

ANÁLISIS COMPARATIVO EN COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE VIVIENDA ESTRUCTURADA EN ALBAÑILERÍA Y EN MADERA CON COSTOS SIMILARES, EMPLAZADA EN SAN PEDRO DE LA PAZ.

I. Cofré Henríquez¹, M. González Retamal² y J. Padilla Reyes³

RESUMEN:

En Chile, las construcciones de viviendas más comunes son en base a albañilería, en parte es por la confianza de usuarios y profesionales de la construcción en este estilo de edificación, dejando de lado otros materiales de estructuración como la madera (34% es madera, 8% hormigón y 53% albañilería, (La Tercera, 2016)), que tiene un menor costo de materiales y menor tiempo de ejecución de obra, esto conlleva un menor costo total. Además, es un material sustentable.

Uno de los puntos a tomar en cuenta al momento de elegir los materiales que constituyen la obra gruesa es su eficiencia térmica para poder proporcionar un confort adecuado a sus usuarios, es por esto que en el presente documento se analizó desde el punto de vista térmico y económico, con la normativa vigente en Chile y la certificación EnergyPlus, una vivienda existente ubicada en San Pedro de la Paz, que corresponde a una edificación basada en albañilería confinada; para luego estructurar la misma construcción en base a madera aserrada siguiendo los planos de arquitectura existentes, de esta forma se pudo realizar un análisis comparativo de la eficiencia térmica de ambos casos sin exceder los costos económicos de edificación existente.

Los resultados muestran que los muros de madera pierden solo un 14,8% de energía térmica, la vivienda sufre un 93,9% de infiltración de energía térmica externa por los muros, una ganancia de 89,5% de energía térmica por energía solar, en invierno se le debe insertar un 21,2% de energía térmica para lograr temperaturas de confort y en verano para lograr la misma temperatura se debe extraer un 173,6% de energía, todo comparado con la vivienda existente. Con esto se concluye que la estructuración en madera tiene una mejor retención del calor, lo que es beneficioso en invierno, pero perjudicial en verano.

PALABRAS CLAVES: Eficiencia térmica; construcción en madera.

ABSTRACT:

In Chile, the most common living place constructions are based on masonry, in part this is explained by the customers and professionals trust upon this edification style, leaving aside other edification techniques like wood, that has lower costs in construction materials and less execution times, which leads to global lower costs. In addition, it is a sustainable technique to construction.

One of the key points to think about at the time of choosing the materials which make the bulk of the build is its thermal efficiency in order to deliver an ideal comfort to the respective users, so is the purpose of this document in which we will review the thermal and economic issues within the legal framework in Chile and the "EnergyPlus" certification we worked in a existing living place, which is located on San Pedro de La Paz, an edification based solely on masonry; following this we will build the same construction this time based on wood following the already existing plans, in order to make a comparative analysis on the thermal efficiency in both cases while not exceeding the existing costs of the original build.

The results indicate that the thermal energy loss in wooden walls was just about 14,8%, while gaining 93,9% of external thermal energy through the walls, an 89,5% was represented by solar energy. We calculated that an increase of 21,2% of thermal energy would be needed in order to achieve comfort temperatures inside and to achieve the same temperatures in summer, a 173,6% of thermal energy loss would be needed, all of this in comparative with the existing building. We conclude, based on this evidence, that wooden based materials have a better thermal energy retention, which is convenient in winter but otherwise in summer.

KEYWORDS: Heat efficiency; wood construction.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, icofre@ing.ucsc.cl

² Profesor Part-Time, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mngonzalezr@gmail.com

³ Profesor Part-Time, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jpadilla@magister.ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la situación actual que se vive en el mundo con respecto al cambio climático es importante que la ingeniería civil y la construcción en general tome cartas en el asunto, siendo responsables de encontrar nuevas formas de diseño de obras que ayuden a conservar y mejorar la calidad de vida de las personas sin descuidar la calidad e innovación en los diferentes proyectos enfrentados. Es por esto que la madera asoma como un tipo de construcción sustentable. En su elaboración, el árbol colabora con el medio ambiente hasta el día en que es talado, incluso durante la generación de la pieza no existe contaminación al medio ambiente en niveles significativos, como si ocurre en la creación de segmentos de acero u hormigón. Considerando que a nivel mundial la industria de la construcción es la responsable del 33% de la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) según lo indicado por Construcción + Operacional (2012) y además genera el 34% de los residuos sólidos (CONAMA,2010).

La ciudad de Concepción se encuentra en la región del Bio Bio, la que en su franja costera presenta un clima templado húmedo, con precipitaciones que varían entre los 1200 mm y 2000 mm anuales. Debido a esto que al momento de diseñar una estructura se debe tener en cuenta factores como las temperaturas de confort “*La vivienda debe mantener una temperatura entre 17 y 24°C, para ofrecer condiciones de confort*” (Rodríguez, Gabriel, 2008). Es importante lograr esta temperatura porque es en las edificaciones donde las personas desarrollan la mayor parte de sus actividades al día como trabajar, estudiar o descansar. Es por esto que la ingeniería debe buscar nuevas técnicas de construcción, que sean más amigables con el medio ambiente sin descuidar la calidad de vida ni la de los diseños. Debido a esto se realiza la comparación de envolvente térmica y costos económicos de una vivienda emplazada en el fundo el venado en San Pedro de la Paz, Concepción, la que está construida con una de las técnicas más recurrentes, la albañilería, la que será comparada por otra casa creada para este estudio que se hará en base a los mismos planos de arquitectura pero reestructurada en madera mediante la técnica de pie derechos, basados en la normativa chilena e internacional y de esta forma se determinará el desempeño térmico de ambas y costos, para así conocer que método es más conveniente desde estos puntos de vista.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.

El objeto de estudio es una construcción habitacional de 186 m² construidos, los que se dividen en dos pisos, el primero posee 103 m² (figura 1) y el segundo 83 m² (figura 2). Originalmente todo el cierre perimetral del primer piso está hecho en base a albañilería confinada, técnica constructiva que se basa en la utilización de ladrillos artesanales de medidas 14x29 cm pegados con mortero hecho de hormigón, lo que luego se confina con pilares y vigas de hormigón armado. El segundo piso los muros se conforman por dos zonas; se clasificó como zona uno la conformada por un revestimiento exterior de fibrocemento, luego una plancha de Orientes Standard Board (desde ahora OSB), una capa interior de poliestireno expandido y un cierre interno de OSB (figura 3). En la zona dos se encuentra los mismos materiales, a excepción del poliestireno expandido que es reemplazado por pizas de madera Pino Radiata de dimensiones 41mm x 65mm (2x3” cepillado) (figura 4). El techo consta de dos partes, uno es el cielo que está hecho con planchas de yeso cartón y poliestireno expandido desde el interior al exterior y luego delimitando con el ambiente se tiene teja asfáltica, plancha de OSB, fibrocemento, tijerales de madera Pino Radiata y otros materiales como se muestra en la figura 5 y la losa está construida en hormigón armado.

