

Factibilidad de aplicación del estandar Passivhaus en las soluciones constructivas de la envolvente para vivienda calificada tipo en Curicó

Estudiante: Gabriel Alejandro Diaz Guillen

Profesor guía: Jeannette Roldán Rojas

Universidad de Chile
Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Resumen

El confort térmico es uno de los objetivos principales que se debe tener al diseñar una vivienda, para esto la envolvente térmica es uno de los factores principales que inciden, en Chile actualmente se tiene el listado de soluciones constructivas propuestas por el MINVU, de las cuales fueron evaluadas las más eficientes y las que contienen los materiales más comunes en Curicó, con una vivienda tipo simulada con el programa Archicad Ecodesigner, con la fase 1 siendo la solución básica y las fases 2 y 3 con modificaciones hechas buscando cumplir el estándar Passivhaus. Los resultados obtenidos mostraron que aun con modificaciones el estándar Passivhaus no fue alcanzado, sin embargo, presentaban consumos energéticos menores con respecto a la CEV (de 197 kWh/m²) variando entre los 140 y 90 kWh/m², ofreciendo así posibles líneas a seguir para mejorar estas soluciones constructivas.

Palabras clave: Passivhaus, MINVU, Confort Termico, Envolvente térmica

1. Introducción

Las tecnologías en relación con el confort térmico de las viviendas siempre han tenido una gran relevancia al momento de diseñar las mismas ya que el objetivo de estas siempre debe ser el proporcionar un ambiente sano para las personas que habitan. El confort térmico Según la norma ISO 7730 "es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico". Es el conjunto de condiciones ambientales donde las personas se sienten cómodas dentro de sus viviendas, siendo estas la temperatura de las superficies del piso, muro, techumbre y ventanas, la humedad, temperatura del aire, así como las corrientes de aire tanto exteriores como interiores, etc., donde el elemento constructivo que agrupa gran parte de estas variables es la envolvente térmica.

Tomando en consideración que las construcciones son la principal fuente de consumo energético final en el mundo con un 40% (Tricoire.J 2021) se puede dar cuenta de la importancia de la envolvente térmica ya que es la responsable directa de la

calefacción y refrigeración en el edificio. (WGBC, 2020)

En Chile se puede dar cuenta de un interés hacia la mejora no solo del desempeño energético de las viviendas si no también en el confort térmico de las mismas, con una reglamentación térmica que determina las mínimas exigencias de la envolvente térmica de las viviendas (pisos, muros y techumbre) así como la Certificación de Vivienda Sustentable, las cuales buscan reducir el consumo energético de las viviendas en Chile con una alta quema de energéticos, los que terminan afectando en la calidad del aire y en consecuencia causando malas condiciones de habitabilidad (Comisión Nacional de Energía, 2020).

En torno a esta problemática, en el diseño arquitectónico se ha llegado a diversas soluciones, siendo una de estas y la más destacable el diseño pasivo, donde se busca aprovechar de la mejor forma posible la energía pasiva presentes en el exterior e interior de las viviendas, esto para mejorar la calidad de vida de los habitantes gracias a una mejora del confort térmico.

El incorporar sistemas pasivos y que a su vez estos sean apoyados por otros sistemas activos es lo más habitual en el diseño. Donde esta compenetración se logra integrando en el diseño de la envolvente térmica y de los sistemas de climatización. (Miotto, Garcia, Escorcía, Trebilcock, Damico, 2011)

El estándar Passivhaus, desde su creación ha tenido una gran influencia en el mundo en cómo se ve y busca el diseño de una vivienda pasiva. Desarrollado por Wolfgang Feist y Bo Adamson, donde en este estándar existen límites y demandas determinados para categorizar a una vivienda como pasiva, a lo largo de los años en Europa central es un estándar que ha tenido gran popularidad, principalmente al estar enfocado a esta región climática.

Teniendo como definición según Feist (Feist, 2005) "Una casa pasiva es una edificación en la que el confort térmico (ISO 7730) se garantiza solo por calentamiento o refrigeración del flujo de aire, de acuerdo con el volumen de intercambio requerido para la calidad del aire interior (DIN 1946) sin utilizar ayuda adicional al aire recirculado".

A lo largo de los años en distintos países se han desarrollado distintas calificaciones energéticas las cuales a través de diversas investigaciones se han realizado comparativas entre estos sistemas de calificación y el estándar Passivhaus, tales como en Argentina, lugar a destacar por ser próximo geográficamente a Chile (Fernández, A., Garzón, B. S., & Elsinger, D., 2020), en Brasil que se puede destacar esta comparación, debido al tener que comparar un estándar realizado para climas centro europeos con una certificación de un clima tropical (Tubelo, R., Rodrigues, L. T., & Gillott, M., 2014), así como una adaptación del estándar Passivhaus en España, donde los distintos requerimientos del estándar son adaptados al clima de Sevilla (Borralló-Jiménez, M., LopezDeAsiain, M., Esquivias, P. M., & Delgado-Trujillo, D., 2022).

En Chile también se han realizado investigaciones relacionadas, donde se hizo una comparativa entre la normativa térmica chilena y a través de distintas adiciones en relación al estándar Passivhaus se fueron evaluando distintas estrategias (Javier Carrasco, Georgios Kokogiannakis; 2012).

La aplicación de mejoramientos constructivos en la envolvente térmica de las viviendas en Curicó mejoraría la calidad del habitar de estas, así como mejorar la eficiencia energética de las mismas. Teniendo como objetivo principal indagar en cómo mejorar estas soluciones constructivas de la

envolvente en relación con el estándar Passivhaus adaptadas al clima en Curicó.

En base a esto a partir de las recomendaciones constructivas de la envolvente de la política nacional de vivienda es posible llegar al estándar Passivhaus adaptado al clima de Curicó, Zona Termica 4 (ZT4), para lograr mejores desempeños energéticos con el propósito de generar confort térmico durante todo el año en las viviendas.

Para esto será importante analizar y proponer mejoramientos a las soluciones constructivas de la envolvente a partir del listado MINVU, éstas siendo modificadas en torno al estándar Passivhaus, para así encontrar las más eficientes al momento de construir viviendas pasivas en Curicó.

2. Antecedentes

2.1. Passivhaus

Passivhaus es un estándar que va en relación con las construcciones de bajo consumo energético, estándar que se ha ido introduciendo a través de toda Europa. Al momento de diseñar para climas fríos, la calefacción y su demanda, son los aspectos más importantes en relación a la envolvente térmica. El sistema Passivhaus está calculado y diseñado para brindar los niveles más altos de confort térmico en estos ambientes. Para lograr esta reducción en la calefacción y enfriamiento se tienen que seguir los siguientes estándares.

