanco nos permite aprovechar la propiedad de este color y se pueda reflejar la mayor parte de la luz solar, las ventajas de los techos fríos son que ayudan a minimizar la transferencia de calor al interior de la vivienda, mejorar el confort térmico en espacios no climatizados, fácil aplicación. Las desventajas se encuentran que su desempeño tiende a disminuir con la acumulación de polvo y otros contaminantes, se necesita mano de obra para la instalación.

#### Figura 5

Techo frío Uniteja



### 2.3.2 Alternativas para pared

#### 2.3.2.1 Alternativa A: Hormi2

El sistema constructivo industrializado propuesto incluye un panel de Poliestireno Expandido (EPS) ondulado, reforzado con mallas de acero galvanizado de alta resistencia electrosoldadas. Estas mallas están vinculadas entre sí y, al ser recubiertas con micro hormigón, forman un conjunto de paredes portantes.

**Figura 6**

*Construcción con Hormi2*



### **2.3.2.2 Alternativa B: Adobe**

El sistema constructivo industrializado propuesto incluye un panel de Poliestireno Expandido (EPS) ondulado, reforzado con mallas de acero galvanizado de alta resistencia electrosoldadas. Estas mallas están vinculadas entre sí y, al ser recubiertas con micro hormigón, forman un conjunto de paredes portantes.

**Figura 7**

*Bloques de adobe*



### **2.3.2.3 Alternativa C: Botellas con arena**

Las botellas llenas de arena representan una solución ingeniosa y ecológica para la construcción de viviendas. Se recogieron botellas de plástico que se rellenaban con arena para se colocaron las botellas de forma horizontal y se las agruparon para formar paredes que se aseguraban con mortero o cemento para proporcionar estabilidad estructural.

#### **Figura 8**

*Botellas con arena*



### **2.3.4 Alternativas de ventanas**

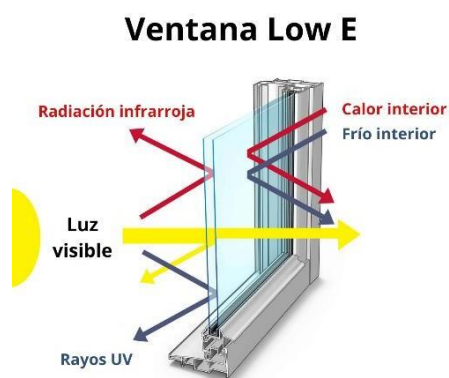
#### **2.3.4.1 Vidrio simple (6 mm), Alternativa A**

Las ventanas con vidrio simple son una opción popular debido a su bajo costo y fácil instalación. Están compuestas por un solo vidrio, ofrecen claridad y una estética minimalista, siendo ideales para espacios donde el aislamiento térmico y acústico no es esencial.



**Figura 9***Ventana con vidrio simple***2.3.4.2 Vidrio de baja emisividad (3mm), Alternativa B**

Las ventanas con vidrio de baja emisividad (Low E) están diseñadas para mejorar la eficiencia energética del hogar. Este tipo de vidrio cuenta con un revestimiento especial que refleja el calor, manteniéndolo dentro en invierno y fuera en verano. Además, bloquea los rayos UV. Son ideales para cualquier área del hogar donde se busca un mayor confort y eficiencia energética.

**Figura 10***Ventana con vidrio de baja emisividad (Low E)***2.3.4.3 Vidrio de doble acristalamiento (3mm), Alternativa C**

Consiste en dos o más láminas de vidrio separadas por una cámara de aire o gas inerte. Esta configuración proporciona un aislamiento térmico y acústico superior al del

vidrio simple, reduciendo significativamente las pérdidas de calor en invierno y las ganancias de calor en verano.

### **Figura 11**

*Vidrio de doble acristalamiento*



## **2.4 Matriz de decisión**

### ***2.4.1 Matriz de decisión de alternativas para techo***

Con los requerimientos de diseño definidos se procedió a realizar a la matriz de decisión, la ponderación de cada parámetro que se consideró para la evaluación de las alternativas de solución se las presenta en la siguiente Tabla 4.

**Tabla 4**

*Parámetros y ponderación de selección de alternativas para techo*

<b>Parámetros</b>	<b>Ponderación</b>
Costo	30%
Mantenimiento	10%
Instalación	20%
Vida útil	15%
Eficiencia	25%
<b>Total</b>	<b>100%</b>



Después se evaluó cada una de las alternativas de solución dándole una puntuación entre 1 y 10 a cada alternativa de solución respectivamente. Los resultados se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Valoración de alternativas de selección para techos*

<b>Parámetros</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
Costo	6	6	8
Mantenimiento	7	7	7
Instalación	7	5	8
Vida útil	9	8	7
Eficiencia	9	7	6
<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>33</b>	<b>36</b>

Después de haber calificado a cada alternativa con la puntuación, se realizó la ponderación de la calificación de cada alternativa con su respectiva ponderación designada en la tabla 4, los resultados se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Valores de alternativas para techos ponderadas respecto a los parámetros*

<b>Parámetros</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
Costo	1.8	1.8	2.4
Mantenimiento	0.7	0.7	0.7
Instalación	1.4	1.0	1.6
Vida útil	1.4	1.2	1.1
Eficiencia	2.3	1.8	1.5
<b>Total</b>	<b>7.5</b>	<b>6.5</b>	<b>7.3</b>

La alternativa que obtuvo el mayor puntaje en la matriz de decisión fue la Alternativa A, correspondiente a la alternativa de solución de paneles de poliuretano.

### 2.4.2 Matriz de decisión de alternativas para paredes

En la tabla 7 se muestra los parámetros considerados para evaluar a las alternativas de solución de paredes, con la respectiva ponderación de cada parámetro.

**Tabla 7**

*Parámetros y ponderación de selección de alternativas para paredes*

<b>Parámetros</b>	<b>Ponderación</b>
Costo	20%
Mantenimiento	15%
Instalación	15%
Vida útil	25%
Eficiencia	25%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

La matriz de decisión para la selección de paredes se muestra en la tabla 8, en la cual se evaluó cada alternativa con una puntuación del 1 al 10.

**Tabla 8**

*Valoración de alternativas de selección para paredes*

<b>Parámetros</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
Costo	8	6	6
Mantenimiento	8	6	8
Instalación	8	7	6
Vida útil	8	6	7
Eficiencia	7	6	8
<b>Total</b>	<b>39</b>	<b>31</b>	<b>35</b>

Luego de haber evaluado cada alternativa con su respectiva puntuación, se procedió a ponderar dicha calificación utilizando los pesos asignados en la tabla 7. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Valores de alternativas para paredes ponderadas respecto a los parámetros*

<b>Parámetros</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
Costo	1.6	1.2	1.2

Mantenimiento	1.2	0.9	1.2
Instalación	1.2	1.1	0.9
Vida útil	2.0	1.5	1.8
Eficiencia	1.8	1.5	2.0
<b>Total</b>	<b>7.8</b>	<b>6.2</b>	<b>7.1</b>

De la tabla 9 se puede observar que alternativa ganadora fue la alternativa A la cual es homi2.

### 2.4.3 Matriz de decisión de alternativas para ventanas

En la tabla 10 se muestra los parámetros y la ponderación de cada parámetro para realizar la selección de alternativa de ventana.

**Tabla 10**

*Parámetros y ponderación de selección de alternativas para ventanas*

<b>Parámetros</b>	<b>Ponderación</b>
Costo	20%
Mantenimiento	15%
Instalación	15%
Vida útil	20%
Eficiencia	30%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

En la tabla 11 se muestra la calificación de cada alternativa, se consideró calificar del 1 al 10 cada alternativa.

**Tabla 11**

*Valoración de alternativas de selección para ventanas*

<b>Parámetros</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
Costo	8	6	4
Mantenimiento	8	7	6
Instalación	8	8	7
Vida útil	7	8	8
Eficiencia	6	8	9
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>35</b>	<b>34</b>

Luego de haber realizado la evaluación de cada alternativa con su respectiva puntuación, se procedió a ponderar dicha calificación utilizando los pesos asignados en la tabla 10. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Valores de alternativas para ventanas ponderadas respecto a los parámetros*

<b>Parámetros</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
Costo	1.6	1.2	0.8
Mantenimiento	1.2	1.1	0.9
Instalación	1.2	1.2	1.1
Vida útil	1.4	1.4	1.6
Eficiencia	1.8	2.1	2.7
<b>Total</b>	<b>7.1</b>	<b>7.0</b>	<b>7.1</b>

La alternativa seleccionada para ventanas es la alternativa A que corresponde a vidrio simple de 6 mm.

## **2.5 Diseño detallado de solución**

### ***2.5.1 Alternativa seleccionada para techo***

Los resultados entregados por la matriz de decisión nos llevaron a seleccionar la alternativa A, techos de poliuretano. Los techos de poliuretano se destacan en aspectos de vida útil y eficiencia. Estas características aseguran un funcionamiento prácticamente sin problemas y una vida útil prolongada, lo que resulta en una solución más efectiva y eficiente a largo plazo.

### ***2.5.2 Alternativa seleccionada para paredes***

Al realizar la evaluación en la matriz de decisión de las diferentes alternativas para aplicar en paredes, la alternativa A, Hormi2, aunque la alternativa C presenta ligeramente mejor eficiencia, la alternativa A fue la de mayor puntuación destacando en los parámetros de costo, mantenimiento, instalación y vida útil.

### 2.5.3 Alternativa seleccionada para ventanas

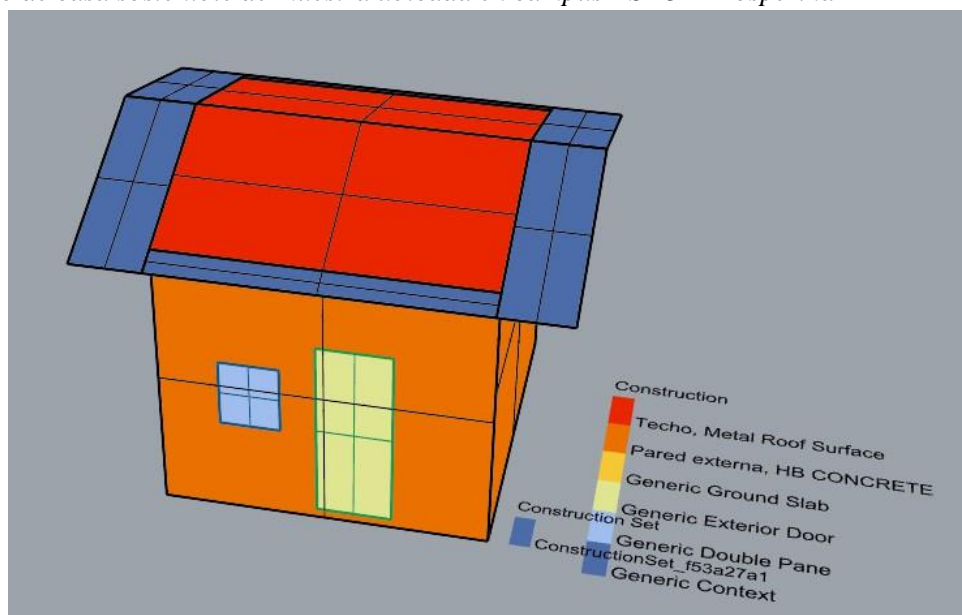
Se realizó la evaluación de las diferentes alternativas para ventanas en la matriz de decisión, la cual, la alternativa A, vidrio simple de 6 mm obtuvo la mejor puntuación, aunque su costo sea mayor al de una ventana de vidrio común, la capacidad de reflejar la radiación infrarroja y los rayos UV fueron factores que afectaron a llevarla como la opción a seleccionar.

### 2.6 Diseño conceptual

Para el diseño de las medidas de eficiencia energética se realizó el análisis energético de la casa a través del modelamiento de esta en el software Rhino3D, en el cual se simuló el comportamiento energético de la casa con la alternativa de solución seleccionada cargada en la simulación. En la figura 12 se muestra el modelo de la casa al cual se le realizó el análisis energético.

#### Figura 12

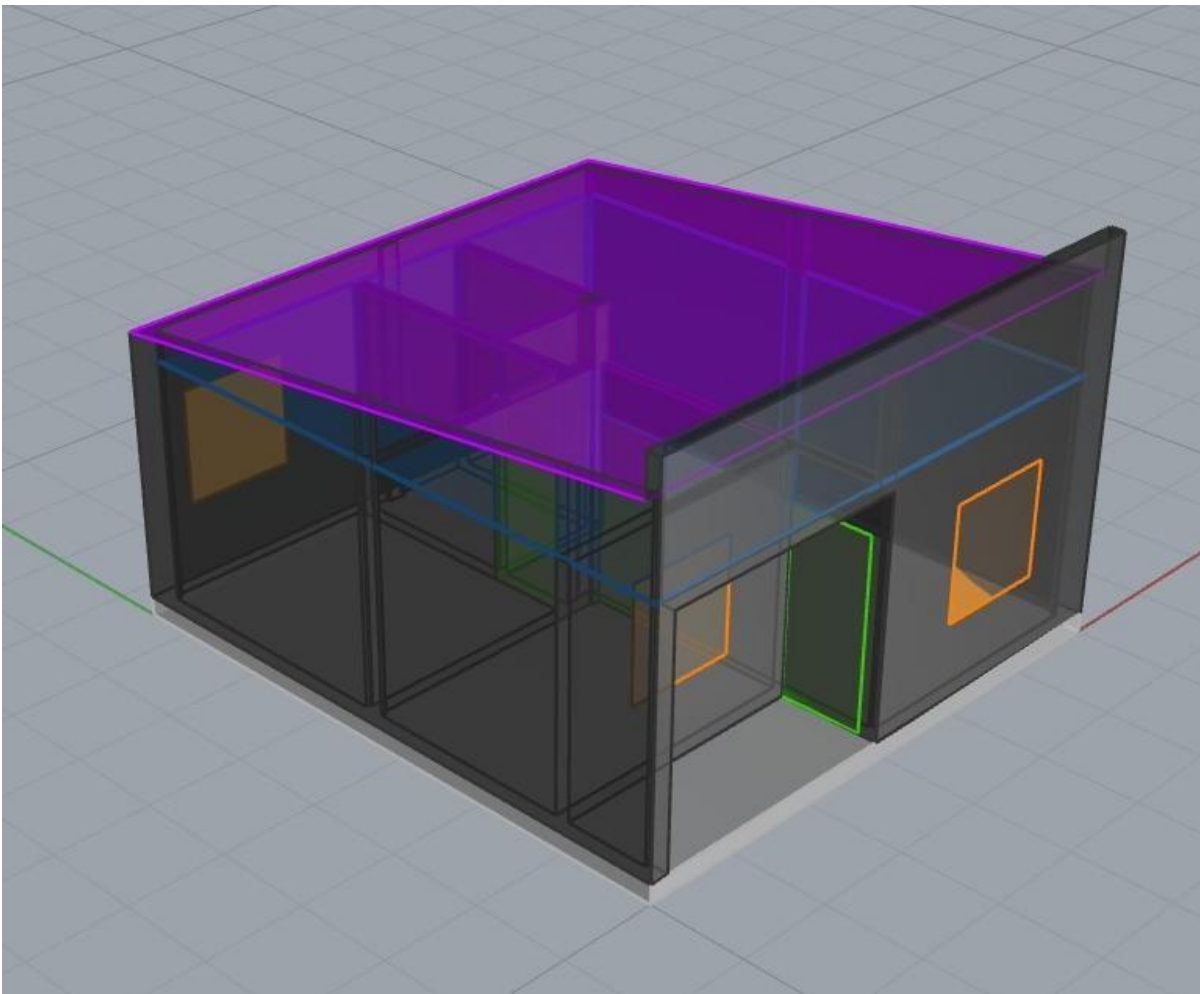
*Modelo de casa sostenible de muestra ubicada en campus ESPOL Prosperina*



El modelo utilizado para la simulación de confort térmico fue una Vivienda de Interés Social (VIS), estas viviendas VIS siguen un estándar de construcción uniforme, lo que representa una evaluación de las medidas de eficiencia energética más consistente. Las casas rurales varían enormemente en su diseño, técnicas de construcción y materiales, lo que no un diseño no representaría a una mayoría de la población de estudio. Estas viviendas VIS fueron pensadas y construidas en zonas urbanas y rurales. El modelo específico utilizado fue prototipo de vivienda de 39 m<sup>2</sup> del 2016 que el Ministerio de Desarrollo urbano y Vivienda (MIDUVI) implementó como programa de reconstrucción post-Sismo el Modelo de vivienda de interés social, en la figura 13 se observa el modelo CAD de la vivienda de interés social utilizada.