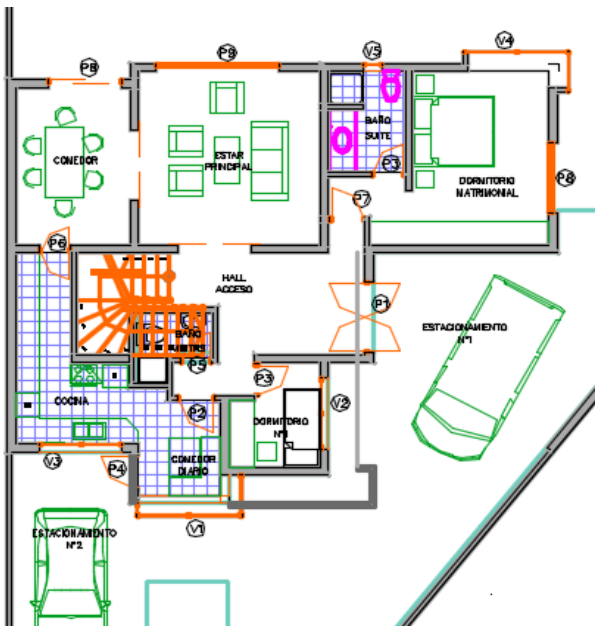


Figura 1: Distribución primer piso.

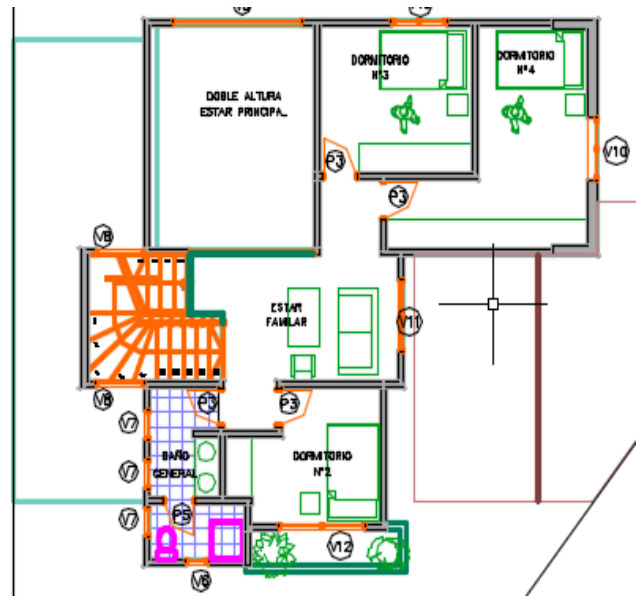


Figura 2: Distribución segundo piso.

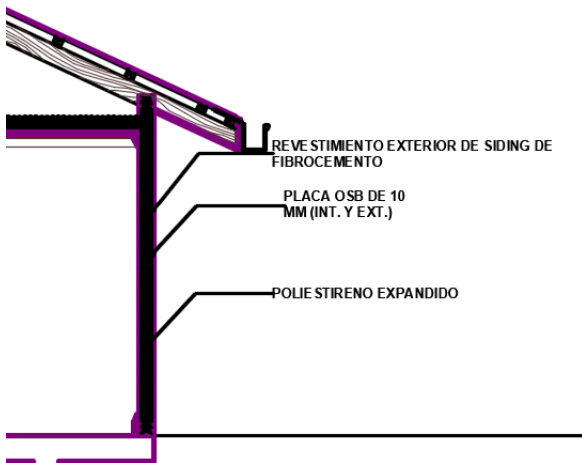


Figura 3: Zona 1 de muros. Extracto de planos existentes.

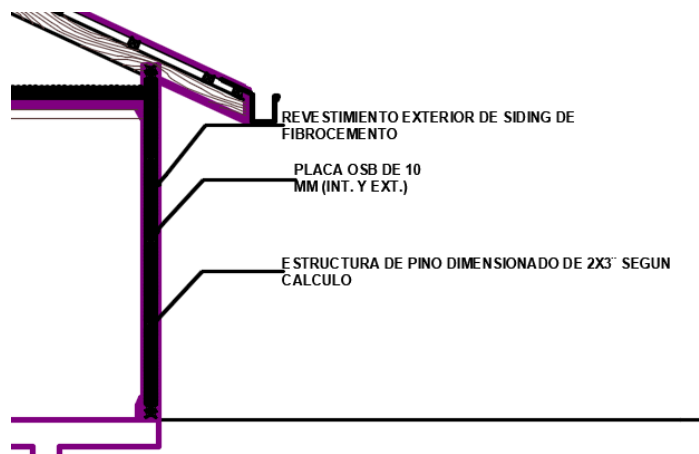


Figura 4: Zona 2 de muros. Extracto de planos existentes.

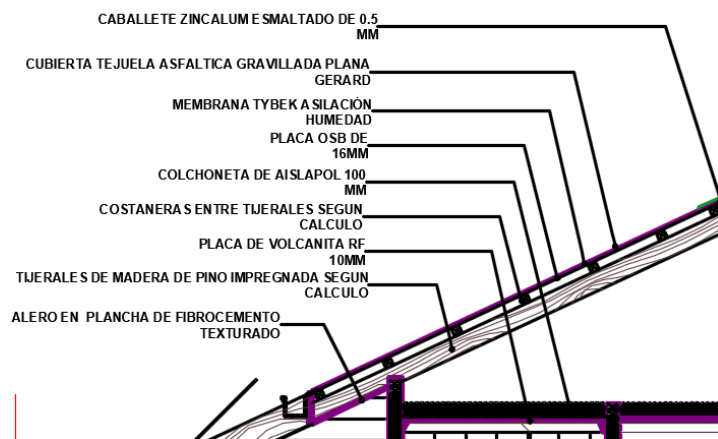


Figura 5: Extracto plano de techumbre vivienda existente.

Para el desarrollo de este estudio solo se necesita la información de los materiales que están en contacto directo con el exterior según se indica en la norma NCh853 Of. 1989 debido a que estos son los que están transmitiendo calor entre el exterior e interior de la casa, por esto no se entrega información de los muros que separan los ambientes al interior.

3. ESTRUCTURACIÓN DE VIVIENDA DE MADERA.

Para los cálculos de estructuración se realiza una modelación virtual de vigas y columnas en el software Change+Timber V1.2.0 (Full) con información de entrada como cargas permanentes, calculadas en base al peso propio de los materiales incluida la madera ya que este programa no considera en sus cálculos la mencionada información en el caso de las columnas, pero si en las vigas.

De la memoria de cálculo de la vivienda existente se obtiene que las cargas ocupadas en sobre cargas de uso de piso son de magnitud 150 kg/m^2 , obtenida de NCh 1537 Of. 1986 para casas de uso unifamiliar y para techo tiene una magnitud de 30 kg/m^2 , carga obtenida de NCh 1537 Of. 1986. Para la carga de viento que afecta esta estructura se recurre a NCh432 Of. 2010 de donde se obtiene una carga de 63 kg/m^2 .

Mediante los cálculos estructurales se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 1 y 2 a continuación.

Tabla 1: Resumen cálculo estructural elementos columnas.