- .- Valores opacos (muros, pisos y techumbre) de U por debajo de 0.15 kWh/m²
- .-Valores de U para puertas y ventanas (marco incluido) menores a 0.8 W/m²k, con las ventanas puede ser posible utilizando triple
- .-Los puentes térmicos deben ser minimizados o idealmente eliminados
- .-Hermeticidad de la envolvente que no esté sobre 0,6 ach a 50 Pa,
- .-El uso del sistema de ventilación mecánica. integrado a un recuperador de calor con al menos 75% de eficiencia

Dos elementos importantes que resaltar donde Passivhaus a hecho grandes avances sobre las certificaciones o estándares nacionales, son las filtraciones y los puentes térmicos, donde ya no solo se considera el valor de U, si no que se tiene una visión mas global de la vivienda.

Como se puede observar en el anexo 1 se tiene mayor especificidad en relación a los requerimientos energéticos de la vivienda en el caso puntual del

área residencial, expresando las demandas específicas de calefacción y refrigeración.

Passivhaus es el estándar europeo que propone el criterio más robusto para las construcciones en comparación con otros estándares. Este propone una envolvente térmica altamente aislada.

Y así como existen estos parámetros, también se han hecho modificaciones para climas más cálidos como se puede observar en el anexo 2. Al observar este cuadro se da cuenta de cómo los criterios para edificaciones en climas cálidos contemplan distintas variables a sus requerimientos para estos climas, una posible debilidad se encuentra en como carece de un factor adaptativo para la gran diversidad de climas que se tienen, al no haber referencias más específicas a zonas climáticas diferentes.

2.2. Calificación Energética de Viviendas (CEV)

El artículo 4.1.10 la O.G.U.C. propone exigencias a los elementos de la envolvente térmica, para con esto disminuir el consumo energético y en consecuencia mejorar la calidad habitable de las viviendas.

En esta ordenanza como se puede ver en el anexo 3, se presentan requerimientos para la envolvente en relación a las distintas zonas térmicas en Chile, donde se remarca la ZT4 observando así sus requerimientos mínimos para cumplir con la normativa, dividida en tres secciones importantes, los techos, los muros y los pisos ventilados

A partir de 2012 la herramienta CEV empieza su funcionamiento, proporcionando ésta ciertos criterios que buscan actualizar las construcciones nuevas en Chile, volviéndose una exigencia con el SERVIU determinando su aplicación en los proyectos DS 49 y otros.

Así como se puede observar en el anexo 5 existen distintos tipos de calificaciones energéticas, donde entre el A+ y A existen un aumento notable en cuanto al porcentaje de ahorro energético de al menos un 80% siendo esta calificación el objetivo a lograr de las viviendas nuevas en Chile, calificación B presenta un 60% de ahorro, C un 50% y D un 30% seguidas por la calificación E siendo la vivienda base con un consumo de 197 kWh/m² al año, La F con gastos energéticos entre 10% y 35% (representados con negativos ej. -10%) y por último la G con gastos energéticos de -5% sin un máximo estipulado.

Donde el método de cálculo de las notas es a partir de la fórmula expuesta en el anexo 5, fórmula donde

se divide el consumo energético objetivo (65 kWh/m², 45 kWh/m² calefacción y 20 kWh/m² enfriamiento) entre el consumo energético de la vivienda, en este caso la de referencia (130 kWh/m² al año), dando como resultado el porcentaje de ahorro siendo este del 50%.

En relación a los métodos empleados para la calificación de viviendas presentes en el CEV el principal método que se va a tomar en cuenta es la arquitectura en función de su envolvente energética, donde se determinan los requerimientos de la envolvente en relación a la calefacción y el enfriamiento de la vivienda para finalmente determinar el ahorro energético de esta. Todo esto en base a los siguientes requerimientos mínimos de una vivienda base calificada por la CEV. (Manual de procedimientos calificación energética de viviendas en Chile, 2019, p. 91).

- Demanda energética por calefacción de 45 kWh/m² al año y por enfriamiento de 20 kWh/m² al año dando un total de 65 kWh/m² al año
- Transmitancias térmicas establecidas por la OGUC. Los valores de transmitancia térmica propuestos para muro, techo y piso ventilado son modificados, para cada elemento constructivo, a aquellos valores mínimos establecidos por la reglamentación térmica del 2007 (OGUC). En el caso de los techos, se consideran sin cámara de aire y con cubierta normal.
- Puertas. Se consideran opacas de madera, con una transmitancia térmica igual a 2,51 W/m²k. Mientras que, para elementos traslucidos, se consideran de vidrio monolítico de 6 mm y marco de metal sin RPT. Cuando el % supera el permitido para vidrio monolítico, se considera un valor de transmitancia térmica de 3,6 o 2,4 W/m²k, según sea el caso.
- Puentes térmicos. Se mantiene la posición del aislante, pero se cambia su espesor, considerando el de un material de conductividad igual 0,04 w/mK para satisfacer la condición de transmitancia.
- Infiltraciones/Ventilación mínimas por salubridad. Independientemente del nivel de infiltraciones que se puedan alcanzar utilizando elementos constructivos de alta estanqueidad, se considera que la suma entre ventilación e infiltraciones no debe ser inferior al nivel de ventilación total requerido por condiciones mínimas de salubridad definido como 1 RAH [hr -1].

Actualmente distintas entidades gubernamentales ofrecen guías, estrategias y/o manuales donde se ofrecen recomendaciones de diseño para periodos fríos y calientes relacionadas estas a cada zonificación climática de Chile, uno de estos listados es el "Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo" con su última actualización siendo en el 2014, siendo importante buscar una forma de actualizar estas soluciones para las viviendas propuestas por el MINVU.

3. Métodos

3.1. Localización de la vivienda tipo a simular

La vivienda se ubica en la región del Maule, Zona Térmica 4 (ZT4), más específicamente en Curicó (34° 58' 58"S 71° 14' 22"O) se elige debido a las temperaturas que presenta la zona, esto en relación a la comparativa que se hace con los climas de Europa central teniendo estas temperaturas en invierno mucho más bajas en comparación, Curicó presenta temperaturas máximas en verano de 29 a 30 grados centígrados (en Enero) y mínimas de 3 a 5 grados centígrados (en Junio).