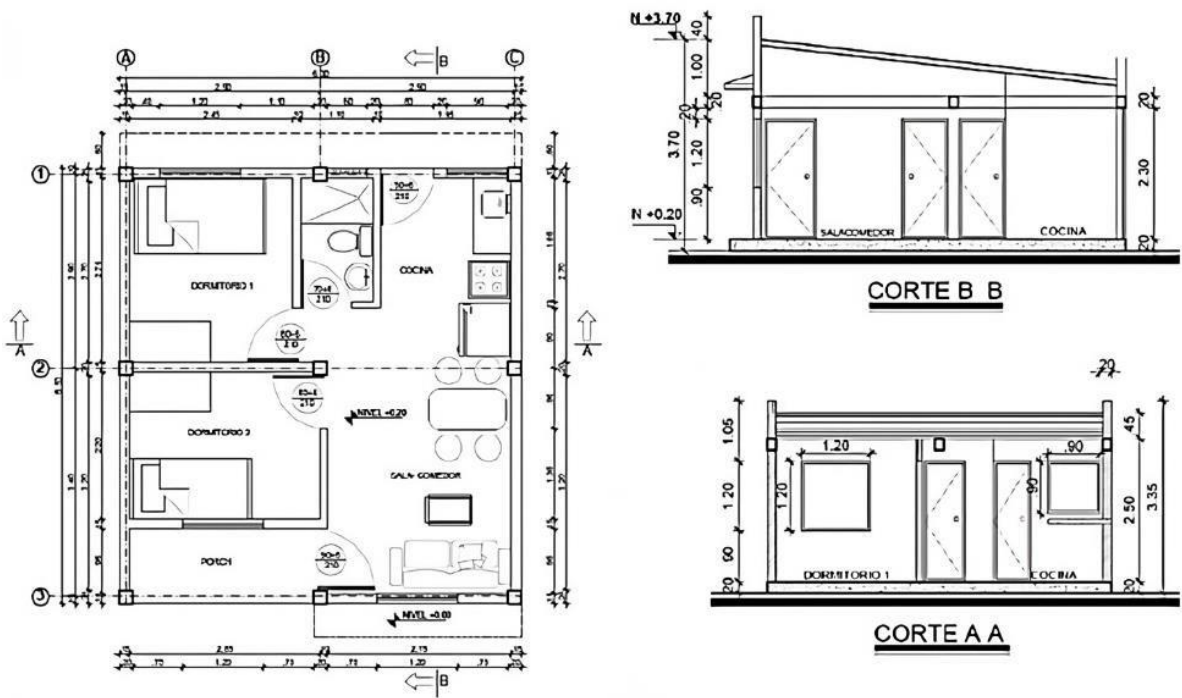
**Figura 13**

*Modelo CAD de vivienda VIS utilizado*

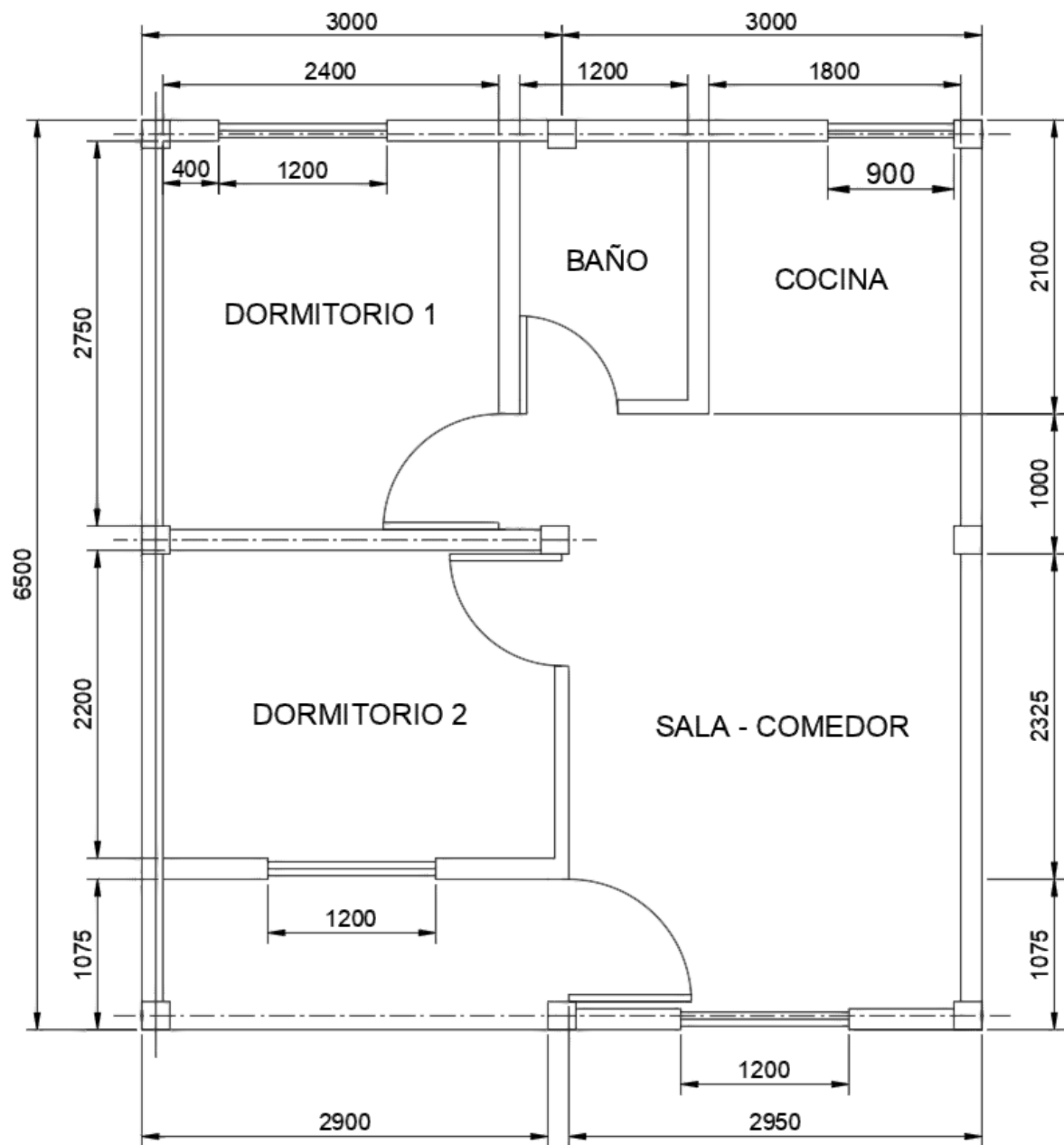


En la figura 14 y figura 15 se observan imágenes reales de la vivienda de interés social y los planos de estas viviendas, los cuales se los uso para realizar el modelo CAD de la figura 13.

**Figura 14**  
*Modelo de vivienda de interés social*



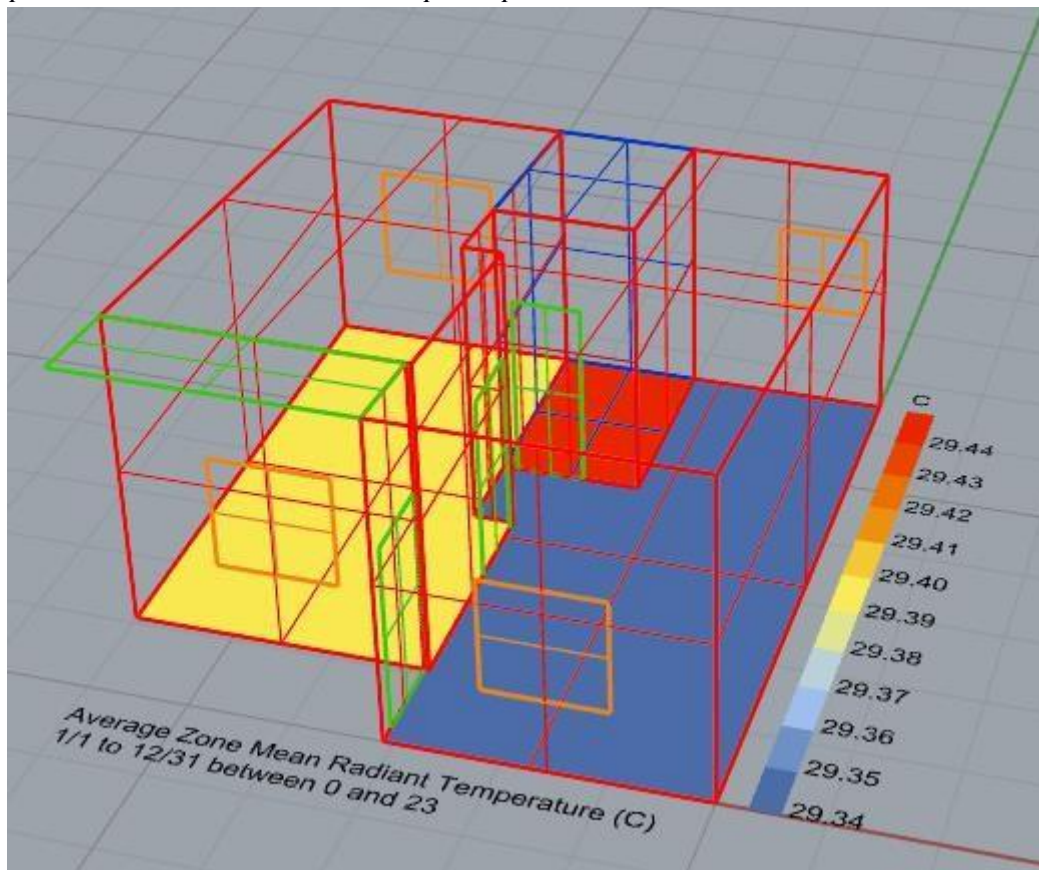


**Figura 15***Implantación de vivienda modelo utilizada*

En la figura 16 se muestra una imagen en perspectiva de la simulación energética de la vivienda de interés social, se decidió juntar ambos dormitorios en una sola zona, además la sala y la cocina se las juntaron en una sola zona, esto para agilidad en las simulaciones. En las simulaciones son enfocaremos en estas dos zonas ya que son las zonas en las que las personas pasan más tiempo y en las que por lo general la sensación de confort pueden notarse con más facilidad.

**Figura 16**

*Temperatura interior en vivienda rural prototipo*



### **Valores de construcción de paredes de vivienda BAU**

Los bloques utilizados convencionalmente en una vivienda son de dimensiones de 10 x 20 x 40 [mm], el área frontal del bloque es de 0.08 m<sup>2</sup>, conociendo el área de las paredes de la vivienda de 113.33[m<sup>2</sup>], información obtenida del modelo CAD, obtenemos la

cantidad de bloques necesarios para la construcción de vivienda 1417 bloques. El costo unitario de los bloques es de \$0.48, los que nos daría un valor de \$680.

Para la unión de los bloques se realiza el cálculo de la cantidad de material para el mortero en una mezcla de 1 parte de cemento y 4 de arena para  $1m^2$ . Comenzando con el número de bloques por  $m^2$ , teniendo la cantidad de bloques confirmamos la cantidad de juntas verticales y horizontales que hay en el arreglo, 13 en cada sentido, teniendo un área total de  $0.78 m^2$ . Asumiendo un espesor de 1 cm de mortero entre las juntas de los bloques, obtenemos el volumen y el con la proporción conocemos la cantidad de cemento y arena. Teniendo estos valores y multiplicándolo por el área de paredes  $113.33[m^2]$ , dividiéndolo de la cantidad en Kg que posee un saco de arena 40 Kg y cemento 50 Kg, y multiplicándolo por su valor comercial, tendríamos los valores de \$498.81 y \$360.66 respectivamente para cemento y arena.

$$\text{Número de bloques} = \frac{1m^2}{0.08m^2} = 12.5 \sim 13 \text{ bloques} \quad (2.1)$$

$$\text{Área de juntas verticales} = 0.4 m \times 0.1 m \times 13 \text{ juntas} = 0.52m^2(2.2)$$

$$\text{Área de juntas horizontales} = 0.2 m \times 0.1 m \times 13 \text{ juntas} = 0.26m^2(2.3)$$

$$\text{Área total de juntas} = 0.52m^2 + 0.26m^2 = 0.78m^2 \quad (2.4)$$

$$\text{Volumen total de mortero} = 0.78m^2 \times 0.01m = 0.078m^3 \quad (2.5)$$

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{1}{4} * 0.078m^3 * 1500 \frac{Kg}{m^3} = 29.25 Kg \quad (2.6)$$

$$7\text{Cantidad de arena} = \frac{3}{4} * 0.078m^3 * 1600 \frac{Kg}{m^3} = 93.6 Kg \quad (2.7)$$

Tiempo de retorno de inversión

Para calcular el tiempo de retorno de inversión dividiremos el costo de inversión para la diferencia del consumo energético anual.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Costo de inversion}}{\text{diferencia de consumo energetico anual}} \quad (2.8)$$

## **Capítulo 3: Resultados**

### 3.1 Resultados.

Para comprobar la fiabilidad de información proporcionada por las simulaciones, se realizó una simulación obteniendo los datos ambientales y del interior de la vivienda, para compararlos con los valores medidos en el mismo rango de tiempo.