Especificaciones del proyecto	
Especie	Pino Radiata
Grado estructural	G2
Contenido de humedad	12%
Acabado	Cepillado
Tamaño de la sección	41mmx114mm (2x5)
Espaciamiento de columnas	500 mm
Largo de columna	2400 mm
Carga peso propio	348 kg/m
Tipo de apoyo	Articulado-articulado
Sobrecarga de piso	272 kg/m
Carga de viento	63 kg/m^2
Tensiones admisible	
Flexión (Ff)	5,4 MPa
Cizalle (Fcz)	1,1 MPa
Compresión paralela (Fcp)	6,5 MPa
Modulo de elasticidad	8900 MPa

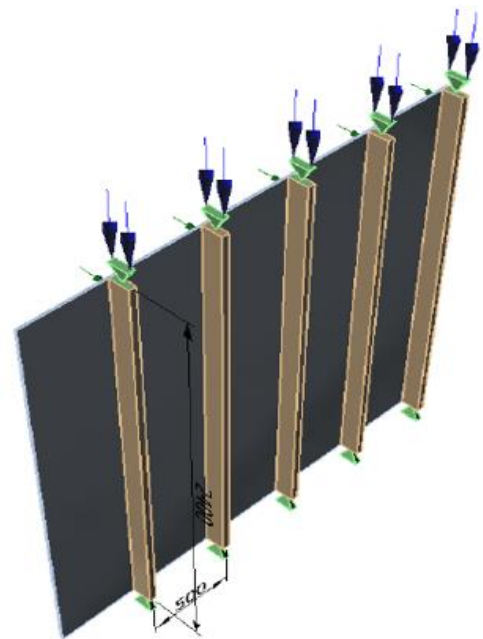
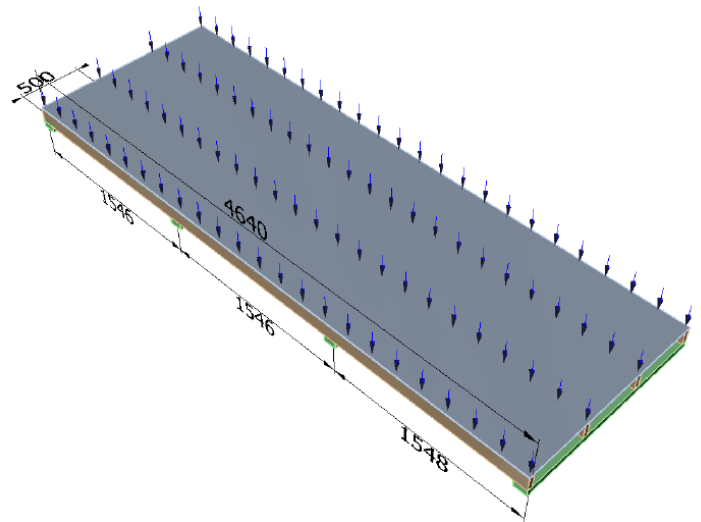


Figura 6: Modelo 3D del diseño realizado en software Change+Timber de columnas. Todas las medidas en milímetros.

Tabla 2: Resumen cálculo estructural cálculo de vigas.

Especificaciones del proyecto	
Especie	Pino Radiata
Grado estructural	G2
Contenido de humedad	12%
Acabado	Cepillado
Tamaño de la sección	41mmx114mm (2x5)
Espaciamiento entre vigas	500 mm
Restricción al volcamiento	Restricción continua
Deformación admisible carga total	L/300
Defromación admisible sobrecarga	L/360
Largo de viga entre apoyos	4640 mm
Carga de peso propio	120kg/m ²
Sobrecarga piso	150kg/m ²
Tensiones admisibles	
Flexión (Ff)	5,4 MPa
Cizalle (Fcz)	1,1 MPa
Compresión paralela (Fcp)	6,5 MPa
Modulo de elasticidad	8900 MPa


Figura 7: Modelo 3D del diseño realizado en software Change+Timber de vigas. Todas las medidas en milímetros.

4. CÁLCULOS TÉRMICOS BASADOS EN NORMATIVA CHILENA.

4.1 Respaldo teórico para la realización de cálculos.

En primer lugar, es importante conocer la zona térmica en la que se está trabajando. Concepción corresponde a la zona 4 de 7 existentes, esta zonificación establece los parámetros de transmitancia térmica por elemento que se deben cumplir como mínimo estándar de calidad. Es importante mencionar que esto no garantiza el confort, solo establece rangos básicos mostrados en la tabla 3. Esta información se obtiene del manual de aplicación de reglamento térmico en el Art.4.1.10. donde se señala “Todas las viviendas deberán cumplir con las exigencias de acondicionamiento térmico que se señalan...”

Tabla 3: Exigencias mínimas de acondicionamiento térmico para las diferentes zonas térmicas.

ZONA	TECHUMBRE		MUROS		PISOS VENTILADOS	
	$\frac{U}{W/m^2 * K}$	$\frac{Rt}{m^2K/W}$	$\frac{U}{W/m^2 * K}$	$\frac{Rt}{m^2K/W}$	$\frac{U}{W/m^2 * K}$	$\frac{Rt}{m^2K/W}$
1	0,84	1,19	4,00	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,00	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,90	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,70	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,60	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,10	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,60	1,67	0,32	3,13

Todos los elementos perimetrales a excepción de la losa son compuestos, debido a que están formados por una serie de capas y para determinar su resistencia térmica total la norma NCh853 Of. 1991, establece en su página 5 que se debe calcular de la siguiente forma.

$$R_t = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se} \quad (1)$$

Donde:

- R_t : resistencia térmica total del elemento, se mide en $m^2 * K/W$.
- U : transmitancia térmica del elemento, se mide en $W/(m^2 * K)$.
- R_{si} : resistencia térmica de una superficie al interior de un edificio, se indica en la tabla 2 de la NCh 853 y se mide en $m^2 * K/W$.
- R_{se} : resistencia térmica de una superficie al exterior de un edificio, se indica en la tabla 2 de la NCh 853 y se mide en $m^2 * K/W$.
- e : espesor de la capa de material medido en metros.
- λ : conductividad térmica del material, se mide en $W/(m * K)$.

Los valores de R_{si} y R_{se} se subdividen en muros, piso y techumbre obtenidos de la tabla 1 de NCh 853 Of. 1991, siendo los valores utilizados presentados en la tabla 4 que corresponden a la condición de invierno. Es importante destacar que el techo constituye una cámara de aire no ventilada, el motivo de esto será explicado en el punto 4.2.

Tabla 4: Resistencia térmica de superficie en $m^2 * K/W$, utilizados en la investigación.

	Rsi	Rse
Muros	0,12	0,05
Techos	0,09	0,05
Pisos	0,17	0,05

Otro factor importante para tener en cuenta es el coeficiente volumétrico global de pérdidas térmicas por transmisión de la envolvente (G_{v1}), el que representa el “flujo térmico que es transmitido a través de la envolvente de un edificio (o parte de él) referido a la unidad de volumen, impulsado por diferencia unitaria de temperatura entre el ambiente interior y el ambiente exterior.” Según se especifica en NCh 1960 Of. 1989.

$$G_{v1} = \frac{\sum U * S}{V} \quad (2)$$

O bien

$$G_{v1} = \frac{\sum U_m * S_m + \sum U_t * S_t + \sum U_p * S_p + \sum U_v * S_v + \sum U_c * S_c}{V} \quad (3)$$

Donde

- U_m : transmitancia térmica de muros.
- U_t : transmitancia térmica de techo.
- U_p : transmitancia térmica de pisos.
- U_c : transmitancia térmica de puertas.
- U_v : transmitancia térmica de ventanas.
- S_m : superficie de muros.
- S_t : superficie de techo.

- S_p : superficie de pisos.
- S_c : superficie de puertas.
- S_v : superficie de ventanas.
- V: volumen encerrado por la envolvente considerada.