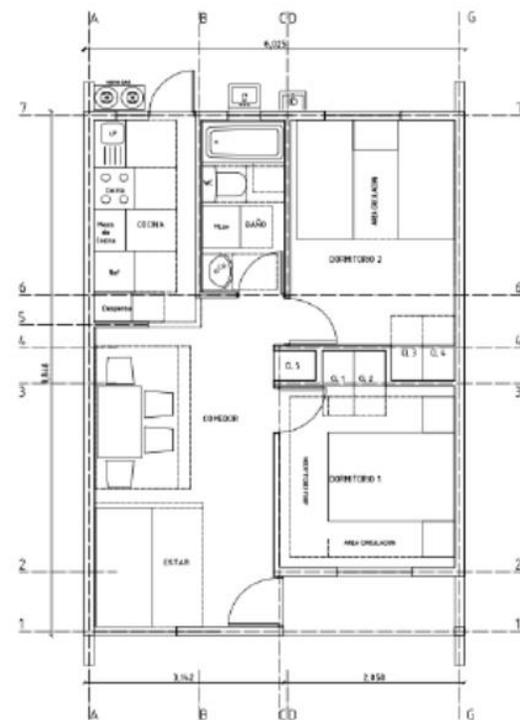
3.2. Determinación de vivienda tipo a simular

En 2018 a nivel país un 39,1% de las viviendas construidas consistían en viviendas pareadas. Para determinar el modelo a estudiar, se buscó uno que represente los elementos más característicos de la vivienda en la región del Maule, en la ZT4 un 50,6% de las viviendas construidas son viviendas pareadas (In - Data SpA, CDT 2018). Asimismo, en la ZT4 un 55,7% de las viviendas están conformadas por un único piso (In - Data SpA, CDT 2018). En la ZT4 el material principal para la construcción de viviendas, en cuanto a muros, es la albañilería contando con un 46,7% de viviendas construidas con este material (Censo, 2017), y en cuanto a techumbres las Tejas o tejas de arcilla y los techos de zinc presentan rangos de uso parecidos (Censo 2017).

Para definir el diseño tipo para la simulación, se eligió una de las propuestas de diseño del MINVU para la región del Maule, siendo esta la EP Consultora Séptimo Sueño SMA-037, consistiendo en una vivienda de 52,12 m², conformada por dos dormitorios y un baño.

Con una carga de ocupación para 4 personas, esto en base al artículo 4.2.4 de la O.G.U.C. con un régimen de uso netamente residencial, y una ganancia de calor per capita de 120 W, así como un consumo de agua caliente de 170 litros al día per

capita. La humedad no fue considerada al momento de evaluar la vivienda.



Fuente: MINVU La casa que quiero Obtenida: <https://www.minvu.gob.cl/casas/albanileria/ep-consultora-septimo-sueño-sma-037/>

3.3. Caracterización material de vivienda tipo

3.3.1 Muros

En la ZT4 existe un alto porcentaje de viviendas que no tienen aislación térmica en sus muros, conformando un 77% de viviendas en esta situación (In - Data SpA, CDT 2018), por lo tanto, en relación con las soluciones del MINVU de muros de albañilería (ladrillos hechos a máquina), un total de

20 soluciones, se elegirán aquellas que contengan en su descripción un aislamiento térmico mínimo y de estas se elegirán 4 de las que tengan las transmitancias térmicas más bajas y las resistencias térmicas más altas, dejando así las siguientes soluciones:

	Ladrillo hecho a maquina	U (W/m ² K)	Espesor (m)	R (m ² C/W)
1.2.M.B9.2	Stgo. Te 9 enlucido de yeso en una cara e=1,5 cm	1.58	0.169	0.63
1.2.M.B9.3	Stgo. Te 9 estuco normal una cara e=2cm y enlucido yeso una cara e=1,5 cm	1.54	0.189	0.65
1.2.M.B9.5	Stgo. Te 9 estuco térmico en una cara e=1 cm	1.57	0.164	0.64
1.2.M.B9.6	Stgo. Te 9 estuco térmico en ambas caras e=1 cm	1.46	0.174	0.68

Tabla 1: Soluciones muros Fuente: MINVU y elaboración propia

Descripciones extra para las soluciones de muros

- **1.2.M.B9.2** Dimensiones 320mm x 154mm x 94mm con un enlucido de yeso de 1,5 cm en una de sus caras
- **1.2.M.B9.3** Dimensiones 320 mm x 154 mm x 94 mm. Una cara estucada con estuco tradicional de 2 cm y otra cara con yeso de 1,5 cm.
- **1.2.M.B9.5** Dimensiones de 320 mm x 154 mm x 94 mm. Una cara con estuco térmico Presec de 1cm con una transmitancia térmica de 0,21 W/m²C.
- **1.2.M.B9.6** Dimensiones de 320 mm x 154 mm x 94 mm. Ambas caras con estuco térmico Presec de 1cm con una transmitancia térmica de 0,21 W/m²C.

3.3.2 Techumbre

En la ZT4 un 52,8% de las viviendas no poseen aislamiento térmico en sus techos (In - Data SpA, CDT 2018), en relación con esto de las soluciones MINVU propuestas se determinaron en primer lugar aquellas que no han sido definidas como vencidas en la sección de Cubiertas a una o más aguas con cielo inclinado, se decidió por elegir una solución de

poliuretano y otra de poliestireno, donde ambas soluciones están planteadas para la ZT4, las cuales son:

	Cubiertas a una o mas aguas con cielo inclinado	U (W/m ² K)	Espesor (mm)	R (m ² C/W)
1.2.M.G1.5	Panel INSTAPANEL - KOVER (modelo L-806), poliuretano no inyectado de densidad 40 Kg/m ³	0,56	80	1,78
1.2.M.G1.6	Panel MUROLISTO Corrugated, poliestireno expandido de densidad 20 Kg/m ³	0,54	75	2,22

Tabla 2: Soluciones cubiertas Fuente: MINVU y elaboración propia

- **1.2.M.G1.5** Panel INSTAPANEL - KOVER (modelo L-806), poliuretano inyectado de densidad 40 Kg/m³: dos láminas de Acero Zinc Alum con un núcleo aislante de poliuretano,, una densidad material aislante de 40kg/m³ y un sistema que se encarga de eliminar los puentes térmicos.
- **1.2.M.G1.6** Panel MUROLISTO Corrugated, poliestireno expandido de densidad 20 Kg/m³: dos láminas de Acero Zinc Alum con un núcleo aislante de poliuretano, densidad material aislante de 20kg/m³ y un sistema que se encarga de eliminar los puentes térmicos.