Se compararon los valores de temperatura ambiental, y utilizando la directriz de ASHRAE I4-2014 de medición de Energía, Demanda y Ahorro de Agua, calculamos dos tipos de errores, coeficiente de variación del error cuadrático medio, con sus siglas en inglés (CV[RMSE]) y error de sesgo medio normalizado, con sus siglas en inglés (NMBE). Los cuales no deben superar los valores de 10% y 30% respectivamente.

$$CV[RMSE] = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{(n-p)}}}{\bar{y}} \quad (3.1)$$

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})}{(n-p) \cdot \bar{y}} \quad (3.2)$$

**Tabla 13**

*Porcentaje de error en temperatura ambiente medida en sitio vs simulada*

<b>Temperatura ambiente</b>	
<b>CV[RMSE]</b>	11.97%
<b>NMBE</b>	7.16%

Los valores no superan el valor máximo de porcentaje de error para ambos casos, por lo tanto, la simulación sería aceptable. Hay que tener en cuenta que, en temperatura ambiente el error debería ser lo más bajo posible, se encuentran estas diferencias por el uso de datos de la estación meteorológica a disposición. En nuestro caso utilizamos datos de la estación meteorológica que se encuentra en el Aeropuerto José Joaquín de Olmedo

de la ciudad de Guayaquil, mientras que las mediciones se realizaron en el Campus Gustavo Galindo Velasco (ESPOL).

Utilizando datos de la estación meteorológica ubicada en el Centro Educativo Balandra Cruz del Sur, a la entrada del Campus Gustavo Galindo Velasco (ESPOL) y comparándolo con los valores simulados obtendríamos una reducción en los porcentajes de error.

**Tabla 14**

*Porcentaje de error en temperatura ambiente de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto José Joaquín de Olmedo vs simulada*

<b>Temperatura ambiente</b>	
<b>CV[RMSE]</b>	8.51%
<b>NMBE</b>	6.10%

Por lo que observamos, existirá una diferencia entre los valores simulados y la realidad que aumentará el porcentaje de error, que es causada por la ubicación de la estación meteorológica utilizada.

De manera similar se obtuvieron los datos de temperatura interior de la vivienda y se compararon con los valores medidos en el sitio. Los cuales nos mostraron un porcentaje de error más alto.

**Tabla 15**

*Porcentaje de error en temperatura interior medida en sitio vs simulada*

<b>Temperatura interior</b>	
<b>CV[RMSE]</b>	14.97%
<b>NMBE</b>	13.64%

Para esta primera simulación se utilizó un valor de conductividad térmica de 0.8 [W/m·K], el menor valor de conductividad térmica del concreto. Para que la simulación sea aceptable, el porcentaje de error en CV[RMSE] y NMBE no deben sobrepasar los

valores de 30% y 10% respectivamente. Por lo que se realizó una variación del coeficiente de conductividad térmica para adaptar el modelo lo más posible a la realidad.

**Tabla 16**

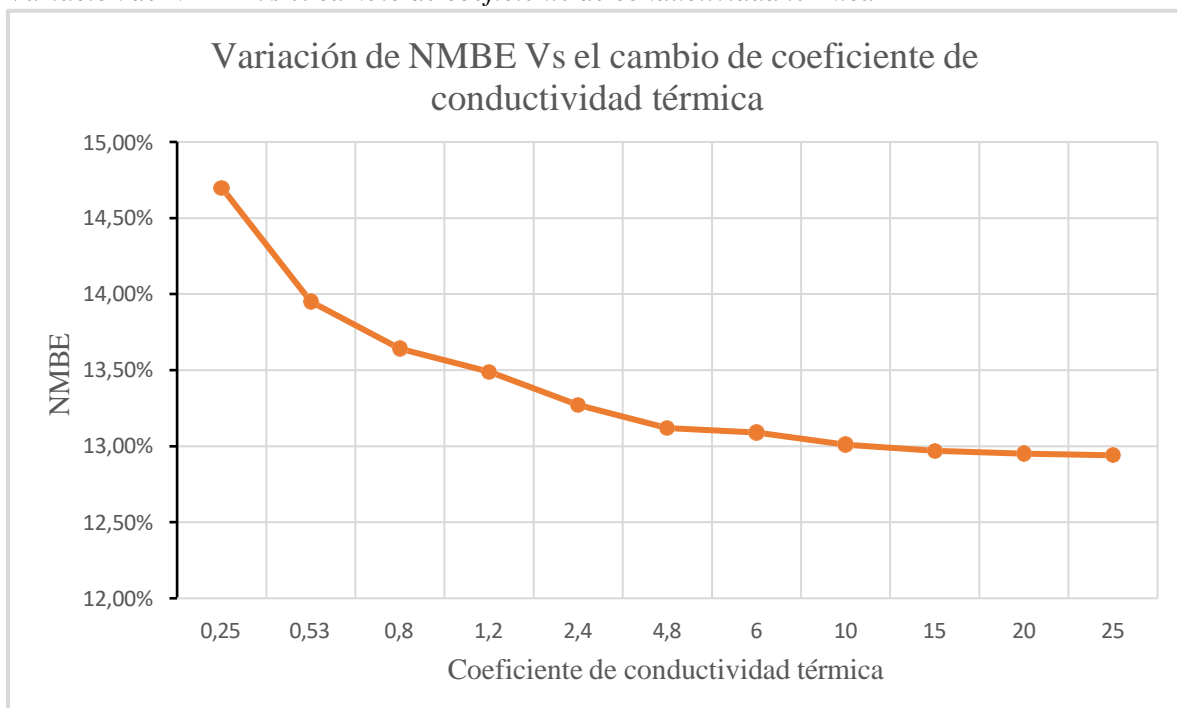
*Variación de los valores NMBE y CV(RMSE) Vs el cambio de coeficiente de conductividad térmica*

<u>Coeficiente de conductividad térmica [W/mK]</u>	<b>0.25</b>	<b>0.53</b>	<b>0.8</b>	<b>1.2</b>	<b>2.4</b>	<b>4.8</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>
NMBE [%]	14.70	13.95	13.64	13.49	13.27	13.12	13.09	13.01	12.97	12.95	12.94
CV(RMSE) [%]	16.10	15.39	14.97	14.74	14.33	14.07	14.00	13.89	13.83	13.79	13.77

Observamos que los valores de los errores disminuyen a medida que se aumenta el coeficiente de conductividad térmica en la simulación, y la variación del error comienza a disminuir. Considerando el error que se generó por la utilización de una estación meteorológica lejana al punto de medición, por lo tanto, podemos considerar que el modelo se encuentra en un rango aceptable.

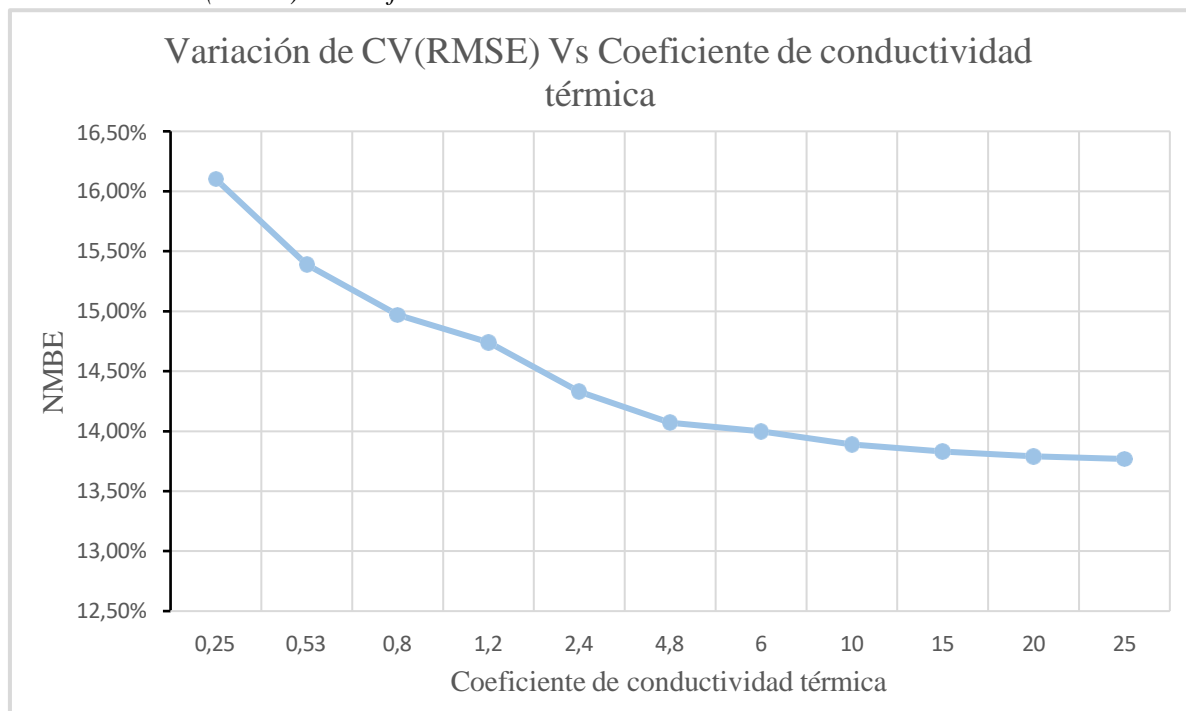
**Figura 17**

*Variación de NMBE Vs el cambio de coeficiente de conductividad térmica*



**Figura 18**

Variación de CV(RMSE) Vs Coeficiente de conductividad térmica



Luego de considerar que el modelo para la simulación sea aceptable, se realizó la medición de transmitancia (U) para comprobar el comportamiento del material con el cual está construida la vivienda, utilizando el instrumento de medición TESTO 635 junto con las sondas de temperatura 0614 1635 para la superficie interior y la radio sonda 0613 1001 para la medición de la temperatura ambiente en la parte exterior.

Se conectaron todas las sondas al instrumento, se confirmó la correcta conexión y funcionamiento de las mismas para luego colocar la sonda para superficie interior como nos indica las instrucciones del equipo, formando un triángulo equilátero con una separación entre ellas de 15 cm.



**Figura 19**

*Ubicación de las sondas para medición de temperatura de superficie interior*



Luego se colocó la radio sonda en el exterior, a una distancia en la cual se mantenga la conexión y en la cual no le afecte los rayos solares directamente para tener una medida estable.

**Figura 20**

*Ubicación de radio sonda para medición de temperatura exterior con equipo Testo 635*



Con las sondas conectadas y situadas en su sitio, se comenzó a realizar la toma de datos para poder obtener un rango en el cual se mantengan estables las mediciones y con esos datos calcular el coeficiente de conductividad térmica.

**Figura 21**

*Medición de temperatura y transmitancia con equipo Testo 635*



Utilizando el software de confort térmico del equipo Testo, se iba monitoreando el comportamiento del valor de transmitancia hasta que se estabilice.

Los variables mostrados en la gráfica generada por el software fueron diferentes temperaturas y el valor de transmitancia.

C1: Transmitancia [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

C2: Temperatura superficial interior [ $^{\circ}\text{C}$ ] (medida por la sonda para superficie)

C3: Temperatura interior [ $^{\circ}\text{C}$ ] (medida por el equipo Testo)

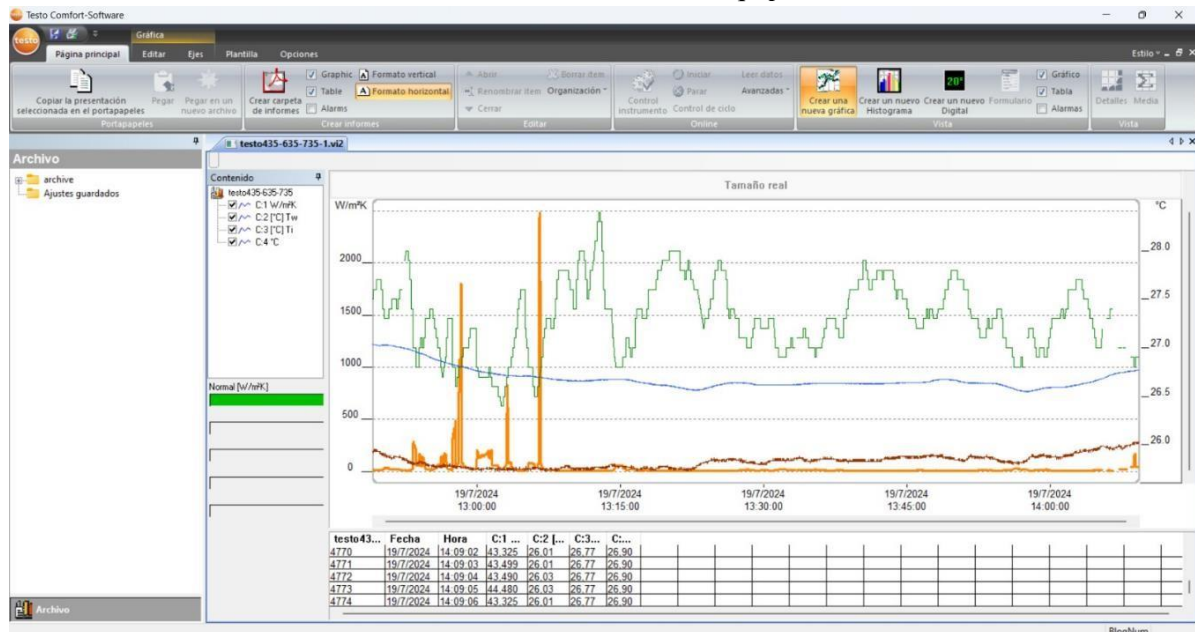
C4: Temperatura exterior [ $^{\circ}\text{C}$ ] (medida por la radio sonda)

Podemos observar que luego del paso de un tiempo la transmitancia se estabilizó y las temperaturas en el interior se mantenían parcialmente estables. La que tuvo mayor variación de medición fue la temperatura exterior, su comportamiento puede deberse a

varios posibles factores como la radiación solar, influencia de superficies circundantes, flujo de viento, entre otros.