4.2 Cálculo envolvente térmica casa original.

Para el cálculo de envolvente térmica la normativa chilena entrega la información de conductividad térmica de cada material que se debe usar en los procesos de cálculos para envolvente térmica en el país. Esta información se encuentra en el anexo A del documento NCh853 Of. 1991. Los cálculos térmicos por elemento de la casa original se presentan en las tablas 5 a 8.

Tabla 5: Cálculo de resistencia térmica total y transmitancia térmica total para muros perimetrales del primer piso en vivienda existente.

Materiales	Densidad kg/m^3	λ $w/m * k$	espesor m	Resist. Térmica	
				e/λ m^2K/W	
Albañilería 14x29	1400	0,6	0,14	0,23	
Mortero de Cemento	2000	1,4	0,14	0,10	
				Rt	0,37
				U	2,70

Tabla 6: Cálculo de resistencia térmica total y transmitancia térmica total para muros perimetrales del segundo (zona 1) piso en vivienda existente.

Materiales	Densidad kg/m^3	λ $w/m * k$	espesor m	Resist. Térmica	
				e/λ m^2K/W	
Revestimiento exterior fibrocemento	1000	0,22	0,004	0,02	
Plancha Osb 10 mm (interior y exterior)	700	0,13	0,02	0,15	
Poliestireno expandido 50 mm	15	0,0413	0,05	1,21	
				Rt	1,55
				U	0,65

Tabla 7: Cálculo de resistencia térmica total y transmitancia térmica total para muros perimetrales del segundo (zona 2) piso en vivienda existente.

Materiales	Densidad kg/m^3	λ $w/m * k$	espesor m	Resist. Térmica	
				e/λ m^2K/W	
Revestimiento exterior fibrocemento	1000	0,22	0,004	0,02	
Plancha Osb 10 mm (interior y exterior)	700	0,13	0,02	0,15	
Estructura Pino Radiata 2x3" cepillado	410	0,104	0,065	0,63	
				Rt	0,97
				U	1,03

El segundo piso de la casa consta de muros estructurados en madera, por lo que existen dos tipos secciones transversales, el porcentaje de ocupación en todos los muros perimetrales del segundo nivel de la zona 1 es de un 91,8% y el de la zona 2 es de un 8,2%.

La techumbre está compuesta por dos capas, una externa y otra interna, para poder realizar el cálculo se debe determinar si se trata de una cámara de aire no ventilada, para esto se debe determinar la superficie total de orificios existentes entre la capa exterior e interior, también se necesita conocer el área total de la cámara. Así se puede determinar si el elemento se considera cámara de aire no ventilada, la que es descrita en la normativa NCh 853 Of. 1991 como:

“Se consideran las cámaras de aire como no ventiladas cuando se cumplen las siguientes condiciones:

$$S/A \text{ menor que } 3 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \text{ para elementos horizontales”}$$

Donde:

- S: superficie total de los orificios.
- A: área total de la cámara de aire.

Al no contar con registros de orificios se considera que no existen o son demasiado pequeños para ser considerados en relación con el área de 83 m^2 , por esto se asume cámara de aire no ventilada, por lo que el aire se mantiene en reposo y el cálculo se hace como se indica en la ecuación 4, despreciando el aporte de la capa exterior de la cámara. El cálculo térmico se presenta en la tabla 8.

$$R_T = \frac{1}{U} = 2R_{si} + R_i \quad (4)$$

Tabla 8: Cálculo de resistencia térmica total y transmitancia térmica total para elementos de techumbre para cámara de aire no ventilada en vivienda existente.

				Resist. Térmica	
	Materiales	Densidad kg/m^3	λ $\text{w}/\text{m} * \text{k}$	espesor m	e/λ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
Exterior	Teja asfáltica	1700	0,7	0,3	0,43
	Os b 16 mm	685	0,14	0,016	0,11
	Tijerales Pino	410	0,0413	0,05	1,21
	Fibrocemento	920	0,22	0,004	0,02
Interior	Plancha Yeso Carton	700	0,26	0,01	0,04
	Poliestireno expandido 100 mm	15	0,0413	0,1	2,42
				Rt	2,64
				U	0,38

4.3 Cálculo de coeficientes globales de pérdidas térmicas.

Para obtener estos coeficientes se debe contar con la superficie y transmitancia térmica de todos los elementos estudiados (muros y techo). No se consideran puertas ni ventanas ya que al seguir los mismos planos de arquitectura se utilizarán exactamente los mismos elementos en esos puntos.

Tabla 9: Volúmenes del complejo habitacional.

	Unidad
Volumen 1er piso	247,68 m^3
Volumen 2do piso	229,91 m^3
Volumen total	477,59 m^3

Es importante destacar que como la arquitectura no será modificada los valores volumétricos son los mismo para las dos viviendas.

Tabla 10: Valores de superficie y transmitancia térmica de elementos estudiados para el cálculo de G_{v1} .

Superficie	S m ²	U
Muro 1er piso	116,76	2,73
Muros 2do piso Zona 1	124,37	0,65
Muros 2do piso Zona 2	124,37	1,03
Techo	83	0,38
G _{v1} W/(m ³ *K)		1,19

4.4 Cálculo de envolvente térmica casa reestructurada en madera.

Los cálculos térmicos por elemento de la casa creada para el estudio se presentan en las tablas 11 a 13.

Tabla 11: Cálculo de resistencia térmica total y transmitancia térmica total para muros perimetrales (zona 1) en vivienda de madera.

Materiales	Densidad kg/m ³	λ w/m * k	espesor m	Resist. Térmica	
				e/λ m ² K/W	/W
Plancha doble yeso cartón 10 mm (interior)	700	0,26	0,02		0,08
Fibrocemento	920	0,22	0,004		0,02
Os b 10 mm exterior	700	0,13	0,01		0,08
Lana Mineral	40	0,055	0,1		1,82
				Rt	2,16
				U	0,46

Tabla 12: Cálculo de resistencia térmica total y transmitancia térmica total para muros perimetrales (zona 2) en vivienda de madera.

Materiales	Densidad kg/m ³	λ w/m * k	espesor m	Resist. Térmica	
				e/λ m ² K/W	/W
Fibrocemento	920	0,22	0,004		0,02
Os b 10 mm exterior	700	0,13	0,011		0,08
Estructura Pino Radiata 2x5" cepillado	410	0,114	0,065		1,10
Plancha doble yeso cartón 10 mm (interior)	700	0,26	0,02		0,08
				Rt	1,45
				U	0,69

Como la casa consta de muros estructurados en madera, existen dos tipos de secciones transversales. El porcentaje de ocupación en todos los muros perimetrales de la zona 1 es de un 91,8% y el de la zona 2 es de un 8,2%, esta información es necesaria para el cálculo de coeficientes globales de pérdidas térmicas.

Como se mencionó en el capítulo 4.2 la estructura de techo forma una cámara de aire no ventilada, la que no fue modificada para la reestructuración de la vivienda, por lo que se mantiene esta condición y se mantienen los mismos cálculos de envolvente térmica para el techo como se aprecia en la tabla 13.

Tabla 13: Cálculo de resistencia térmica total y transmitancia térmica total para techo en vivienda de madera.