3.3.3 Pisos

En relación con los pisos, no se ofrece un porcentaje o cantidad exacta de viviendas que posean o no aislamiento térmico, se asume en relación con los datos antes expuestos, que el porcentaje de viviendas sin aislamiento térmico en los pisos puede ser igual o mayor a los anteriores. De las soluciones MINVU propuestas se eligen las dos mas apropiadas para la ZT 4.

- **1.3.M.A3** Losa HA de 120mm y aislante de poliestireno exterior, con las siguientes especificaciones para la ZT4, y con un espesor aislante de 60 mm.
- **1.3.M.A4.1** Losa HA de 100 mm con aislante de poliestireno en su cara inferior, con las siguientes especificaciones para la ZT4 y con un espesor aislante de 70 mm.

	Pisos	U (W/m²K)	Espesor (mm)	R (m²C/W)
1.3.M.A3	<i>Piso de Hormigón Armado de 120mm de espesor, exterior sistema Andes Termo FFS con aislante térmico poliestireno expandido de 15kg/m³</i>	0,57	120	1,75
1.3.M.A4 .1	<i>Losa de Hormigón Armado de 100 mm de espesor con plancha de poliestireno expandido "Termopol" de densidad 15 kg/m³ adherida por su parte inferior</i>	0,51	100	1,94

Tabla 3: Soluciones pisos Fuente: MINVU y elaboración propia

3.3.4 Ventanas y Puertas

El MINVU para este apartado en la zona térmica 4 determina que las puertas de madera opacas deben tener un U de 1,7 W/m²K, todavía está por determinarse el requerimiento de las ventanas, pero se implementará una ventana de aluminio doble hoja con un U de 2,4 W/m²K y una resistencia térmica de 0,27 m²K/W.

3.4. Método de simulación

El modelo fue diseñado y simulado en el programa Archicad 24 en conjunto con Ecodesigner STAR, implementando el modelo de calculo establecido por el software Archicad al momento de realizar las evaluaciones energéticas del modelo de vivienda estudiada, implementando todos los datos establecidos anteriormente, la localización, las temperaturas externas, los valores de transmitancia y resistencia térmica de las soluciones a partir de sus materialidades y los perfiles de operación residenciales establecidos en el software, esto para la obtencion de los requerimientos energéticos de los conjuntos de soluciones constructivas y posteriormente se compararon con los requerimientos del Passivhaus para observar que tan próximo se puede estar de este respecto a las soluciones de la política nacional de Chile.

La razón de elección de este software se debe a los trabajos realizados con respecto a la viabilidad del programa Archicad como método de estudio para los requerimientos energéticos de una construcción y las facilidades que este da para poder evaluar a través de simulaciones dinámicas el rendimiento energeticos de las mismas. (Tkeshelashvili, M, 2021) (Musau, F., & Evan, A., 2020)

En relación con el proceso de la simulación, se dividió en dos partes, en la primera se aplicaron las soluciones constructivas del MINVU como lo presentan sus descripciones con los valores especificados en sus fichas, con una ventilación natural, con los valores de y con una infiltración asumida de 1.20 ACH en base a la guía A de CIBSE y se asume la preexistencia de puentes térmicos en los muros propuestos por el MINVU

Al momento de la evaluación se realizaron distintos conjuntos entre muros, techumbre y pisos, ofreciendo un total de 16 conjuntos. Con muros del 1 al 4, techumbres del 1 al 2 y pisos del 1 al 2, temiendo

- 1.2.M.B9.2 (Muro 1), 1.2.M.B9.3 (Muro 2), 1.2.M.B9.5 (Muro 3) y 1.2.M.B9.6 (Muro 4);
- 1.2.M.G1.5 (Techo 1), 1.2.M.G1.6 (Techo 2)
- 1.3.M.A3 (Piso 1), 1.3.M.A4.1 (Piso 2)

Haciendo conjuntos como Techo 1, Muro 1, Piso 1; Techo 2, Muro 1, Piso 1 y así sucesivamente hasta cumplir con los 16 casos.

Al momento de aplicar los cambios en las soluciones de envolvente de las siguientes fases, se determino que los muros son la zona con mayor superficie de la vivienda tipo (siendo 63 m²), serian estas las soluciones a las que se le aplicarían las variaciones materiales, manteniendo en ambas fases los valores del techo, pisos, ventanas y muros iguales

Se selecciono para las evaluaciones de la fase 2 y 3 el techo con solución de poliuretano (Panel INSTAPANEL - KOVER, modelo L-806) y para el piso la losa HA de 100 mm con aislante de poliestireno en la zona inferior.

La fase 2 consistió en la aplicación de 3 materiales de aislamiento térmico exterior en los muros, esto en base al Manual de acondicionamiento térmico de la cámara chilena de la construcción, teniendo así los siguientes materiales

- Poliestireno
- Poliuretano
- Lana Mineral con fachada ventilada

Donde sus espesores serian en base a las recomendaciones mínimas establecidas, teniendo 20 mm para el poliestireno y la lana mineral y 30 mm para el poliuretano. El asilamiento es exterior principalmente porque se busca no alterar excesivamente las soluciones de muro ya que lo que se busca es comparar éstas con las menores alteraciones posibles para así poder ver cuáles

serían los cambios que mantendrían los rasgos principales de las soluciones propuestas por el MINVU. Donde el cálculo de la U y la R se hizo a partir de la herramienta BIMTech Tools en la fase 2 y 3.

También se propone un sistema de ventilación mecánica integrado con una unidad de recuperación de calor que busque cumplir con las exigencias mínimas del Passivhaus, todo esto buscando no exceder los 15 kWh/m² para la calefacción y enfriamiento de la vivienda. Todo esto usando como base y recomendación la investigación realizada por Javier Carrasco y Georgios Kokogiannakis

La fase 3 consistió en mantener los materiales anteriormente especificados, pero se duplica el espesor recomendado para buscar un U menor y así poder acercarse lo mayor posible al estándar Passivhaus. Teniendo así 40 mm de Poliuretano y lana mineral, y 60 mm de poliuretano.

4. Resultados

4.1. Fase 1 simulacion

En relación a los 16 conjuntos, esto entre 4 muros, 2 techumbres y 2 pisos. Ofreciendo los siguientes resultados en la simulación.