**Figura 22**

*Datos obtenidos mediante la medición de transmitancia con equipo Testo 635*



Con los valores en un rango estable se obtuvieron valores promedio de cada una de las variables, de los cuales utilizamos el valor C1 de transmitancia para los cálculos posteriores.

**Tabla 17**

*Valores promedio en rango estable de temperaturas y transmitancia*

C1 [W/m²k]	C2 [°C]	C3 [°C]	C4 [°C]
5,54	25,85	26,63	27,73

Ya con los datos de transmitancia obtenidos, y conociendo el espesor de la pared, se procedió a calcular el coeficiente de conductividad térmica del material.

$$U = \frac{1}{\sum R} \quad (3.3)$$

$$U = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_t}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (3.4)$$

$$\lambda_i = \frac{d_i}{\frac{1}{U} - R_{si} - R_{se}} \quad (3.5)$$

$$\lambda_i = \frac{0.22}{\frac{1}{5.54} - 0.13 - 0.04} \quad (3.6)$$

$$\lambda_i = 20.94 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (3.7)$$

Donde:

$U$  : Transmitancia térmica

$R_{si}$  : Resistencia de superficie interior en condiciones normales

$R_{se}$  : Resistencia de superficie exterior en condiciones normales

$d_i$  : Espesor de pared

$\lambda_i$  : Coeficiente de conductividad térmica del material

La vivienda se la analizara en la zona climática de la región costa, el archivo climático de la zona se lo obtuvo mediante el programa EPW map que está incluido en el programa de simulación, este archivo consta de mediciones cada hora durante todo el año, el lugar donde se obtuvieron las mediciones de temperatura es el aeropuerto José Joaquín de Olmedo, en la figura 23 se muestra el comportamiento térmico del exterior de la zona mencionada.

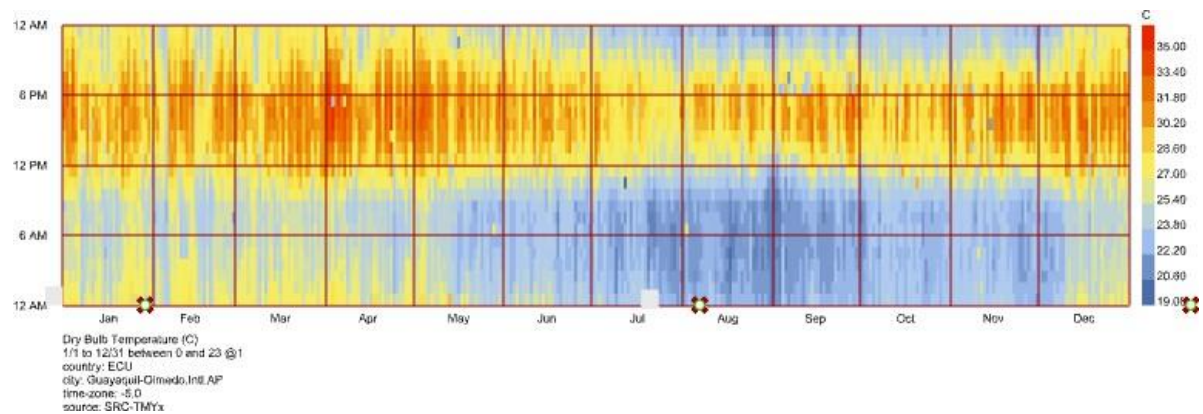
En la figura 23 se observa que en los meses desde diciembre hasta mayo las temperaturas son altas durante la mayor parte del día. En los meses desde junio hasta noviembre las temperaturas disminuyen. Durante todo el año la franja horaria en la que la temperatura es más alta es durante las 12 PM y 6 PM. Las temperaturas durante el año entero pueden llegar hasta un pico de 35 [°C]. las temperaturas durante la noche



disminuyen durante los meses de junio hasta noviembre. Durante los meses de diciembre hasta mayo mantienen temperaturas altas durante la noche.

**Figura 23**

*Comportamiento térmico de zona climática utilizada*

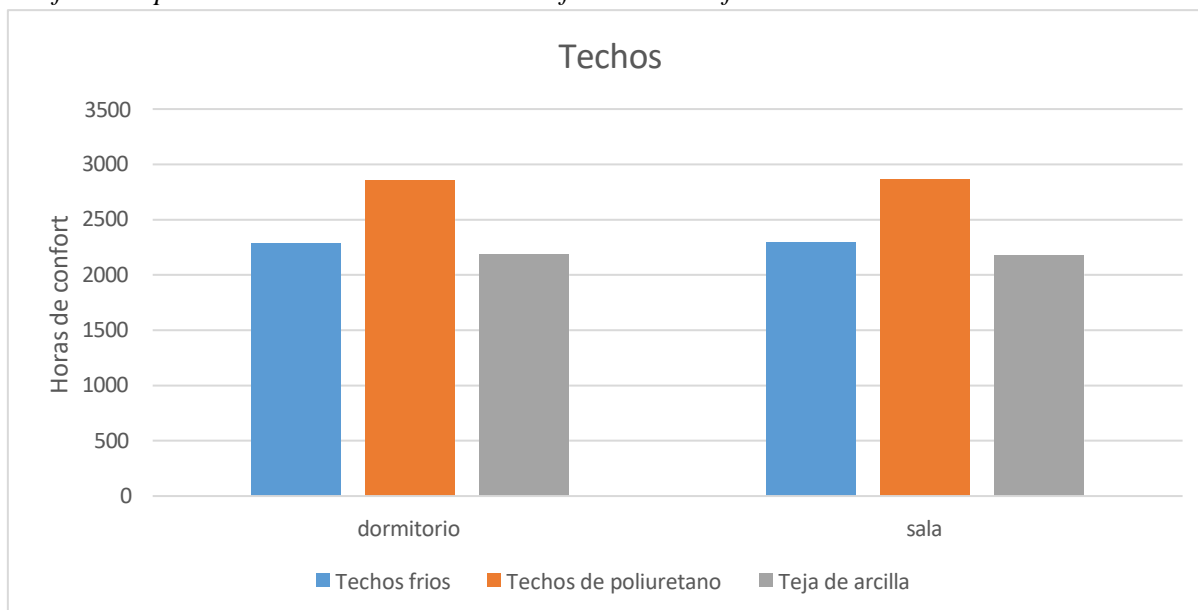


La temperatura mínima es aproximadamente 19 [°C] y la máxima es de aproximadamente 35 [°C]. Las ganancias de calor internas en la vivienda fueron producidas por los equipos eléctrico y de iluminación, en la figura 23 se pueden observar el comportamiento térmico. Finalmente se obtuvieron los resultados de las simulaciones de cada alternativa y se observó las horas de confort que cada alternativa aporta a la vivienda

En la figura 24 se observa la comparación de las horas de confort por medio del cambio de techos de las diferentes alternativas de solución planteadas. La alternativa de teja de arcilla y techos fríos obtuvieron valores similares a horas de confort. La alternativa de techos de poliuretano fue la alternativa que obtuvo más horas de confort que las otras alternativas tanto en el dormitorio como en la sala. Los techos de poliuretano proporcionan más de 2500 horas de confort en la vivienda.

**Figura 24**

*Grafica comparativa en techos de horas de confort con las diferentes alternativas*



En la tabla 18 se muestra la cantidad de horas de confort anuales de las diferentes alternativas de solución consideradas en dormitorio y sala, además se muestran los precios que conllevarían los materiales de cada alternativa en la vivienda de interés social.

**Tabla 18**

*Cantidad de horas de confort anuales modificando alternativas de techo*

	Horas de confort anuales		
	Techos fríos	Techos de poliuretano	Teja de arcilla
Dormitorio	2281	2859	2186
Sala	2289	2861	2177
Precio unidad	\$ 22.00	\$ 22.00	\$ 0.90
Precio total	\$ 422.40	\$ 562.00	\$ 696.77

*Nota: Las unidades de cada alternativa son diferentes:*

- *Techos fríos en galones*
- *Techos de poliuretano en planchas*
- *Teja de arcilla en unidades*

En la tabla 18 se realiza el análisis para comparar los tres tipos de techos alternativas que se utilizaron: techos fríos, techos con poliuretano y tejas de arcilla. Los techos con poliuretano destacan por ofrecer el mayor número de horas de confort, con

2859 horas en dormitorios y 2861 horas en salas. A pesar de tener un costo unitario de \$22.00, que es igual al de los techos fríos, su costo total asciende a \$562.00. Comparativamente, los techos fríos proporcionan 2281 horas de confort en dormitorios y 2289 horas en salas, con un costo total de \$422.40. Aunque los techos fríos también tienen un costo unitario de \$22.00, ofrecen significativamente menos horas de confort que los techos con poliuretano.

Las tejas de arcilla, por otro lado, tienen un costo unitario significativamente más bajo por unidad de \$0.90, con un costo total de \$696.77. Sin embargo, las horas de confort que ofrecen son las más bajas entre las tres opciones, con 2186 horas en dormitorios y 2177 horas en salas.

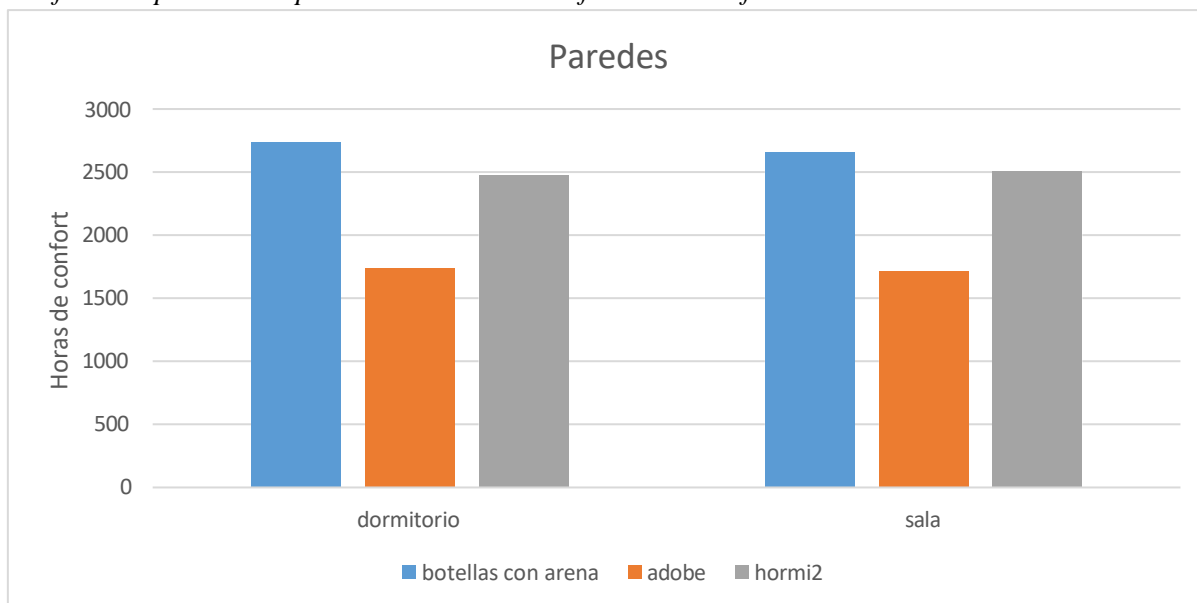
Se seleccionaron los techos de poliuretano debido a su capacidad superior para mantener un ambiente confortable en los espacios interiores, especialmente en áreas como dormitorios y salas. Este material destaca por su excelente aislamiento térmico, lo que significa que es más eficiente en la regulación de la temperatura dentro de una vivienda. En comparación con otras opciones como los techos fríos y las tejas de arcilla, que, si bien son más económicos en términos de costo por unidad, no logran ofrecer el mismo nivel de confort térmico. Los techos de poliuretano ayudan a reducir la transferencia de calor, manteniendo los espacios frescos durante el año, aunque los techos fríos y las tejas de arcilla pueden parecer opciones atractivas debido a su menor costo inicial, no logran proporcionar la misma cantidad de horas de confort.

En la figura 25 se muestran las horas de confort del dormitorio y la sala, de las alternativas de solución consideradas para paredes. Las alternativas de solución de adobe es la que menos horas de confort proporciona de todas las alternativas. Las botellas con arena y el hormi2 proporcionan mayores horas de confort, siendo la de botellas con arena

la que tiene una ligera ventaja sobre las alternativas de hormi2. Las botellas con arena superan las 2500 horas de confort, mientras que el hormi2 llega a las 2500 horas de confort.

**Figura 25**

*Grafica comparativa en paredes de horas de confort con las diferentes alternativas*



En la tabla 19 se muestra la cantidad de horas de confort al año de cada una de las alternativas de solución de pared, además se presentan los precios totales de los materiales de cada alternativa de solución.

**Tabla 19**

*Cantidad de horas de confort anuales de alternativas de pared*

	Horas de confort anuales		
	Botellas con arena	Bloque de adobe	Hormi2
Dormitorio	2740	1741	2474
Sala	2662	1718	2507
Precio unidad	\$ 9.26	\$ 1.00	\$ 10.00
Precio total	\$ 1050.00	\$ 1,625.00	\$ 440.00

*Nota: Las unidades de cada alternativa son diferentes:*

- Botellas con arena en metros cuadrados de pared
- Bloque de adobe en unidad de 40 x 20 x 20 [cm]
- Hormi2 en planchas



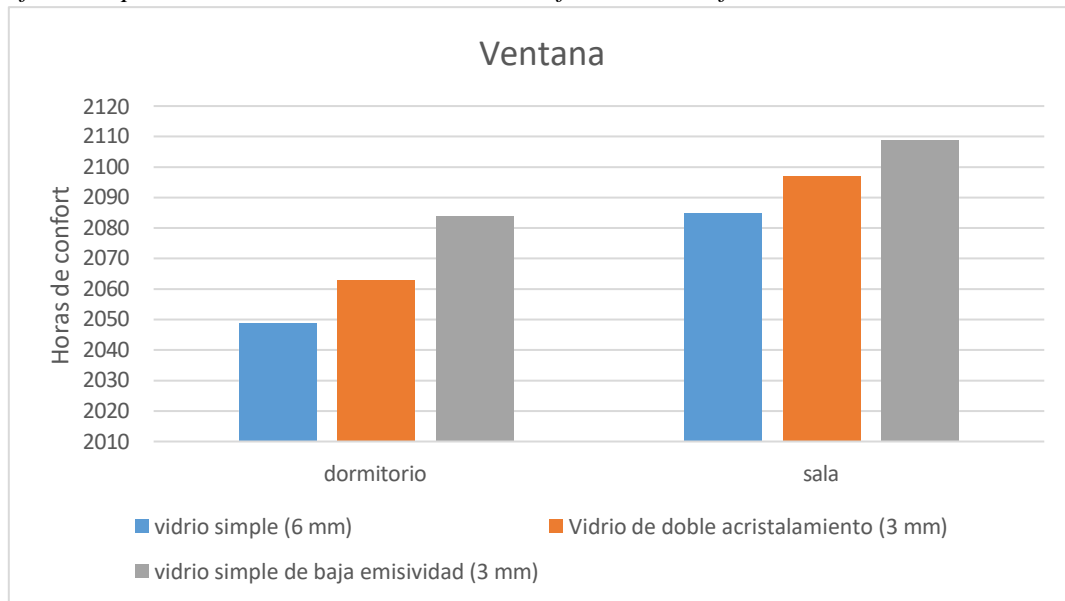
La selección de materiales de las paredes en este análisis se basa en la comparación de botellas con arena, adobe y hormi2, considerando tanto el costo como las horas de confort que ofrecen en dormitorios y salas. Las botellas con arena destacan por proporcionar la mayor cantidad de horas de confort, con 2740 horas en dormitorios y 2662 horas en salas, a un costo total de \$1050. El adobe, aunque tiene un costo unitario bajo de \$1.00, resulta en un costo total de \$1,625.00, ofreciendo 1741 horas de confort en dormitorios y 1718 horas en salas, lo que lo hace menos eficiente en términos de confort por costo. El hormi2, con un costo unitario de plancha más alto de \$10.00, presenta un costo total de \$440.00 y proporciona 2474 horas de confort en dormitorios y 2507 horas en salas, siendo una opción intermedia en términos de confort y costo.