				Resist. Térmica	
	Materiales	Densidad kg/m^3	λ $w/m * k$	espesor m	e/λ m^2K/W
Exterior	Teja asfáltica	1700	0,7	0,3	0,43
	Os b 16 mm	685	0,14	0,016	0,11
	Tijerales Pino	410	0,0413	0,05	1,21
	Fibrocemento	920	0,22	0,004	0,02
Interior	Plancha Yeso Carton	700	0,26	0,01	0,04
	Poliestireno expandido 100 mm	15	0,0413	0,1	2,42
				Rt	2,64
				U	0,38

4.5 Cálculo de coeficientes globales de pérdidas térmicas en casa de madera.

Como se mencionó anteriormente es necesario tener los valores de superficies y transmitancia térmica para obtener los coeficientes globales de pérdidas térmicas.

Tabla 14: Valores de superficie y transmitancia térmica de elementos estudiados para el cálculo de G_{v1}

Superficie	S m^2	%	S real m^2	U
Zona 1 Muro	241,133	0,918	221,4	0,47
Zona 2 Muro	241,133	0,082	19,8	0,69
Techo	83	1	83	0,38
$G_{v1} W/(m^3 * K)$				0,31

4.6 Resultados y conclusiones obtenidas mediante la normativa chilena.

Tabla 15: Verificación de cumplimiento con reglamento térmico en Chile para zona 4 en vivienda existente.

Superficie	U $W/(m^2 * K)$	Verificación	Exigencia mín.	Relación porcentual (%)
Muro 1er piso	2,73	No Cumple	1,70	160,43
Muros 2do piso Zona 1	0,65	Cumple	1,70	38,24
Muros 2do piso Zona 2	1,03	Cumple	1,70	60,59
Techo	0,38	Cumple	0,38	100,00
$G_{v1} W/(m^3 * K)$		1,19		

Tabla 16: Verificación de cumplimiento con reglamento térmico en Chile para zona 4 en vivienda de madera.

Superficie	U $W/(m^2 * K)$	Verificación	Exigencia mín.	Relación porcentual (%)
Zona 1 Muro	0,46	Cumple	1,70	27,06
Zona 2 Muro	0,69	Cumple	1,70	40,59
Techo	0,38	Cumple	0,38	100,00
$G_{v1} W/(m^3 * K)$		0,31		

En la tabla 15 se puede apreciar que los muros del primer piso no cumplen con la normativa chilena de reglamentación térmica, a pesar de esto la albañilería es una de las técnicas más recurrentes de construcción para casas lo que luego se traduce en mayores gastos para poder llegar a una temperatura de confort. Por otra

parte el segundo piso está diseñado en base a madera utilizando la técnica de pie derecho para realizar la estructuración al igual que en la casa creada para este estudio, la diferencia que se presenta entre estos dos casos es que la casa existente tiene un sistema de aislación compuesto por papel aislante para vapor y humedad pero principalmente con poliestireno expandido, material que garantiza una buena conductividad térmica como se observa en el punto 4.2, a un bajo costo y garantiza ser un material sustentable según sus desarrolladores. Esto le da una mejor transmitancia térmica que la de los materiales de la vivienda 2 la que a pesar de contar con la misma estructuración consta de una aislación térmica compuesta principalmente por lana mineral, que es lo más recurrente en Chile, por esto su utilización en el presente estudio. La vivienda original cumple con los requerimientos de la normativa chilena solo en su techo y en sus muros conformados por estructura de madera, en el caso del primer piso albañilería escapa por mucho a los límites establecidos anteriormente y al hacer el análisis comparativo en términos de envolvente térmica con la casa de madera se encuentra una clara ventaja de la casa de madera, además de presentar claras diferencias en sus coeficientes volumétricos globales de pérdidas térmicas, ya que la estructura existente presenta un 383,9% más de pérdidas que los $0,31 \text{ W/m}^3 \cdot \text{k}$ que ostenta la vivienda de madera. Por lo tanto, es fácil poder determinar que para este caso la estructuración en madera es la más eficiente térmicamente hablando.

5. CÁLCULOS TÉRMICOS BASADOS EN SOFTWARE DE SIMULACIÓN.

Con la normativa chilena se obtienen resultados de forma estacionaria, esto quiere decir que solo se analiza el peor de los casos (debido a ello se analizó solamente invierno). Es por esto que ambas viviendas se modelaron virtualmente en el software DesignBuilder Versión 5.0.3.007 el cual cuenta con climas anuales de varias ciudades de Chile, incluyendo Concepción. Aquí se dibujó la geometría indicada en los planos de arquitectura y luego se cargan los materiales y la ciudad para poder analizar de forma dinámica el comportamiento de ambas casas.

En el mercado existen varios programas que son capaces de realizar esto, pero para la elección de uno de ellos se utilizó el documento titulado “*EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA: ESTUDIO DEL CASO DE LA DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN EN VIVIENDAS EN CONCEPCIÓN*” del arquitecto chileno Alex González, en el cual el autor realiza una comparación de varios softwares que permiten realizar un análisis térmico, comparando calidad de resultados, interfaz, facilidad para aprender su manejo, entre otros puntos. Aquí se concluye que programa que reúne las mejores características y es más completo es DesignBuilder, sobre todo en su capacidad y confiabilidad de resultados como se observa en la figura 8. El estudio de este artículo se basó en crear una vivienda ficticia, emplazada en Concepción, Chile y ensayarla en los diferentes softwares. Esto resulta bastante beneficioso, ya que se utiliza el mismo emplazamiento para la casa estudiada actualmente.

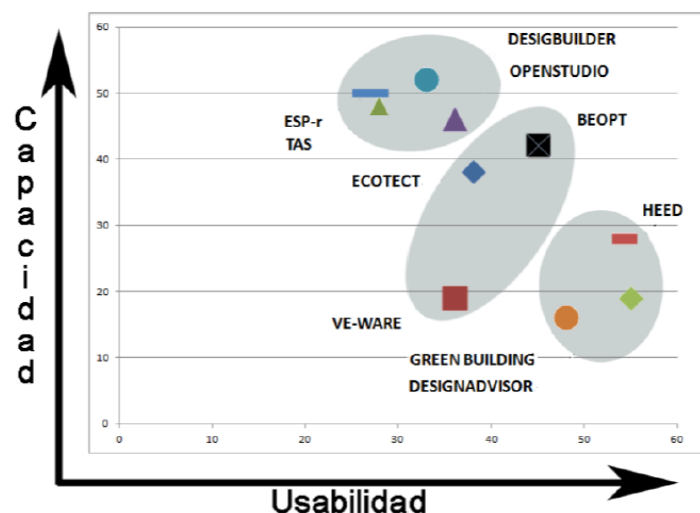


Figura 8: Tabla comparativa de softwares extraída de “*EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA: ESTUDIO DEL CASO DE LA DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN EN VIVIENDAS EN CONCEPCIÓN*”.

Con las viviendas dibujadas, materiales y clima asignado se pueden obtener diferentes resultados para diferentes periodos de tiempo y las visualizaciones del modelo (figuras 9 y 10).



Figura 9: Visualización de casa existente en DesignBuilder.



Figura 10: Visualización de casa estructurada en madera en DesignBuilder.

Para seguir con la lógica de la normativa chilena sólo se dibujan los muros perimetrales, techo y piso, DesignBuilder tiene la capacidad de calcular costos cuando se modela toda la estructura, pero para este caso no es necesario ya que ese cálculo se hace mediante análisis de precio unitario (APU).