El anexo 6 muestra los resultados principales de los 16 casos anteriormente presentados, enumerados a partir de los conjuntos ya explicados, como se puede observar, en relación a la energía consumida para calefacción en la mayoría de casos presentan resultados parecidos esto puede deberse principalmente a la transmitancia y resistencia térmica general de estos, donde entre los casos 1 y 12 se presentan valores de U de la envolvente con rangos variando entre 1.27 y 1.24 W/m²k estos casos a nivel general demuestran ciertas falencias en lo que serían las soluciones de los muros ya que son el principal factor cambiante en relación a los resultados, debido a que se tienen soluciones aceptables en cuanto a los suelos y las techumbres, esto se debe principalmente a la presencia de puentes térmicos en su construcción y uniones, a partir de esta visión se puede dar cuenta del efecto que tienen los muros en este modelo al momento de visualizar los gastos energéticos de cada caso, así como la consideración de las filtraciones existentes, siendo un factor a considerar en los resultados expuestos en el gráfico.

Los dos casos más resaltantes e importantes en esta fase de las simulaciones serían el caso 15 y el caso 16, resaltan principalmente por el gran descenso en

consumos energéticos en comparación al resto, mejorando en un 27,6% en equiparación con el mas alto, algo importante a recalcar es que esto puede significar un ahorro mayor en relación con los gastos económicos que competen a la calefacción y enfriamiento de la vivienda. Esto debido al Muro 4 que, aunque se presume la existencia de puentes térmicos, presenta mejores valores dentro de todas las soluciones de muros anteriormente evaluadas, se puede considerar que este resultado se da porque tiene una mayor resistencia térmica y menor transmitancia térmica en comparación con el resto de las soluciones MINVU.

Con estos resultados se demuestra que las soluciones constructivas del MINVU no son capaces por si mismas de cumplir con el estándar Passivhaus en ninguno de sus requerimientos.

En relación a la CEV aplicando la formula con el caso 16, el mas bajo en los resultados, los 230 kWh/m² al año, entre los 130 kWh/m² al año, dando como resultado -170% proporcionando una nota de G en la Calificación Energética de Viviendas

Para la fase 2 se decidió evaluar los dos casos extremos, siendo los casos 1 y 16, y un caso intermedio eligiendo así el caso 7.

4.2. Fase 2

4.2.1 Poliuretano

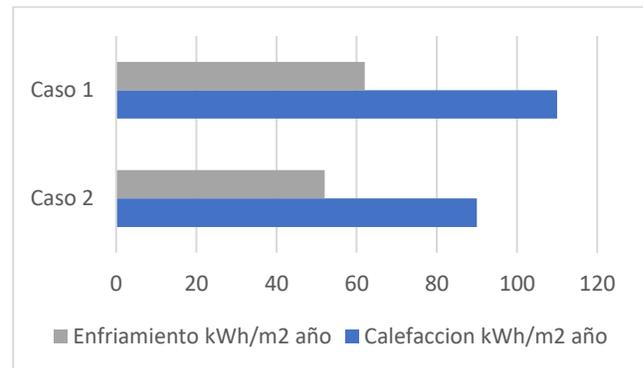


Fig. 1 Gráfico de evaluación de poliuretano fase 2 Fuente: elaboración propia

Al momento de aplicar las modificaciones de la fase 2, esto dio como resultado en los muros dos variaciones, agrupando los siguientes 1.2.M.B9.2, 1.2.M.B9.3, al ofrecer un cálculo de U idéntico para los dos (Muro 1, Muro 2) dejando a parte el Muro 4, esto en base al cálculo ofrecido por el plug in BIMTech Tools

En comparación con el caso mas bajo de la fase 1 existe un 38% de ahorro en consumos energéticos

Con estos resultados se puede ver un leve acercamiento a lo que se debe buscar para poder alcanzar el estándar Passivhaus, sin embargo, ambos casos no lo logran.

En relación a la CEV se tiene que al realizar la división se obtiene un porcentaje de -10% proporcionando así una nota de F para el modelo de vivienda propuesto.

4.2.2 Poliestireno

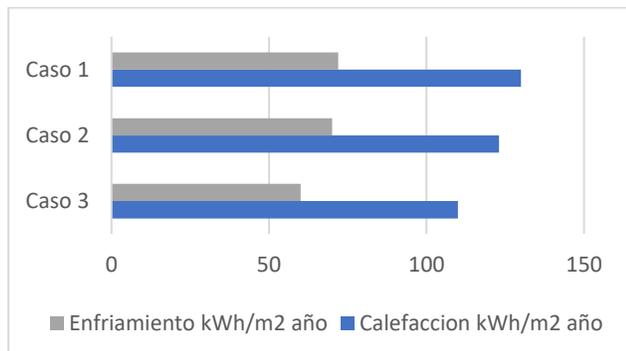


Fig. 2 Gráfico de evaluación de poliestireno fase 2
Fuente: elaboración propia

En relación al poliestireno como se puede observar en el grafico los casos 1 y 2 no presentan una distinción mayor entre ellos, siendo bastante similares en cuanto a consumos energéticos, el caso destacable y el que se va a a calificar es el caso 3 (conteniendo el muro 4) al presentar un ahorro de 30 kWh/m² al año en comparación con el caso 1.

En comparación con el caso mas bajo de la fase 1 existe un 26% de ahorro en consumos energéticos.

Estos resultados no demuestran el suficiente acercamiento requerido para el estándar Passivhaus, con ninguno de los casos presentando un resultado aceptable.

En relación con la CEV se obtiene un porcentaje de -13%, proporcionando así una nota de F para el caso 3 de la vivienda tipo con poliestireno.

4.2.3 Lana mineral

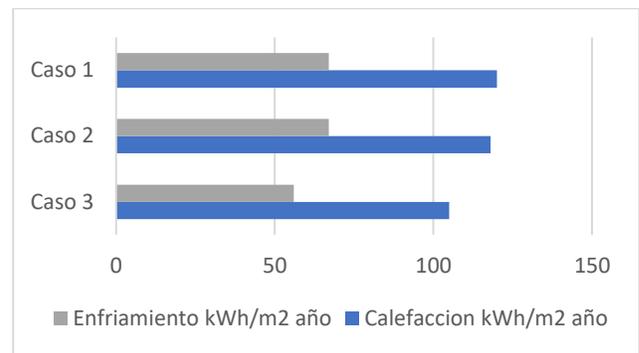


Fig. 3 Gráfico de evaluación de lana mineral fase 2
Fuente: elaboración propia

La lana mineral como se puede observar en el grafico los casos 1 y 2 no presentan una distinción mayor entre ellos, siendo bastante similares en cuanto a consumos energéticos, el caso destacable y el que se va a a calificar es el caso 3 (conteniendo el muro 4) al presentar un ahorro de 26 kWh/m² al año en comparación con el caso 1.