Las botellas con arena, aunque son más caras por unidad, ofrecen el mayor confort, mientras que el adobe, a pesar de su bajo costo unitario, no es tan eficiente en términos de confort por costo, y el hormi2 representa una opción balanceada entre costo y confort.

En la figura 26 se muestran las horas de confort de la ventana, entre las alternativas de solución no hay mucha diferencia entre las horas de confort. El vidrio simple de baja emisividad es el que proporciona mayores horas de confort, a este le sigue el vidrio de doble acristalamiento y por último el vidrio simple. La diferencia de horas de confort entre la alternativa de solución que proporciona mayores horas de confort y la alternativa de solución que proporciona menos horas de confort es aproximadamente de 30 horas.

**Figura 26**

*Grafica comparativa en ventanas de horas de confort con las diferentes alternativas*



En la tabla 20 se muestra la cantidad de horas de confort de las alternativas de solución de vidrio con el precio por m<sup>2</sup> de cada alternativa.

**Tabla 20**

*Cantidad de horas de confort anuales modificando alternativas de ventana*

	Horas de confort anuales		
	Vidrio simple (6 mm)	Vidrio de doble acristalamiento (3 mm)	Vidrio simple de baja emisividad (3 mm)
Dormitorio	2049	2063	2084
Sala	2085	2097	2109
Precio por m <sup>2</sup>	\$ 33.00	\$ 16.50	\$ 40.00
Precio total	\$ 141.08	\$ 282.15	\$ 205.20

Esta tabla muestra tres tipos de ventanas: vidrio simple de 6 mm, vidrio de doble acristalamiento de 3 mm y vidrio simple de baja emisividad de 3 mm, evaluando tanto su costo como las horas de confort que ofrecen en dormitorios y salas. El vidrio simple de baja emisividad de 3 mm proporciona el mayor número de horas de confort, con 2084 horas en dormitorios y 2109 horas en salas. Su precio por metro cuadrado es de \$40.00,

lo que resulta en un costo total de \$205.20. Aunque su costo unitario es el más alto entre las tres opciones, el confort adicional que proporciona puede justificar el gasto.

El vidrio de doble acristalamiento de 3 mm ofrece 2063 horas de confort en dormitorios y 2097 horas en salas, con un precio por metro cuadrado de \$16.50, similar al del vidrio simple de 6 mm. Sin embargo, su costo total asciende a \$282.15, lo que lo hace más caro que el vidrio simple de baja emisividad, a pesar de proporcionar menos horas de confort.

El vidrio simple de 6 mm proporciona 2049 horas de confort en dormitorios y 2085 horas en salas. Su precio por metro cuadrado es de \$33.00, resultando en un costo total de \$141.08, siendo la opción más económica en términos de costo total. Sin embargo, ofrece el menor número de horas de confort en comparación con las otras dos opciones.

La selección del vidrio simple 6 mm se justifica por su bajo costo y que no hay diferencia significativa en horas de confort con las otras alternativas de solución consideradas. A pesar de que el vidrio simple de baja emisividad de 3 mm, y el vidrio de doble acristalamiento de 3 mm tienen costos unitarios más altos y ofrezcan más horas de confort, la diferencia de horas de confort a lo largo del año y el costo de estas alternativas no es suficiente para la selección de esas alternativas. Por lo tanto, basándonos en cuestiones económicas, el vidrio simple de 6 mm es la opción preferida.

Para el análisis de las horas de confort se consideró que las personas dentro de la vivienda van a estar sentadas, lo cual esto proporciona al programa una tasa metabólica de 1, además las personas van a estar vestidas con pantalón y una camisa cortos lo que proporciona el sistema una tasa de ropa de 0.22. En el programa se considerará 2 watts por área de luz, 5 watts por área de equipos eléctricos, las personas que están en una

vivienda rural por lo general son de 3 a 4 personas con lo cual se considerará 0.1 personas por área, además de lunes a viernes las personas saldrán de la casa aproximadamente a las 7 de la mañana y llegará a las 6:00 de la tarde, mientras que los fines de semana permanecerá todo el día dentro de la casa. Con estos parámetros se simuló la vivienda de interés social y la vivienda mejorada comparando sus horas de confort.

En la tabla 21, al realizar un análisis comparativo entre las horas de confort proporcionadas de la vivienda de interés social y la vivienda con medidas de eficiencia energética implementadas, se observan diferencias que destacan la efectividad de las medidas de eficiencia energética en mejorar el confort térmico. La vivienda de interés social ofrece 2049 horas de confort en dormitorios y 2085 horas en salas. En contraste, las medidas de eficiencia energética muestran una notable mejora en el confort térmico. En dormitorios, proporcionan 3297 horas de confort, mientras que, en salas, ofrecen 3491 horas. Estas cifras superan considerablemente a las horas de confort proporcionadas por la vivienda de interés social.

**Tabla 21**

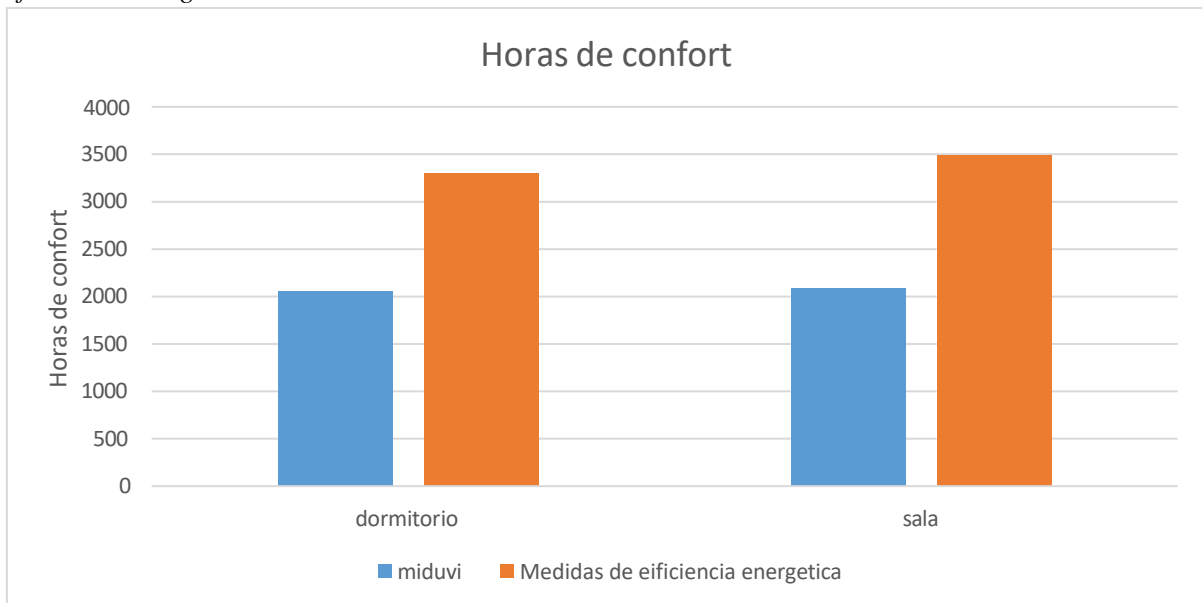
*Comparativo de horas de confort en modelo y con medidas de eficiencia energética*

	Horas de confort anuales	
	Vivienda de interés social	Medidas de eficiencia energética
Dormitorio	2049	3297
Sala	2085	3491

En la figura 27 se muestra la comparación entre las horas de confort de la vivienda de interés social y las horas de confort de la vivienda con las medidas de eficiencia energética implementadas.

**Figura 27**

*Comparativo de horas de confort en vivienda de interés social y vivienda con medidas de eficiencia energética*

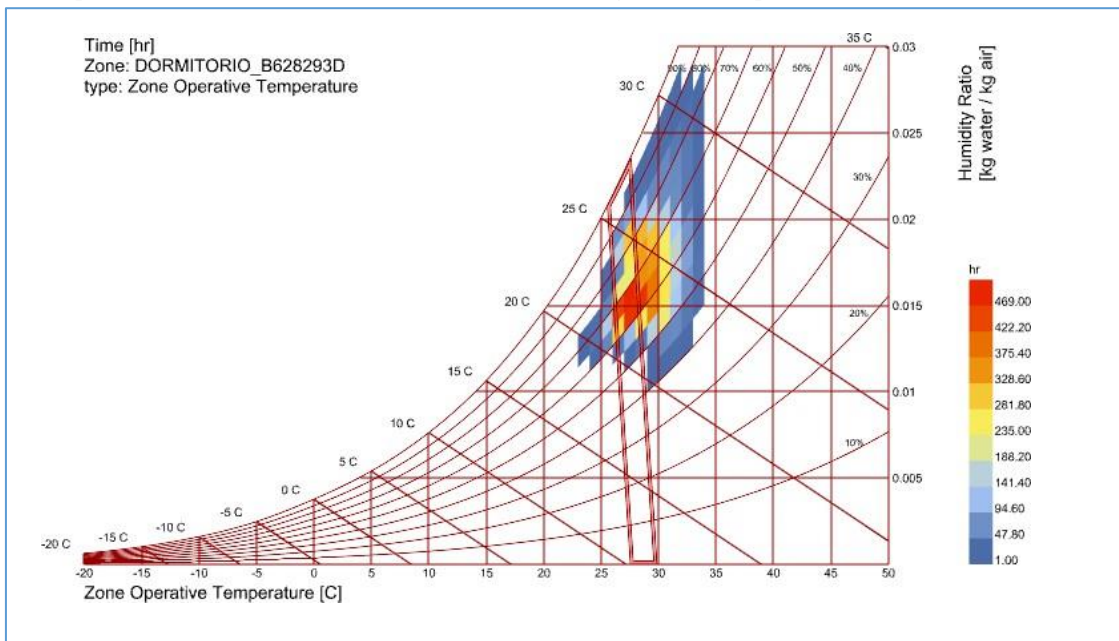


En la figura 27 se observa las horas de confort de las medidas de eficiencia energética son mucho mayor a las horas de confort en la vivienda de interés social, ofreciendo 1248 horas adicionales en dormitorios y 1406 horas adicionales en salas. Esta mejora sustancial se debe a que las alternativas de solución en su mayoría son materiales aislantes implementados en techos, paredes y ventanas, lo cual evita que la mayor parte del calor que hay en techo y paredes, se transfiera al interior de la vivienda.

En la figura 28 se muestra la carta psicométrica del de la vivienda con medidas de eficiencia energética aplicadas, sin embargo, la carta psicométrica de la sala es similar a esta. Dentro de la carta psicométrica se muestran colores que corresponden a la cantidad de horas que la temperatura del interior de la casa está a cierto valor. Los colores cálidos representan mayor cantidad de horas a una determinada temperatura. Los colores fríos representan menor cantidad de horas a cierta temperatura. En la carta psicométrica se muestra una sección de forma rectangular la cual encierra las horas de confort que tendrá ese espacio durante el año.

**Figura 28**

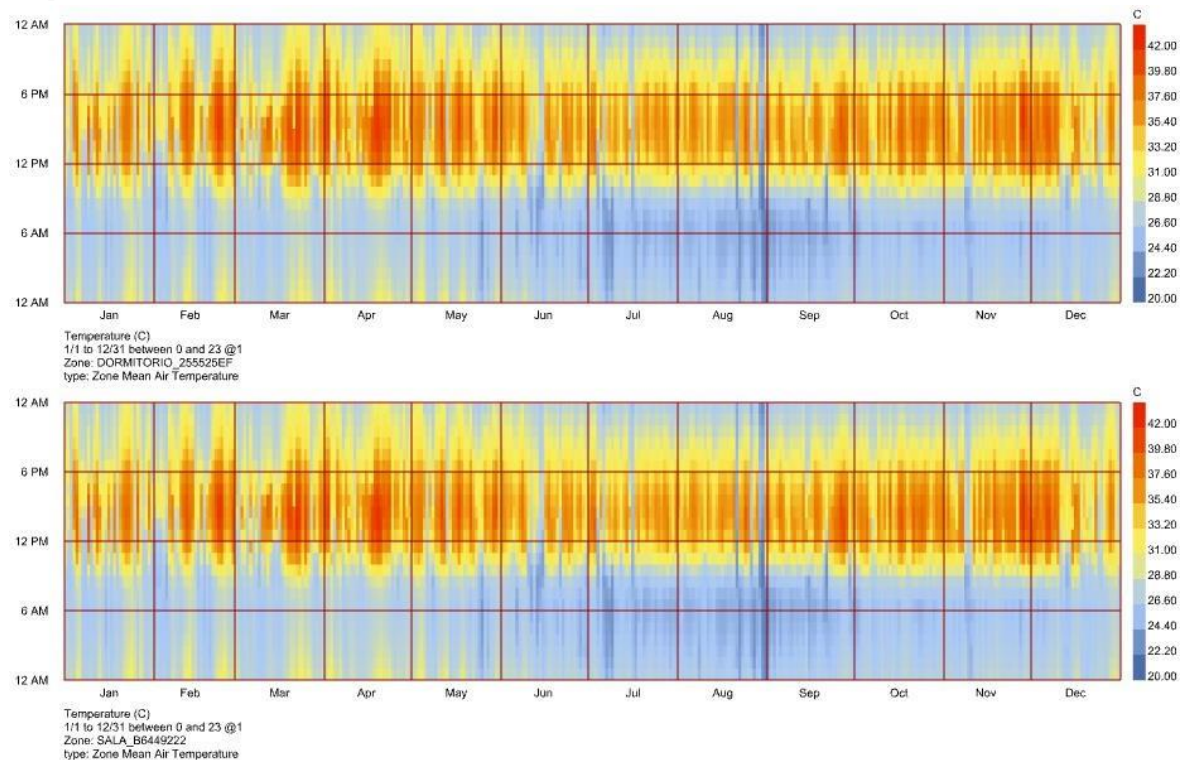
*Carta psicrométrica de vivienda con alternativas de eficiencia implementadas*



La figura 29 muestra el comportamiento térmico del interior de la vivienda de interés social las 8760 horas del año, la imagen superior de la figura 29 corresponde al comportamiento térmico del dormitorio, mientras que la imagen inferior corresponde al comportamiento térmico de la sala. La franja horaria en la que las temperaturas están cerca de los 40 [°C] es desde las 12 PM hasta las 6 PM durante todo el año. En los meses desde diciembre hasta mayo se presenta las temperaturas más altas durante la franja horaria desde las 12 PM hasta 6 PM. La temperatura alta puede permanecer hasta altas horas de la noche e incluso madrugadas con temperaturas de aproximadamente 31 [°C]. En los meses de junio hasta octubre en la franja horaria de 12 PM hasta 6 PM, la temperatura no es tan alta como el resto del año. La temperatura en la noche disminuye hasta aproximadamente 24 [°C].