Es necesario saber que el programa trabaja con una temperatura de confort de 19, 7° C y humedad relativa de 56,5%. De toda la información que se puede extraer la más relevante para la investigación es la pérdida de energía a través de muros, ganancias de energía a través del sol, energía que es necesaria extraer o ingresar para llegar a la temperatura de confort y también las infiltraciones que tienen las viviendas desde el exterior. Del diseño virtual se obtienen los valores anuales en los gráficos 1 y 2.

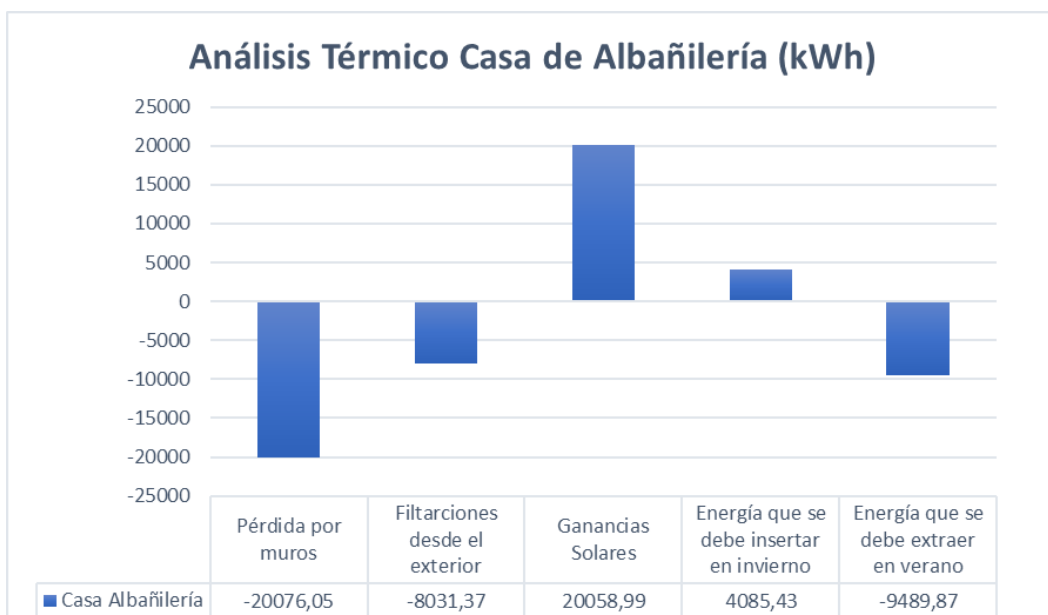


Gráfico 1: Resultados anuales de casa de albañilería obtenidos de DesignBuilder.

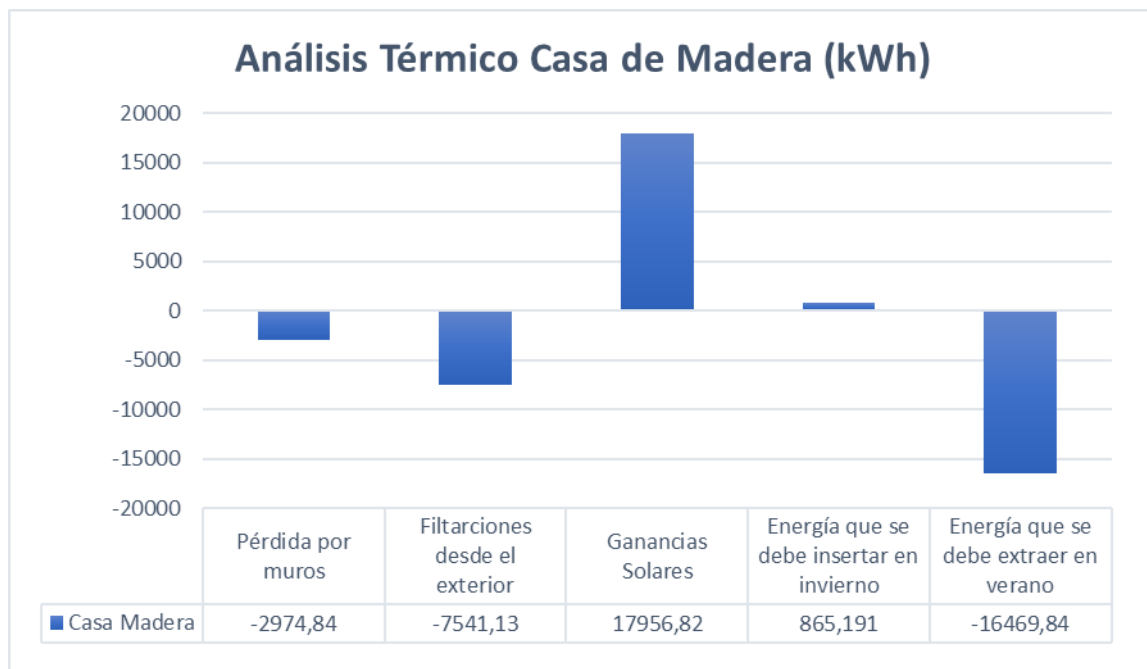


Gráfico 2: Resultados anuales de casa de madera obtenidos de DesignBuilder.

5.1 Resultados y conclusiones obtenidas mediante normativa internacional.

De los gráficos se obtienen los resultados presentados en la tabla 17.

Tabla 17: Comparación de resultados anuales obtenidos en DesignBuilder.

	Casa albañilería (kWh)	Casa Madera (kWh)	Relación porcentual (%)
Pérdida por muros	-20076,05	-2974,84	14,82
Filtaraciones desde el exterior	-8031,37	-7541,13	93,90
Ganancias Solares	20058,99	17956,82	89,52
Energía que se debe insertar en invierno	4085,43	865,191	21,18
Energía que se debe extraer en verano	-9489,87	-16469,84	173,55

De la tabla 17, se obtiene que la casa existente tiene pérdidas térmicas a través de sus muros mucho más grandes que las que se observan en la vivienda 2 las que representan un 14,82%, en comparación con la casa existente. Otro punto en el que se observan resultados muy diferentes es la energía que se debe insertar en ambas viviendas para lograr una temperatura de confort en invierno, ya que en la casa de madera debe recibir un 21,18% de la energía que necesita la vivienda existente para poder calefaccionar, lo que proporciona un cantidad de dinero importante en invierno para poder calefaccionar de forma adecuada, esto no solo representa ahorro económico sino que también es un aporte al medio ambiente reduciendo las emisiones por quema de madera o calefacción por gas. Por otra parte, en invierno es la casa existente la que presenta un mejor comportamiento ya que en verano para lograr enfriar la casa de madera se necesita un 173,55% de la energía necesaria en la casa de existente. De esto se puede apreciar que en invierno la vivienda de madera presenta un comportamiento bastante mejor que la casa existente, ya que tiene pérdidas de muros muy bajas comparativamente, de igual forma con la energía que se necesita insertar para calefaccionar la vivienda, pero en verano su temperatura aumenta bastante y se necesita extraer bastante energía para poder refrigerar la casa, de todas formas es mucho menos la energía que se debe insertar en invierno que la que se necesita extraer en verano en la casa de madera comparada con la de albañilería, lo que desde el punto de vista de los resultados obtenidos por esta parte del análisis la casa re-estructurada en madera es más eficiente térmicamente.