En comparación con el caso mas bajo de la fase 1 existe un 30% de ahorro en consumos energéticos.

Estos resultados no demuestran el suficiente acercamiento requerido para el estándar Passivhaus, con ninguno de los casos presentando un resultado aceptable.

En relación con la CEV se obtiene un porcentaje de -12%, proporcionando así una nota de F para el caso 3 de la vivienda tipo con lana mineral.

4.3. Fase 3

4.3.1 Poliuretano

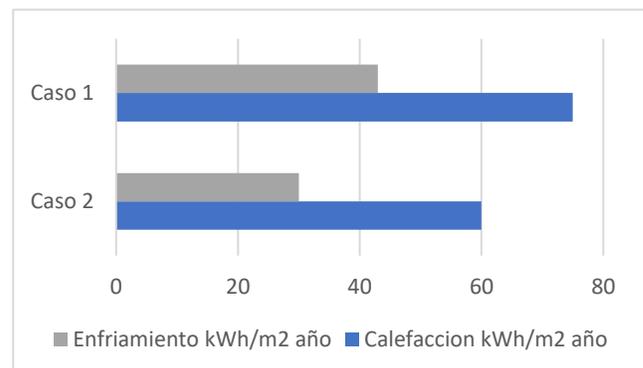


Fig. 4 Gráfico de evaluación de poliuretano fase 3 Fuente: elaboración propia

Aplicando las modificaciones establecidas en la fase 3 se obtienen resultados con unos gastos energéticos menores en comparación, como se puede observar el caso 2 el cual contiene el Muro 4

generando un ahorro de 29 kWh/m² al año en comparación con el caso 1.

Y por ultimo el caso 2 siendo el más resaltante en como el integrar estrategias pasivas en estas soluciones es una de opciones mas eficiente para actualizar el listado MINVU mejorando en gran medida la envolvente térmica de la vivienda simulada, donde se puede ver un porcentaje de mejora superior siendo este de 75% en comparación con el caso mas alto de la fase uno y un 60% con el caso mas bajo, resaltando aun mas como este aislamiento térmico propuesto genera cambios importantes en la vivienda.

Con estos resultados se puede ver un acercamiento aceptable a lo que se debe buscar para poder alcanzar el estándar Passivhaus, sin embargo, ambos casos no lo logran.

En relación con la CEV se obtiene un 70% de mejora, proporcionando así una nota de B para el caso 2 de la vivienda tipo con poliuretano.

4.3.2 Poliestireno

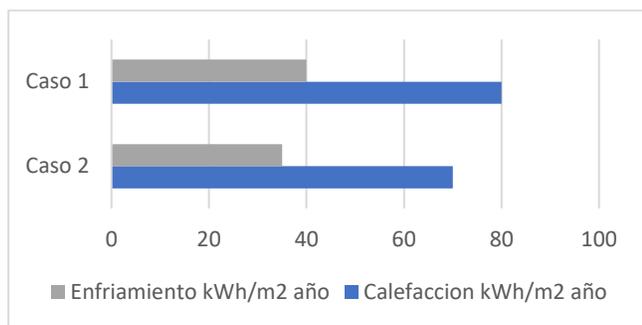


Fig. 5 Gráfico de evaluación de poliestireno fase 3
Fuente: elaboración propia

Al momento de aplicar las modificaciones de la fase 2 muros, esto dio como resultado en los muros dos variaciones, agrupando los siguientes 1.2.M.B9.2, 1.2.M.B9.3, al ofrecer un calculo de U identico para los dos (Muro 1, Muro 2) dejando a parte el Muro 4, esto en base al calculo ofrecido por el plug in BIMTech Tools.

Se puede observar como el caso 2 tiene menos consumos energéticos en comparación con el caso 1 presentando una diferencia de 25 kWh/m² al año.

En comparación con el caso mas bajo de la fase 1 existe un 54% de ahorro en consumos energéticos

Con estos resultados se puede ver un acercamiento a lo que se debe buscar para poder alcanzar el estándar Passivhaus, sin embargo, ambos casos no lo logran.

En relación con la CEV se obtiene un 60% de mejora, proporcionando así una nota de B para el caso 2 de la vivienda tipo con poliestireno.

4.3.3 Lana mineral

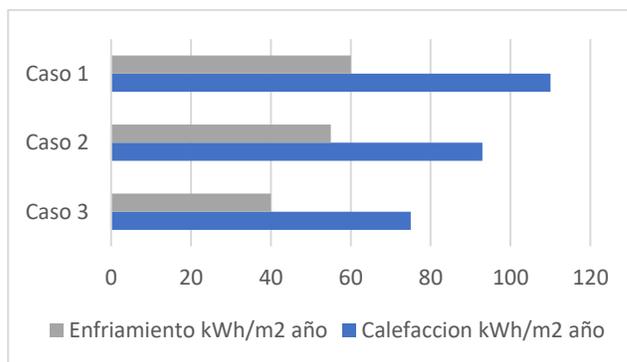


Fig. 6 Gráfico de evaluación de lana mineral fase 3
Fuente: elaboración propia

Se puede observar como el caso 3 tiene menos consumos energéticos en comparación con el caso 1 presentando una diferencia de 55 kWh/m² al año.

En comparación con el caso mas bajo de la fase 1 existe un 50% de ahorro en consumos energéticos

Con estos resultados se puede ver un acercamiento leve a lo que se debe buscar para poder alcanzar el estándar Passivhaus, sin embargo, ambos casos no lo logran.

En relación con la CEV se obtiene un 56% de mejora, proporcionando así una nota de C para el caso 3 de la vivienda tipo con lana mineral.

Fase 1	Fase 2			Fase 3		
	Poliuretano	Poliestireno	Lana mineral	Poliuretano	Poliestireno	Lana mineral
Caso 16	Caso 2	Caso 3	Caso 3	Caso 2	Caso 2	Caso 3
-170%	-10%	-13%	-12%	70%	60%	56%

Tabla 4: Porcentajes de mejora, comparación CEV. Fuente: elaboración propia

5. Conclusiones

Con respecto a los componentes mas influyentes en la envolvente de la vivienda tipo simulada se encontró

que los muros forman parte de los factores principales en cuanto a proveer de un aislamiento térmico efectivo para las viviendas, también es importante resaltar los suelos, siendo uno de los elementos que ayudaba a disminuir entre 12 kWh/m² y 10 kWh/m² en la fase 1, donde si se aplica un mejor aislamiento este puede entregar mejores resultados al momento de disminuir los requerimientos energéticos de la vivienda.