**Figura 29**

*Temperatura de aire interior de vivienda de interés social.*

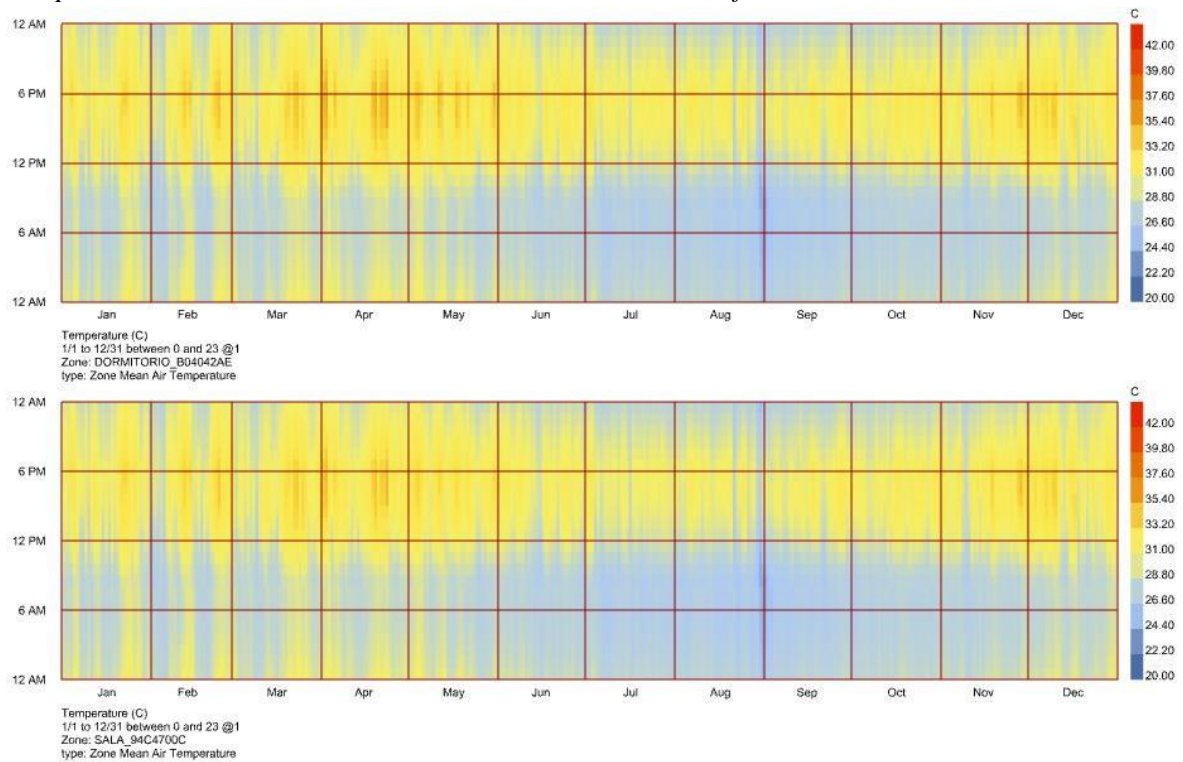


En la figura 30 se muestra la temperatura del aire interior de la vivienda con las medidas de eficiencia energética implementadas. Durante los meses de diciembre hasta mayo se reportan las mayores temperaturas durante el día. La temperatura promedio en la franja horaria de las 12 PM hasta 6 PM es de aproximadamente 31 [°C]. Durante los meses desde junio hasta noviembre las temperaturas disminuyen, se observe que en la franja horaria de 12 PM hasta 6 PM la temperatura del aire al interior se mantendrá dentro del rango de 28 [°C] a 31 [°C], no habrá variaciones considerables en las temperaturas durante el día. En la franja horaria desde las 12 PM y 6 PM de todo el año la temperatura no varía considerablemente, dejando así a la habitación con una temperatura promedio cercana a 31 [°C].



**Figura 30**

*Temperatura de aire interior de vivienda con alternativas de eficiencia*



En la tabla 22 se observa las horas de confort de la vivienda con medidas de eficiencia energética implementada y la vivienda de interés social en este caso con un sistema HVAC incluido, esto para tratar de aproximar las horas de confort en la vivienda de interés social con las horas de confort en la vivienda con medidas de eficiencia energética implementadas y poder realizar una comparación del consumo de energía y el costo asociado a ese consumo de energía, para así obtener el ahorro económico que se logra implementando las medidas de eficiencia energética.

**Tabla 22**

*Aproximando de las horas de confort en el modelo de vivienda de interés social y modelo con medidas de eficiencia energética*

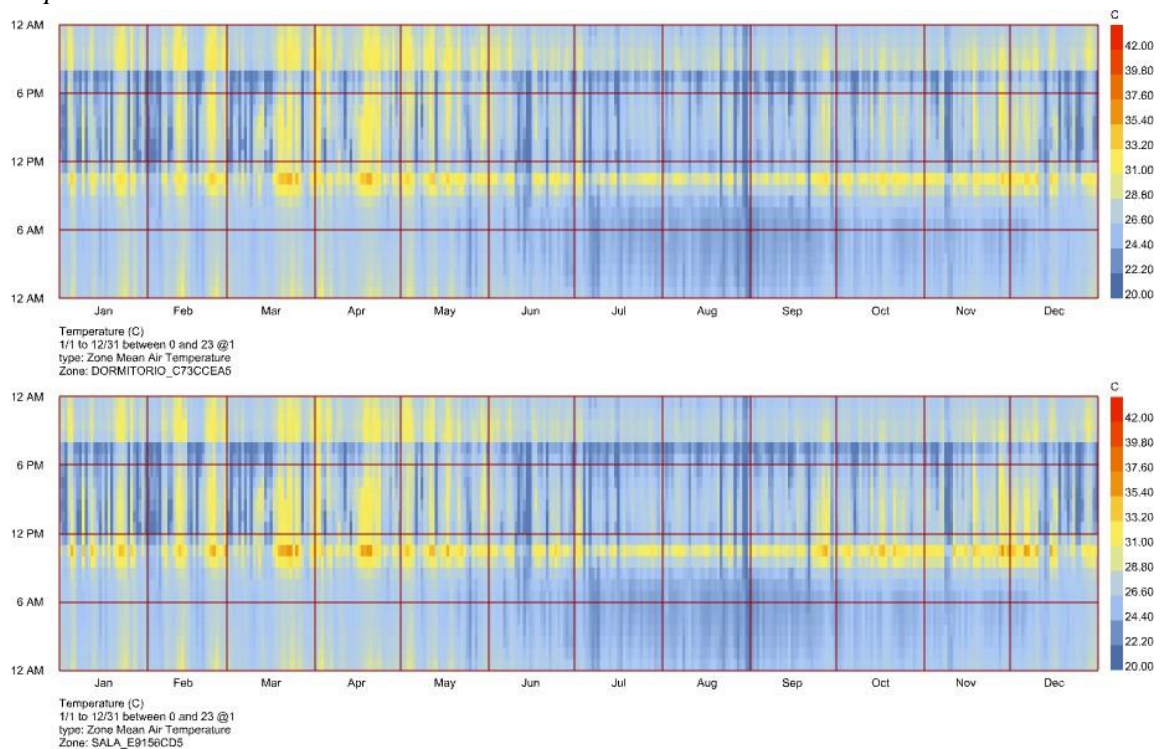
	Igualando horas de confort	
	Vivienda de interes social con Sistema HVAC	Medidas de eficiencia energetica
Dormitorio	3486	3297
Sala	3421	3491



En la figura 31 se observa el comportamiento energético de la temperatura del aire de la vivienda de interés social con el sistema HVAC implementado, se consideró que el sistema HVAC estaría encendido en el horario en el que las temperaturas serían muy alta durante el año, consideramos que esto será desde las 11 AM hasta 7 PM. La temperatura del aire acondicionado se consideró de 22 [°C].

**Figura 31**

*Temperatura de aire interior de vivienda de interés social con sistema HVAC*



Esto conllevaría un consumo de 1.5 kW y 1.8 kW respectivamente para dormitorios y sala, esto representa un consumo mensual de 702.63 kWh. Y considerando los cargos tarifarios de CNEL, entraría en la categoría de nivel de voltaje entre 701 – 1000, con un costo de 0.145 \$/kWh, generándose un consumo de \$1222.56 al año en electricidad solo para el sistema HVAC, lo que representa \$101.88 mensuales, lo cual representa el 22% de un sueldo básico en Ecuador. Esto representa un consumo de 433 [kWh/m<sup>2</sup>] de energía al año mediante sistemas HVAC para llegar aproximadamente a

las mismas horas de confort que la vivienda con medidas de eficiencia energética, considerando el área a refrigerar de 29.6 m<sup>2</sup>

Para la implementación de paneles de Hormi2 necesitamos conocer la cantidad de paneles necesarios, conociendo las dimensiones de los paneles de 2.5 x 1.2 [m], por medio del modelo CAD obtenemos la cantidad de planchas necesarias, 44 planchas para la implementación en la vivienda. Conociendo el valor unitario, tenemos un valor de \$440 en planchas para la implementación. Para las juntas entre planchas, asumiendo el espesor del mortero entre juntas de 1 [cm], y conociendo el espesor de la plancha de 10 [cm] y un perímetro total en el cual se colocará el mortero de 244.51 [m], se obtuvo el volumen total de mortero, con el cual se obtuvo la cantidad de cemento y arena, y sus respectivos costos de \$14.92 y \$10.00 respectivamente.

$$\text{Volumen total de mortero} = 244.51m * 0.10m * 0.01m = 0.245m^3 \quad (3.8)$$

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{1}{4} * 0.245m^3 * 1500 \frac{Kg}{m^3} = 91.88 Kg \quad (3.9)$$

$$\text{Cantidad de arena} = \frac{3}{4} * 0.245 * 1600 \frac{Kg}{m^3} = 294 Kg \quad (3.10)$$

También se calculó la cantidad de planchas de poliuretano para implementar la mejora en el techo, conociendo las dimensiones de las planchas de 2 x 1 [m], y usando el modelo CAD, se obtuvo que son necesarias 21 planchas, lo que nos representa un valor de \$462.

Conociendo los valores de la implementación de las alternativas, calculamos el valor del costo de inversión, realizando la diferencia de los materiales la vivienda modelo

BAU con la vivienda con las medidas implementadas, lo cual nos resulta en un valor de \$1292.55.