Otro resultado que se puede obtener de este programa es la huella de carbono que presentas las viviendas, un punto importante a estudiar en la construcción sustentable, el cuál es calculado en base a los materiales con los

que está construida la edificación. En este caso la vivienda nueva posee una huella equivalente en CO_2 de 21284,5 $kgCO_2$ y la existente de 74277,6 $kgCO_2$, es decir, la casa de madera representa un 28,66% de huella de carbono en relación a la original, lo que indica que la casa estructurada en base a madera es más amigable con el medio ambiente.

6. CÁLCULOS DE COSTOS ECONÓMICOS.

Para determinar las diferencias económicas que existen entre las viviendas se realizan análisis de precio unitario, desde ahora APU, de los muros exteriores ya que es lo único que se cambia entre estas. Los precios de materiales fueron obtenidos del retail en Concepción y los rendimientos de la mano de obra como sus pagos fueron facilitados por SocoArte Constructora.

6.1 Análisis de precio unitario vivienda existente.

Los análisis de precio unitario de la casa existente se presentan desde la tabla 18 a la 22.

Tabla 18: APU albañilería.

ALBAÑILERIA (LADRILLOS - MORTERO)									
Unidad	\$/m2								
Item	Unidad	Rendimiento unitario	Unidad	Rendimiento Conjunto	Unidad	P.U	Unidad	P. Total	Unidad
Mano de obra									
Albañil 1	día	12	m2/día	28	m2/día	35000	\$/día	1250	\$/m2
Ayudante 1	día	8	m2/día	28	m2/día	20000	\$/día	714	\$/m2
Ayudante 2	día	8	m2/día	28	m2/día	20000	\$/día	714	\$/m2
Leyes sociales (20%)	%	0,2						1154	\$/m2
Materiales									
Ladrillo 29x14x7.1cm	U	0,021	m2/U	0,021	m2/U	250	\$/U	11905	\$/m2
Cemento polpaico (42.5 kg)	saco	0,867	m2/saco	0,867	m2/saco	4874	\$/saco	5622	\$/m2
Arena gruesa (25lts)	saco	0,167	m2/saco	0,167	m2/saco	860	\$/saco	5150	\$/m2
Gravilla (40kg)	saco	0,19	m2/saco	0,19	m2/saco	860	\$/saco	4526	\$/m2
Perdidas	%	5	%					1360	\$/m2
								Total partida	32395 \$/m2

Tabla 19: APU columnas.

HORMIGÓN COLUMNAS (PISO 1)									
Unidad	\$/m3								
Item	Unidad	Rendimiento unitario	Unidad	Rendimiento Conjunto	Unidad	P.U	Unidad	P. Total	Unidad
Mano de obra									
Maestro 1	día	10	m3/día	22	m3/día	30000	\$/día	\$ 2.000	\$/m3
Ayudante 1	día	6	m3/día	22	m3/día	15000	\$/día	\$ 1.000	\$/m3
Ayudante 2	día	6	m3/día	22	m3/día	15000	\$/día	\$ 1.000	\$/m3
Leyes sociales (20%)	%	0,2						\$ 800	\$/m3
Equipo									
Maquina Vibradora	día	20	m3/día	15	m3/día	18000	\$/m3	\$ 1.200	\$/m3
Betonera	día	15	m3/día	15	m3/día	12000	\$/m3	\$ 800	\$/m3
Materiales									
Gravilla	m3	0,034	m3/m3			860	\$/m3	\$ 27.318	\$/m3
Cemento Polaico	saco	0,1	m3/saco			4874	\$/saco	\$ 52.639	\$/m3
Arena Gruesa	m3	0,037	m3/m3			860	\$/m3	\$ 25.103	\$/m3
Perdidas	%	5	%					\$ 5.253	\$/m3
								Total partida	\$ 117.113 \$/m3



Tabla 20: APU vigas.

HORMIGÓN VIGAS										
Unidad	\$/m3									
Item	Unidad	Rendimiento unitario	Unidad	Rendimiento Conjunto	Unidad	P.U	Unidad	P. Total	Unidad	
Mano de obra										
Maestro 1	día	10	m3/día	22	m3/día	30000	\$/día	\$ 2.000	\$/m3	
Ayudante 1	día	6	m3/día	22	m3/día	15000	\$/día	\$ 1.000	\$/m3	
Ayudante 2	día	6	m3/día	22	m3/día	15000	\$/día	\$ 1.000	\$/m3	
Leyes sociales (20%)	%	0,2						\$ 800	\$/m3	
Materiales										
Cemento polpaico (42.5 kg)	saco	0,1	m3/saco			4874	\$/saco	\$ 52.639	\$/m3	
Arena gruesa (25lbs)	saco	0,037	m3/saco			860	\$/saco	\$ 25.103	\$/m3	
Gravilla (40kg)	saco	0,034	m3/saco			860	\$/saco	\$ 27.318	\$/m3	
Perdidas	%	5	%					\$ 5.253	\$/m3	
Equipos										
Maquina vibradora	día	20	m3/día	15	m3/día	18000	\$/día	\$ 1.200	\$/m3	
Betonera	día	15	m3/día	15	m3/día	12000	\$/día	\$ 800		
								Total partida	\$ 117.113	\$/m3

Tabla 21: APU muros exteriores segundo piso.

MUROS 2DO PISO EXTERIOR										
Unidad	\$/m2									
Item	Unidad	Rendimiento unitario	Unidad	Rendimiento Conjunto	Unidad	P.U	Unidad	P. Total	Unidad	
Mano de obra										
Carpintero	día	14	m2/día	34	m2/día	20000	\$/día	588	\$/m2	
Ayudante 1	día	10	m2/día	34	m2/día	15000	\$/día	441	\$/m2	
Ayudante 2	día	10	m2/día	34	m2/día	15000	\$/día	441	\$/m2	
Leyes sociales (20%)	%	0,2						294	\$/m2	
Materiales										
Pieza PinoRadiata 2x7 cep	un	2,5	m2/un	2,5	m2/un	5040	\$/un	2016	\$/m2	
Aislapol 50 mm 1,2x0,6	un	0,72	m2/un	0,72	m2/un	1166	\$/un	1619	\$/m2	
Clavos	kg	8,9	m2/kg	8,9	m2/kg	2450	\$/kg	275	\$/m2	
OSB 1.2*2.4 EXT	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	13400	\$/un	4653	\$/m2	
OSB 1.2*2.4 INT	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	13400	\$/un	4653	\$/m2	
Perdidas	%	5	%					661	\$/m2	
								Total partida	15642	\$/m2

Tabla 22: APU muros interiores.