Teniendo como propuesta de modificación a las soluciones MINVU mas destacable el **poliuretano** como solución exterior de la envolvente, proporcionando los resultados mas aceptables en comparación con los otros materiales, así como la solución de muro del MINVU mas eficiente la **1.2.M.B9.6** en las simulaciones.

Estos resultados deben ser considerados únicamente para el caso estudiado y sus dimensiones, aun con esta salvedad es importante señalar la mejora en la envolvente térmica para viviendas con características similares en la ubicación en la que se encuentra (ZT4) así como la situación de que la humedad no fue un factor tomado en cuenta al momento de evaluar la vivienda tipo.

Como se pudo observar en las distintas simulaciones, se da cuenta de lo importante y pertinente que actualizar el listado de soluciones constructivas del MINVU, esto a partir de la aplicación de soluciones pasivas en las mismas, dando cuenta de las ventajas que esto ofrece.

Con respecto al confort térmico que representan las soluciones térmicas del MINVU evaluadas, por si mismas no presentan (en base a los consumos energéticos registrados) un confort térmico aceptable para la vivienda, mientras que las modificaciones realizadas, principalmente la de poliuretano si representan un paso adelante al confort térmico de las mismas, sin embargo estas no logran los estándares establecidos por el estándar Passivhaus.

El diseño pasivo debería ser el objetivo principal al momento de crear y proponer futuras soluciones y viviendas tipo por parte del MINVU, esto debido a que las personas a las que esto va dirigido son las que mas necesitan una vivienda pasiva, no solo debido al ahorro económico que esto produciría, ya que es una obviedad que al bajar los consumos baja el gasto energético; sino que también la calidad del hábitat dentro de las viviendas, que al disminuir el uso de energéticos, mejora.

También se debe destacar la importancia de los softwares como Archicad que ofrecen una simulación dinámica del rendimiento energético de las viviendas y las posibilidades que ofrece de aplicar estrategias pasivas en sus diseños. Queda demostrado en las simulaciones la posibilidad de observar y comprender las distintas variables que afectan en el diseño y como estas pueden ser alteradas, siempre en busca de disminuir los requerimientos energéticos de la vivienda. Por lo tanto es de vital importancia evaluar y calcular estas futuras propuestas y sus actualizaciones en torno a un diseño pasivo todo esto a través de estas herramientas y softwares que permiten estudiar de una forma tanto global como detallada los rendimientos y requerimientos energéticos.

Referencias

- Bustamante, W. (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social. Santiago, Chile: MINVU
http://old.acee.cl/576/articles-61341_doc_pdf.pdf
- Borralló-Jiménez, M., LópezDeAsiain, M., Esquivias, P. M., & Delgado-Trujillo, D. (2022). "Comparative study between the Passive House Standard in warm climates and Nearly Zero Energy Buildings under Spanish Technical Building Code in a dwelling design in Seville, Spain." *Energy and Buildings*, 254, 111570.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821008549>
- Carrasco Eade, J., & Kokogiannakis, G. (2012). Feasibility of PassivHaus standards and alternative passive design on climatic zones of Chile-Determination of energy requirements with dynamic simulation.
<https://ro.uow.edu.au/eispapers/3637/>
- Corporación de Desarrollo Tecnológico (2018) Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018
https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf
- Corporación de Desarrollo Tecnológico y Cámara Chilena de la Construcción (2016) MANUAL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO CRITERIOS DE INTERVENCIÓN
https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Manual_WEB.PDF

- Council, U. G. B., & Council, S. B. I. (2016). What is a green building?. San Marcos, 888, 336-7553. <https://www.worldgbc.org/what-green-building>
- Enerdata (2021) Estadísticas energéticas mundiales <https://datos.enerdata.net>
- Energía Abierta (2010) ESTUDIO DE USOS FINALES Y CURVA DE OFERTA DE LA CONSERVACION DE LA ENERGÍA EN EL SECTOR RESIDENCIAL <http://energiaabierta.cl/estudios/?key=Estudio+usos+finales+y+curva+de+oferta&categoria=e=&organismo=e=&from=&to=&lang=>
- Feist, W. (2006) "Geschichte Passivhaus". 19.04.2010.
- Fernández, A., Garzón, B. S., & Elsinger, D. (2020). Incidencia de las estrategias pasivas de diseño arquitectónico en la etiqueta de eficiencia energética en Argentina. *Revista hábitat sustentable*, 10(1), 56-67. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0719-07002020000100056&script=sci_arttext&lng=en
- Forde, J., Hopfe, C. J., McLeod, R. S., & Evins, R. (2020). Temporal optimization for affordable and resilient Passivhaus dwellings in the social housing sector. *Applied Energy*, 261, 114383. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919320707>
- Hatt, T., Saelzer, G., Hempel, R., & Gerber, A. (2012). Alto confort interior con mínimo consumo energético a partir de la implementación del estándar " Passivhaus" en Chile. *Revista de la Construcción*, Vol. 11 no. 2, 123-134. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2012000200011&script=sci_arttext&lng=e
- Instituto Passivhaus Guía (2020) para la certificación de edificios https://passipedia.org/media/picopen/guia_de_certificacion_de_edificios_phi_es.pdf
- Lush, D., Butcher, K., & Appleby, P. (1999). *Environmental design: CIBSE guide A*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/2013394>
- Martinez-Soto, A., Saldias-Lagos, Y., Marincioni, V., & Nix, E. (2020). Affordable, energy-efficient housing design for Chile: Achieving passivhaus standard with the Chilean state housing subsidy. *Applied Sciences*, 10(21), 7390. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7390>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2014) Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico <https://www.minvu.gob.cl/elementos-tecnicos/listado-de-oficial-de-soluciones-constructivas/listado-oficial-de-soluciones-constructivas-para-acondicionamiento-termico/>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2019). Manual de Aplicación de la Certificación de Vivienda Sustentable. Santiago: División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional - Ditec, MINVU <https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/11/Manual-Certificación-Vivienda-Sustentable-Nov2019.pdf>
- Moreno-Rangel, A. (2020). Passivhaus. *Encyclopedia*, 1(1), 20-29. <https://www.mdpi.com/2673-8392/1/1/5>
- Moreno-Rangel, A., Sharpe, T., McGill, G., & Musau, F. (2021). Thermal comfort assessment of the first residential Passivhaus in Latin America. *Journal of Building Engineering*, 43, 103081. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221009396>
- Musau, F., & Evan, A. (2020). Computer Simulation of Energy Use in Buildings: Predicted Versus Measured Results. <http://radar.gsa.ac.uk/6908/7/computer%20simulation.pdf>
- Schiano-Phan, R., Ford, B., & Zhongcheng, D. (2007). The Passivhaus standard in European warm climates: design guidelines for comfortable low energy homes. <https://westminsterresearch.westminster.ac.uk/item/919zq/the-passivhaus-standard-in-european-warm-climates-design-guidelines-for-comfortable-low-energy-homes>
- Tkeshelashvili, M. (2021). BIM to BEM: Development of integrated workflow from Archicad to Energy Evaluation. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=9053944&fileId=9053968>
- Tubelo, R., Rodrigues, L. T., & Gillott, M. (2014). A comparative study of the Brazilian energy labelling system and the passivhaus standard