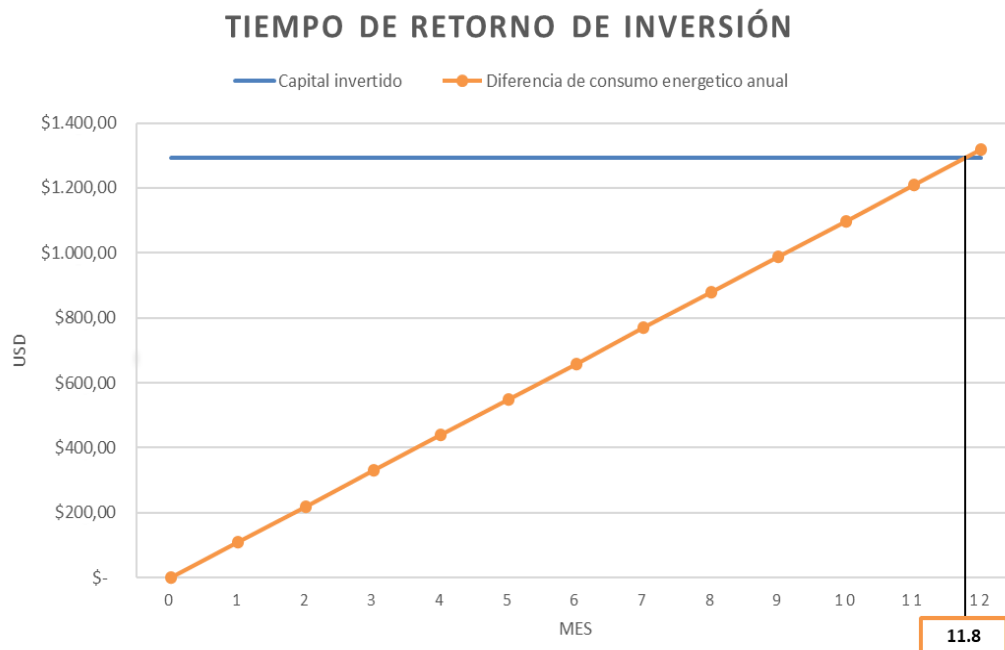
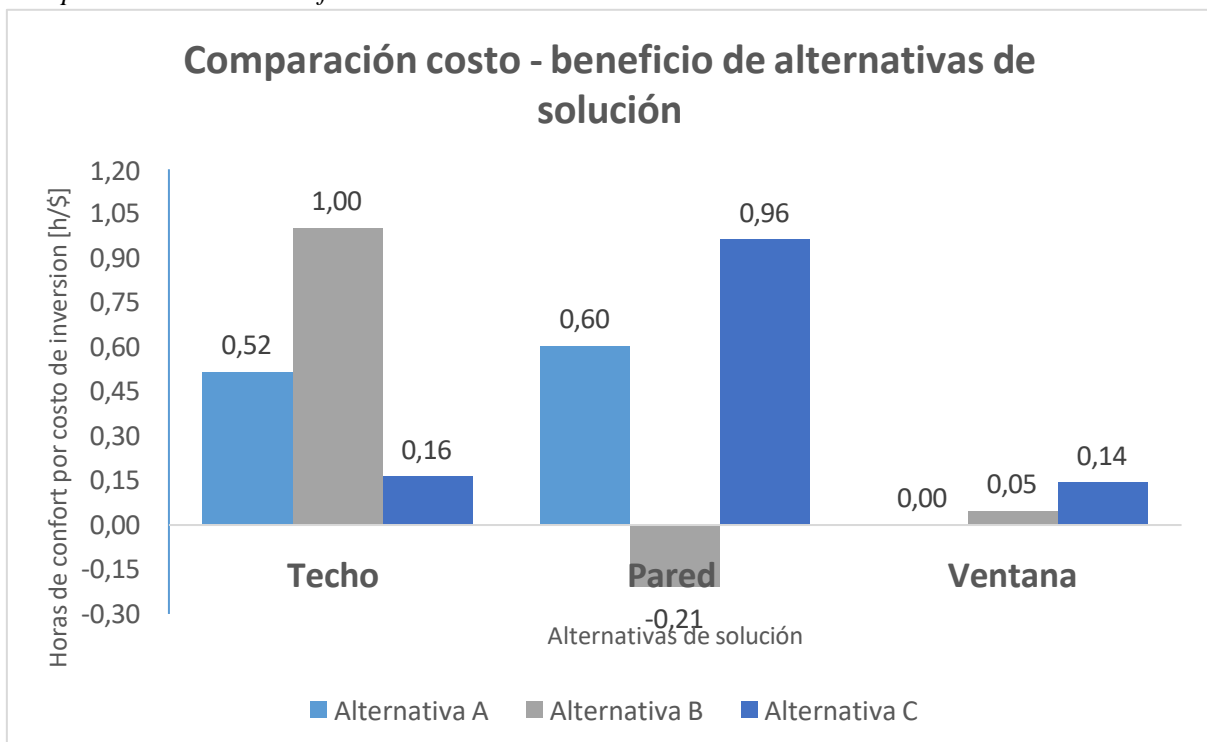
$$\text{Costo de inversión} = \text{valor implementación de materiales de vivienda BAU} - \text{valor implementación alternativas seleccionadas} \quad (3.11)$$

Otro valor que necesitaremos calcular, diferencia de consumo energético entre el modelo BAU aplicando sistema HVAC y vivienda con medidas de eficiencia aplicadas. El consumo promedio de kWh en la región costa es de 128 kWh, mientras que el consumo de la vivienda BAU con el sistema HVAC aplicado es de 702.63 kWh más el consumo normal promedio que nos daría un valor de 830.63. Con diferentes precios de kWh por el rango de consumo, \$0.083 por kWh y \$0.145 por kWh respectivamente, el costo anual en energía fue de \$127.49 y \$1445.30 para vivienda sin aplicar el sistema HVAC y vivienda BAU aplicando sistema HVAC respectivamente. Teniendo una diferencia de \$1317.81 anuales.

### **Tiempo de retorno de inversión**

Calculamos el retorno de inversión aplicando la fórmula (2.8) con los valores de costo de inversión y diferencia de consumo energético anual, lo cual no dio un tiempo de retorno de un año si aplicamos las medidas de eficiencia energética seleccionadas.

$$\text{Payback} = \frac{\$1292.55}{\$1317.81/\text{año}} = 0.98 \sim 1 \text{ año} \quad (3.12)$$

**Figura 32***Tiempo de retorno de inversión***Figura 33***Comparación costo – beneficio de alternativas de solución*

## **Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones**

Se pudo observar los valores de transmitancia medidos para conocer el comportamiento del material del cual estaba fabricada la casa vivienda sostenible que se utilizó casa modelo. Adicional, con los resultados obtenidos podemos observar la mejora que se genera en el confort térmico y el ahorro energético entre una vivienda común (BAU) y la vivienda en la que se implementaron las mejores alternativas que fueron seleccionadas. El impacto económico que se genera al inicio puede parecer demasiado, pero al observar el ahorro que tendremos a largo plazo.

#### **4.1. Conclusiones**

El confort térmico representados en horas que se obtiene dentro de nuestro modelo BAU fue del 23% durante el año, mientras que el confort térmico de las personas dentro de la vivienda con medidas de eficiencia energética aumento al 39% del año, mostrando un aumento del 16% de horas de confort anuales, lo que representa un aumento de más de 3.6 horas diarias de confort.

Si se realiza la implementación de las alternativas para la mejora del confort térmico seleccionadas, considerando en una vivienda un consumo energético por el uso de un sistema HVAC para mantener las condiciones similares al de la vivienda con las alternativas seleccionadas, entonces tendríamos un retorno de inversión en un lapso de un año.

El techo es mediante el cual se da la mayor transferencia de calor, el techo de poliuretano aumentó las horas de confort térmico con una gran diferencia con respecto a las otras alternativas de solución para techos.

Las medidas de eficiencia energéticas seleccionadas no solo generan una mejora en el confort térmico, adicional contribuyen a la sostenibilidad ambientas y resiliencia climática por la reducción del consumo eléctrico y su capacidad de enfrentar los impactos

del cambio climático. Esto es un punto importante en las zonas rurales por el limitado acceso a sistemas de refrigeración mecánica.

#### **4.2. Recomendaciones**

Para las mediciones de transmitancia de los materiales de construcción, es recomendable que se vuelvan a realizar las mediciones considerando diferentes métodos para aumentar la diferencia de temperatura como es sugerida en el manual de instrucciones del equipo. Como la aplicación de un sistema de refrigeración AC o realizar las mediciones en meses más calientes. Adicional, realizar la comprobación de los datos medidos mediante diferentes instrumentos de medición para verificar la exactitud de la medición.

Se recomienda realizar una investigación y pruebas más profunda sobre nuevos materiales que puedan ofrecer una mejor relación costo – confort térmico que sean sostenibles y amigables con el medio ambiente.

Investigar el impacto de las variaciones climáticas extremas en la eficiencia energética y el confort térmico es necesario para poder desarrollar viviendas rurales que ofrezcan un entorno confortable en cualquier condición climática.

Realizar un diseño modular y flexible es una estrategia a considerar para la construcción de viviendas rurales, ya que adicional a la sostenibilidad y eficiencia, agrega la adaptabilidad. Permitiendo que las viviendas evolucionen con las necesidades cambiantes de sus ocupantes. Esta flexibilidad es fundamental en zonas rurales, donde las condiciones pueden ser impredecibles. Esta adaptabilidad ayuda al bienestar y la resiliencia de las comunidades.

## Referencias

Arballo, B. D., Kuchen, E., & Chuk, D. (2019). ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION THROUGH ADAPTIVE THERMAL COMFORT IN A PUBLIC OFFICE BUILDING IN SAN JUAN, ARGENTINA. *Habitat Sustentable*, 9(1), 58–67. <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.01.05>

Comelles Filardi, A. (n.d.). Proyecto de vivienda pasiva bajo el estándar Passivhaus en Buenos Aires, Argentina.

¿Cómo calcular la transmitancia térmica (Valor U) en la envolvente material de un edificio? | ArchDaily en Español. (n.d.). Retrieved June 13, 2024, from <https://www.archdaily.cl/cl/898485/como-calcular-la-transmitancia-termica-valor-u-en-la-envolvente-material-de-un-edificio>

Díaz, O. (2012). La cubierta metálica en el clima cálido húmedo: análisis del comportamiento térmico y efecto en el confort del techo de zinc de la vivienda vernácula dominicana. Universidad Politécnica de Cataluña.

Edgardo, L., Edgardo Fonseca Granados, L., & Tomas seccional Tunja, S. (n.d.). Análisis del comportamiento térmico de las envolventes de las viviendas vis.



Feng, Y. (2004). Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones. *Energy and Buildings*, 36(12), 1309–1312. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2003.08.003>

Giraldo-Castañeda, W., Czajkowski, J. D., & Gómez, A. F. (2021). Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *Revista de Arquitectura*, 23(1). <https://doi.org/10.14718/revarq.2021.2938>

González Couret, D., & Véliz Párraga, J. F. (2019). Evolución de la vivienda de interés social en Portoviejo\*. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 12(23). <https://doi.org/10.11144/JAVERIANA.CVU12-23.EVIS>

Rojas, M., Fernandez, L., Zambrano, L., & Paredes, A. (2022). Análisis de la vivienda rural utilizando el confort térmico como medida de habitabilidad. *CienciAmérica*, 11(2), 124–138. <https://doi.org/10.33210/ca.v11i2.399>

Roux, R., & Garcia, V. (2014). Confort térmico versus consumo energético en viviendas de interés social en clima cálido húmedo. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 16, 123–140. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477947304009>

Vista de Consumos heterogéneos de energía en las tipologías de hogares del sector residencial del Ecuador | FIGEMPA: Investigación y Desarrollo. (n.d.). Retrieved August 15, 2024, from <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/6104/7634>

## **Apéndice**

### **Apéndice 1**

#### **Montaje del panel de poliuretano**

Para instalar correctamente los paneles, se debe comenzar desde la esquina inferior izquierda o derecha del área a cubrir. Se recomienda escuadrar el área utilizando un hilo transversal y longitudinal. Esto asegura que la primera pieza esté alineada correctamente, marcando la disposición de los siguientes paneles. Este procedimiento debe repetirse para cada área plana. En techos con dos o más aguas, se debe escuadrar la primera pieza de cada agua.

Para alinear los paneles, se deben usar hilos o guías longitudinales según la escuadra inicial. Se recomienda colocar un hilo en la parte superior y otro en la inferior para garantizar que todas las piezas estén alineadas. Este procedimiento debe repetirse al comenzar una nueva área y se sugiere verificar la escuadra y alineación cada 10 o 15 piezas.

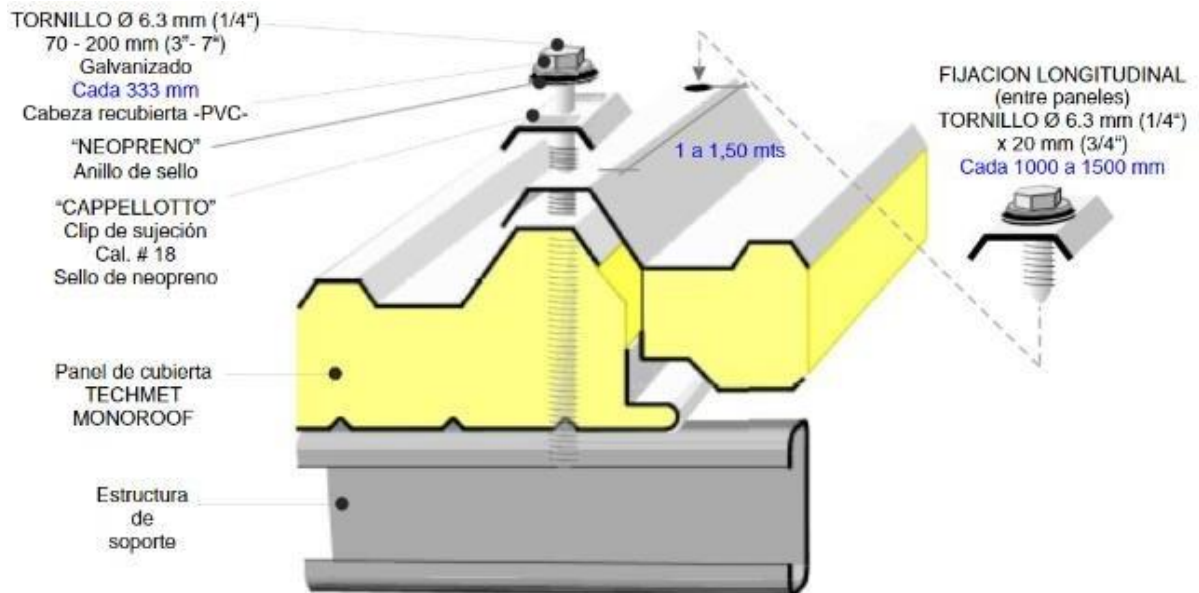
Se inicia con la instalación de los accesorios que estarán debajo de los paneles, estos pueden ser canales y perfiles de acabado inferior, las cubiertas se las efectúa en sentido contrario a la dirección de vientos y se los coloca en sentido opuesto a la forma en la que fluye las aguas, desde la parte inferior y se termina con perfiles de remate superiores. Cuando se necesite ajuste en la primera y/o últimas piezas se pueden realizar trabajos de cortes longitudinales del panel.

Los paneles se fijan con tornillos galvanizados #14 de 6,3 mm (1/4") de diámetro y longitudes de 70 a 200 mm según el espesor del panel. Los tornillos deben ser autorroscantes, con cabeza hexagonal o poligonal, sello de neopreno integrado y un clip

de sujeción "Cappellotto". La fijación se realiza en las crestas de los paneles, centrada en cada viga o soporte estructural.

### Figura 1 - Apéndice 1

#### Instalación de paneles de poliuretano en techos



El número y ubicación de los tornillos dependerán del análisis de factores como la fuerza del viento en la zona y la estructura del techo. Es esencial realizar un cálculo previo para determinar los puntos de fijación óptimos. Se recomienda pre-perforar cada punto con una broca de 5.5 mm y utilizar un hilo como guía para asegurar la alineación. Los paneles deben fijarse inmediatamente después de colocarlos para evitar movimientos por el viento. Para unir las juntas laterales, se utilizan tornillos galvanizados cada 1 a 1.5 metros.