Anexos

Criterio para la certificación Passivhaus (Residencial)		Clima frío moderado (Europa Central)
Demanda específica de calefacción	≤15	kWh/(m2a)
Carga de calefacción específica	≤10	W/m2
Demanda específica de refrigeración	≤15	kWh/(m2a) + 0.3 W/(m2aK). DDH
Carga de refrigeración específica	≤10	W/m2
Demanda específica de refrigeración	≤4	kWh/(m2a). $\sigma_e + 2 \cdot 0.3$ W/(m2aK). DDH-75 kWh/(m2a)
Demanda específica total de energía primaria	≤120	kWh/m2/a
Hermeticidad	≤0.6	h ⁻¹ (@50 Pa)
Frecuencia de sobrecalentamiento	10%	Porcentaje de tiempo con temperatura operativa sobre los 25°C

Anexo 1: Tabla criterio de calificación Passivhaus residencial Fuente: Instituto Passivhaus

Zona Climática	Techos		Muros		Pisos ventilados	
	Valor de U kWh/m ²	Resistencia Térmica kWh/m ²	Valor de U kWh/m ²	Resistencia Térmica kWh/m ²	Valor de U kWh/m ²	Resistencia Térmica kWh/m ²
1	0.84	1.19	4	0.25	3.6	0.28
2	0.6	1.67	3	0.33	0.87	1.15
3	0.47	2.13	1.9	0.53	0.7	1.43
4	0.3	2.63	1.7	0.59	0.6	1.67
5	0.33	3.03	1.6	0.63	0.5	2
6	0.28	3.57	1.1	0.91	0.39	2.56
7	0.25	4	0.6	1.67	0.32	3.13

Anexo 3: Tabla requerimientos energéticos envolvente Fuente: O.G.U.C

Anexo 2: Adaptación climas calidos Passivhaus Fuente: Instituto Passivhaus

	Passivhaus 2015	Adaptación a climas cálidos
Demanda de calefacción	≤15 kWh/m ² o Demanda máxima ≤10 W/m ²	≤15 kWh/m ² Indirecto: Confort térmico de invierno de acuerdo con EN 15251. T _{indoor} ≥ 20°C
Demanda de refrigeración	≤15 kWh/m ² Y deshumidificación o demanda máxima ≤10 W/m ²	≤15 kWh/m ² Y deshumidificación Indirecto: Confort térmico de verano de acuerdo con EN 15251. T _{indoor} ≤ 26°C durante > 10% horas de verano Calentamiento excesivo: < 5% horas de verano dT _{in-out} ≤ 6°C si T _{out} > 32°C
Permeabilidad	0.60 h ⁻¹ n ₅₀	0.60 h ⁻¹ n ₅₀
Outdoor Air rate*	≥30 m ³ /h por persona (Construcciones residenciales)	≥30 m ³ /h por persona (Construcciones residenciales)
Unidad de recuperación de calor	Obligatoria /Necesaria	No es estrictamente necesaria
Demanda primaria de energía	Demanda de energía renovable: ≤60/45/30 kWh/m ² al año para la certificación Clásica/Plus/Premium Desviación máxima: ± 15 kWh/m ² al año Energía renovable generada in situ: ≥60/120 kWh/m ² al año para la certificación Plus/Premium Cubre calefacción, refrigeración, ACS, iluminación y electrodomésticos	Demanda de energía no renovable: ≤120 kWh/m ² al año Cubre calefacción, refrigeración, ACS, iluminación y electrodomésticos

ESCALA DE CALIFICACIÓN CEV

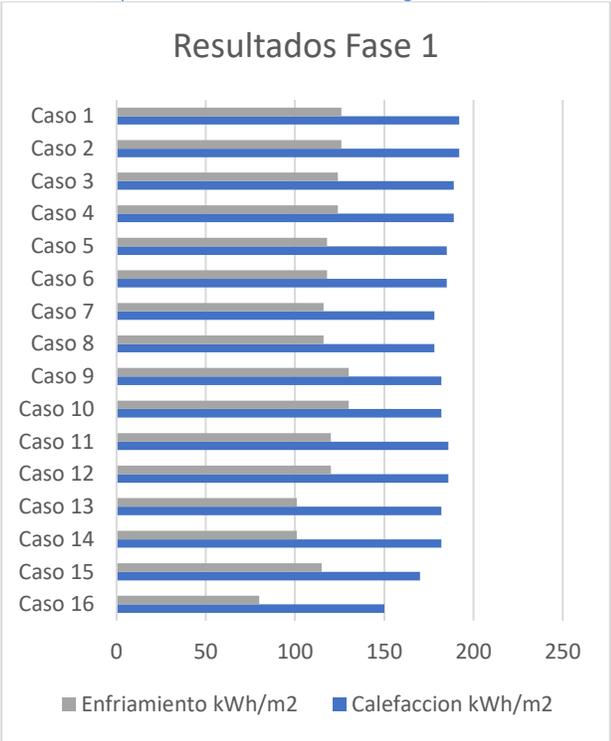


Anexo 4 Escala de calificación CEV. MINVU 2019 Fuente: <https://www.calificacionenergetica.cl>

Demanda energética total 65 kWh/m² año = 50 % ahorro energético
Demanda energética de la vivienda de referencia¹ 130 kWh/m² año

Anexo 5 Formula de calculo CEV

Fuente: <https://www.calificacionenergetica.cl>



Anexo 6 Grafico resultados fase 1

Fuente elaboración propia