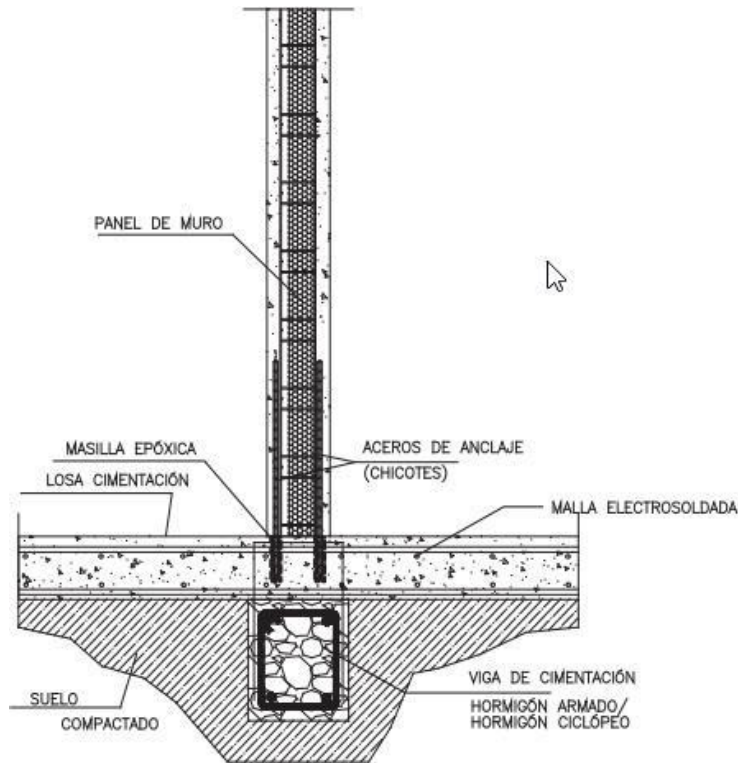
### Instalación de Hormi2

La cimentación del sistema se constituye de cimentación el cual se lo puede aplicar para mejorar el suelo después de haber realizado el estudio del mismo. Otros sistemas de cimentación se los puede considerar se realizará el anclaje de los paneles al sistema de cimentación.

Para anclar el muro de hormi2 a la cimentación se usan barras de acero en forma alternada con longitud de anclaje de 7 cm a 33 cm al muro.

**Figura 2 - Apéndice 1**

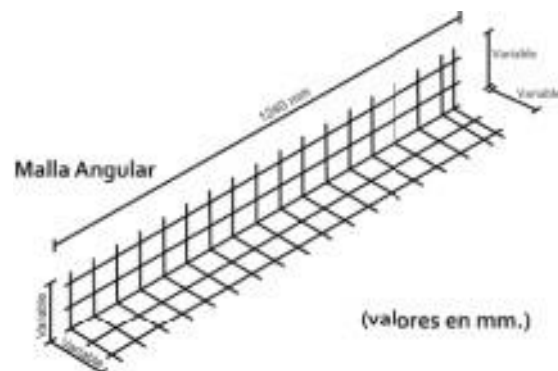
*Anclaje de muro de Hormi2 a la cimentación*



La malla de refuerzo se la realiza con acero galvanizado, con diámetro de 2.5 mm a 3 mm. Las mallas angulares (MRA) refuerzan las uniones en las esquinas en intersecciones de pared con pared, pared con losa, a lo interno y externo.

**Figura 3 - Apéndice 1**

*Malla de refuerzo para uniones de intersecciones*

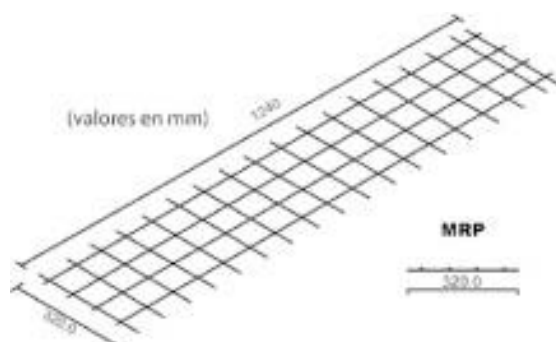


LISTADO DE MALLAS ANGULARES			
Tipo	Dimensiones (mm)	Separación acero (mm)	Diámetro acero (mm)
MRA (1)	150 x 150 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40
MRA (2)	200 x 200 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40
MRA (3)	250 x 250 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40

Las mallas planas (MRP) estas refuerzan (a 45°) los vértices de vanos. Se utilizan para reconstruir mallas cortadas y eventuales empalmes entre paneles

**Figura 4 - Apéndice 1**

*Malla de refuerzo planas*

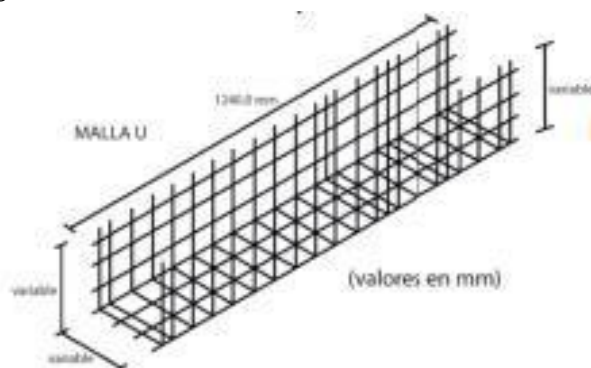


LISTADO DE MALLAS PLANAS			
Tipo	Dimensiones (mm)	Separación acero (mm)	Diámetro acero (mm)
MRA (1)	240 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40
MRA (2)	320 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40

Las mallas U (MRU-P) reconstruyen la continuidad de los paneles, al costado de las puertas y ventanas.

**Figura 5 - Apéndice 1**

*Mallas de refuerzo en U*

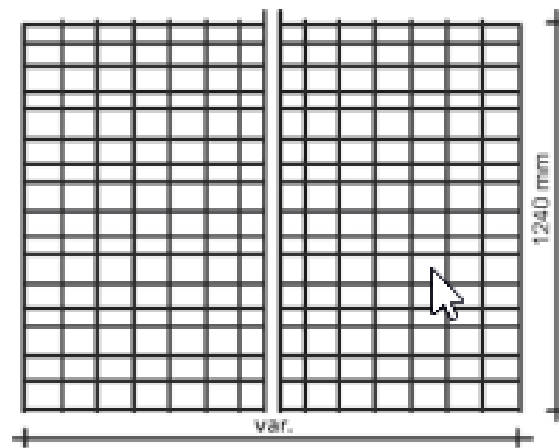


LISTADO DE MALLAS TIPO "U"			
Tipo	Dimensiones (mm)	Separación acero (mm)	Diámetro acero (mm)
MRU-P40	175 x 50 x 175 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40
MRU-P60	165 x 70 x 165 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40
MRU-P80	155 x 90 x 155 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40
MRU-P100	185 x 110 x 185 x 1240	80 mm x 80 mm	2.40

La malla entera se la usa como refuerzo adicional en losas o paredes

### Figura 6 - Apéndice 1

*Malla entera de refuerzo*

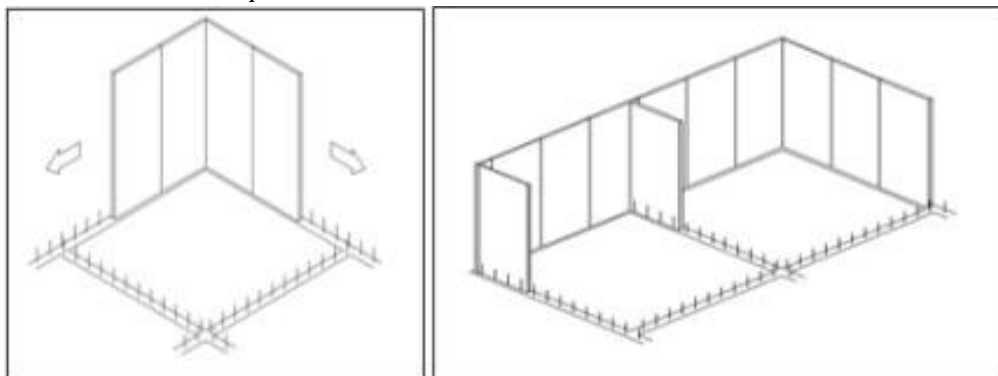


### Corte y montaje de paneles de poliestireno

Debido al peso de los paneles, su instalación es fácil y se la puede realizar manualmente, los paneles deben montarse desde una esquina de la edificación, adicionándolos de forma sucesiva en los dos sentidos garantizando que se instalen dentro de su anclaje.

### Figura 7 - Apéndice 1

*Proceso de instalación de paneles de Hormi2*

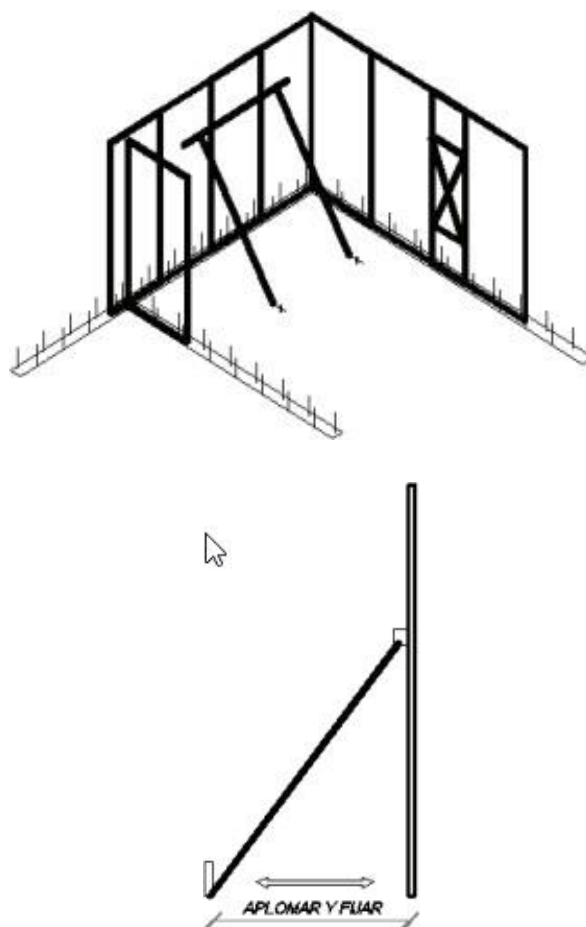


Para fijar el acero de anclaje a la malla de los paneles y a la malla de continuidad entre paneles se deben seguir procedimientos de marre mecánico que se describen en ACI 318 Capítulo 7. Para evitar que el alambre de amarre resalte en el mortero y hormigón proyectado, se debe usar una longitud de alambre que permita suprimir extremos sobresalidos del mismo.

La tolerancia al desplome para muros con alineamiento vertical es de  $\pm 1.5\%$  de la altura medida desde el nivel de piso terminado hasta el nivel inferior del entrepiso o en su defecto el nivel donde termina el muro.

El apuntalamiento mínimo deberá ser tal que mantenga correctamente alineado y fijo el conjunto de paneles durante todo el proceso constructivo, con el fin de evitar movimientos de este conjunto durante la proyección del mortero u hormigón colocándose en una sola cara, de preferencia la interior.



**Figura 8 - Apéndice 1***Apuntalamiento típico de muros*

El proceso de proyección se realizará en dos capas, la primera deberá cubrir la malla básica del panel totalmente en cada una de sus dos caras, incluyendo la primera capa de la cara inferior de la losa de panel prefabricado; y la segunda capa hasta alcanzar el espesor especificado en planos. El tiempo transcurrido entre la aplicación de las dos capas debe ser tal que evite la formación de una junta fría. Para proyectar el mortero u hormigón, se deberán usar medios neumáticos, iniciando desde la parte inferior con movimientos de derecha a izquierda y viceversa, avanzando hacia la parte superior, llegando a la unión con la losa y controlando el espesor de revocado del mortero u hormigón mediante los procedimientos convencionales.

## Apéndice 2

### Instructivo para medir valor U de transmitancia con equipo TESTO 635

#### Figura 1 - Apéndice 2

*Equipo TESTO 365 – Medidor de temperatura y humedad*



- Presiona el botón de encendido en el TESTO 635.
- Utiliza las teclas de navegación para seleccionar el idioma deseado y presione ENTER.
- Navega hasta la configuración de fecha y hora, seleccionar y presionar ENTER.
- Conecta la sonda de temperatura 0614 1635 (superficie interior) al puerto correspondiente en el TESTO 635 antes de encender el equipo.

#### Figura 2 - Apéndice 2

*Sonda de temperatura 0614 1635*



- Colocar las baterías en la radio sonda 0613 1001 y encender la radio sonda presionando el botón de encendido.


### Figura 3 - Apéndice 2




Radio sonda 0613 1001 para medición de temperatura



- Asegúrate de que la radio sonda y el TESTO 635 estén en la misma frecuencia. Esto se puede configurar en el menú de configuración de la radio sonda y del TESTO 635.

- Conecta el sensor de temperatura externa a la radio sonda.

- Mantener presionada  (aprox. 2s) hasta que se visualiza configuración.

- Presionar  /  para seleccionar el n° de canal requerido para la sonda por radio (P.1, P.2 o P.3) y confirmar con .

- El instrumento busca sondas puestas en marcha dentro del campo de recepción.

- Se visualizan los ID de las sondas por radio detectadas.

- Se coloca cada una de las puntas de la sonda 0614 1635 en la pared interior que se desea medir, formando un triángulo con una separación de 15 cm entre sí.

- Coloca la radio sonda 06 13 1001 en el exterior de la estructura, en una ubicación representativa de la temperatura exterior y se verifica que la señal sea estable.

- La sonda de temperatura para pared y sonda para exterior deben estar a la misma altura.

- Se debe establecer el coeficiente de transferencia de calor (alfa) antes de poder calcular el valor U.

- Se activa y configura el programa de medición buscando en el menu Prog. med. →

.

- Presionar  /  para seleccionar AUTO y confirmar con .

El ciclo de medición se establece en el siguiente orden: horas / minutos / segundos.

- Presionar /  para establecer el ciclo de medición en horas, minutos y segundos y confirmar con .
- Presionar /  para establecer el número de lecturas y confirmar.
- El instrumento regresa al modo medición.
- Nos aseguramos de que todos los sensores están tomando lecturas correctamente.
- Deja que el equipo tome las lecturas durante el tiempo necesario para obtener un valor estable.
- Todos los resultados de la medición se guardaran en la memoria interna del TESTO 635.
- Conecta el TESTO 635 a una computadora utilizando el cable USB proporcionado.
- Abrir software de confort térmico TESTO para su posterior análisis.

Los resultados obtenidos por el software del equipo Testo se encuentran en la figura 4 – Apéndice 2, en la cual, la curva amarilla es la temperatura interior del ambiente proporcionada por el equipo Testo 635, la curva morada muestra la temperatura de la pared interna tomada por la sonda de temperatura 0614 1635, la curva verde muestra la temperatura exterior tomada por la radio sonda 0613 1001 y la curva roja muestra el valor de transmitancia U en  $W/[m^2K]$ .

**Figura 4 - Apéndice 2**

Grafica de medición de transmitancia de equipo TESTO 635