MUROS INTERIOR										
Unidad	\$/m2									
Item	Unidad	Rendimiento unitario	Unidad	Rendimiento Conjunto	Unidad	P.U	Unidad	P. Total	Unidad	
Mano de obra										
Carpintero	día	45	m2/día	115	m2/día	20000	\$/día	174	\$/m2	
Ayudante 1	día	35	m2/día	115	m2/día	15000	\$/día	130	\$/m2	
Ayudante 2	día	35	m2/día	115	m2/día	15000	\$/día	130	\$/m2	
Leyes sociales (20%)	%	0,2						87	\$/m2	
Materiales										
Pieza PinoRadiata 2x7 cep	un	2,5	m2/un	2,5	m2/un	5040	\$/un	2016	\$/m2	
Clavos	kg	8,9	m2/kg	8,9	m2/kg	2450	\$/kg	275	\$/m2	
OSB 1.2*2.4 EXT	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	13400	\$/un	4653	\$/m2	
OSB 1.2*2.4 INT	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	13400	\$/un	4653	\$/m2	
Perdidas	%	5	%					580	\$/m2	
								Total partida	12698	\$/m2

6.2 Análisis de precio unitario vivienda reestructurada en madera.

Los análisis de precio unitario de la edificación basada en madera se presentan de la tabla 23 y 24.

Tabla 23: APU muros exteriores.

MUROS EXTERIOR										
Unidad	\$/m2									
Item	Unidad	Rendimiento unitario	Unidad	Rendimiento Conjunto	Unidad	P.U	Unidad	P. Total	Unidad	
Mano de obra										
Carpintero	día	14	m2/día	34	m2/día	20000	\$/día	588	\$/m2	
Ayudante 1	día	10	m2/día	34	m2/día	15000	\$/día	441	\$/m2	
Ayudante 2	día	10	m2/día	34	m2/día	15000	\$/día	441	\$/m2	
Leyes sociales (20%)	%	0,2						294	\$/m2	
Materiales										
Pieza PinoRadiata 2x5 cep	un	2,5	m2/un	2,5	m2/un	5040	\$/un	2016	\$/m2	
Clavos	kg	8,9	m2/kg	8,9	m2/kg	2450	\$/kg	275	\$/m2	
Plancha Yeso Carton 1.2*2.4 M	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	6990	\$/un	2427	\$/m2	
Osib 1.2*2.4	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	13400	\$/un	4653	\$/m2	
Membrana Tyvek	rollo	125	m2/rollo	125	m2/rollo	125990	\$/rollo	1008	\$/m2	
Aislación Vapor	m2	0,5	m2/m2	0,5	m2/m2	2000	\$/m2	4000	\$/m2	
Lana Mineral 12*1.2*0.05 m	rollo	7,2	m2/rollo	7,2	m2/rollo	31550	\$/rollo	4382	\$/m2	
Fibrocemento 1200*2400*4	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	7990	\$/un	2774	\$/m2	
Perdidas	%	5	%					1077	\$/m2	
								Total partida	24377	\$/m2

Tabla 24: APU muros interiores.

MUROS INTERIOR										
Unidad	\$/m2									
Item	Unidad	Rendimiento unitario	Unidad	Rendimiento Conjunto	Unidad	P.U	Unidad	P. Total	Unidad	
Mano de obra										
Carpintero	día	16	m2/día	40	m2/día	20000	\$/día	500	\$/m2	
Ayudante 1	día	12	m2/día	40	m2/día	15000	\$/día	375	\$/m2	
Ayudante 2	día	12	m2/día	40	m2/día	15000	\$/día	375	\$/m2	
Leyes sociales (20%)	%	0,2						250	\$/m2	
Materiales										
Pieza PinoRadiata 2x5 cep	un	2,5	m2/un	2,5	m2/un	5040	\$/un	2016	\$/m2	
Clavos	kg	8,9	m2/kg	8,9	m2/kg	2450	\$/kg	275	\$/m2	
Yeso Carton 1.2*2.4 EXT	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	6990	\$/un	2427	\$/m2	
Yeso Carton 1.2*2.4 INT	un	2,88	m2/un	2,88	m2/un	6990	\$/un	2427	\$/m2	
Perdidas	%	5	%					357	\$/m2	
								Total partida	9003	\$/m2

6.3 Conclusiones y análisis APU para ambas casas.

Considerando que ambos complejos habitacionales tienen la misma cantidad de muros externos e internos y basado en los resultados obtenidos de cada APU, se determina que la construcción basada en madera es bastante más económica por el orden de los \$2.500.000 aproximadamente, además tiene un menor tiempo de ejecución lo que sigue disminuyendo los costos, debido a que la casa de albañilería tiene vigas, columnas y losas de hormigón las que deben dejarse fraguando, lo que hace las faenas más lentas y se traduce en tener que pagar por más tiempo la mano de obra.

7. CONCLUSIONES.

Luego de realizar un exhaustivo análisis de gastos térmicos tanto con normativas nacionales y estacionarias como con modelación virtual y dinámicas se consiguieron resultados bastante similares, obteniendo en la gran mayoría de las pruebas como conclusión que la vivienda que presenta un mejor comportamiento térmico sobre todo en invierno es la casa creada para este estudio. Esto a grandes rasgos se transforma en un ahorro económico para los habitantes debido a que los gastos en calefacción son bastante menores, como se mostró con anterioridad. Otro punto bastante relevante es que dicha vivienda cumple en toda su envolvente térmica con la normativa chilena, no así la edificación existente, que no cumple con sus muros de albañilería sobrepasando en un 160,43% los límites establecidos por los entes reguladores nacionales. En verano es diferente y los papeles se invierten, la casa de albañilería es más fresca y no hay mucha necesidad de enfriar el ambiente con elementos externos. Por otra parte, la de madera si necesita ser refrescada para lograr un confort, para esto la publicación “Manual de Diseño, construcción, montaje y aplicación de envolventes para la vivienda de madera”, en donde se reconoce el problema de sobre calentamiento de estas estructuras, pero en el capítulo G se propone el uso de muros con piel exterior ventilada, ya que al generar una cámara de aire la que reduce la variación de temperatura al interior de la edificación (figura 11), mediante experimentación se determinó que con 22 mm de cámara de aire ventilada exterior y en la figura 12 se aprecian las diferencias de temperatura obtenidas gracias a la cámara de aire, de esta forma se logra enfriar el conjunto habitacional para lograr equiparar las temperaturas de verano entre las dos viviendas estudiadas.

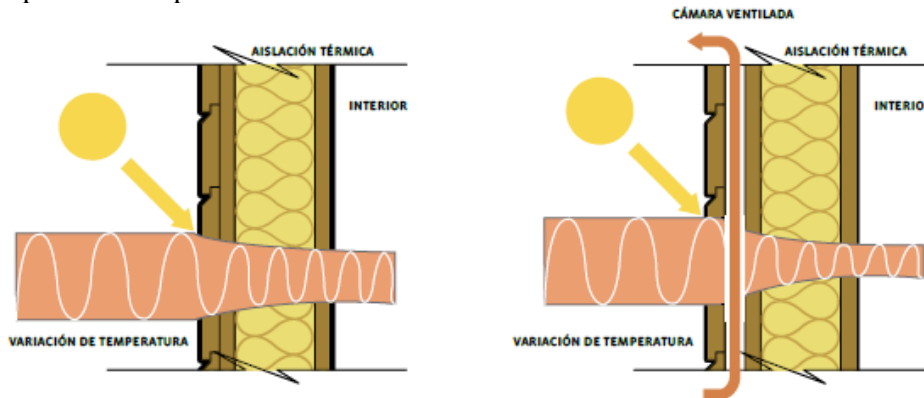


Figura 11: Transmisión de la oscilación térmica: Muro con piel exterior ventilada en comparación con muro sin piel ventilada. Extraída de manual de diseño. Construcción, montaje y aplicación de envolventes para la vivienda de madera.

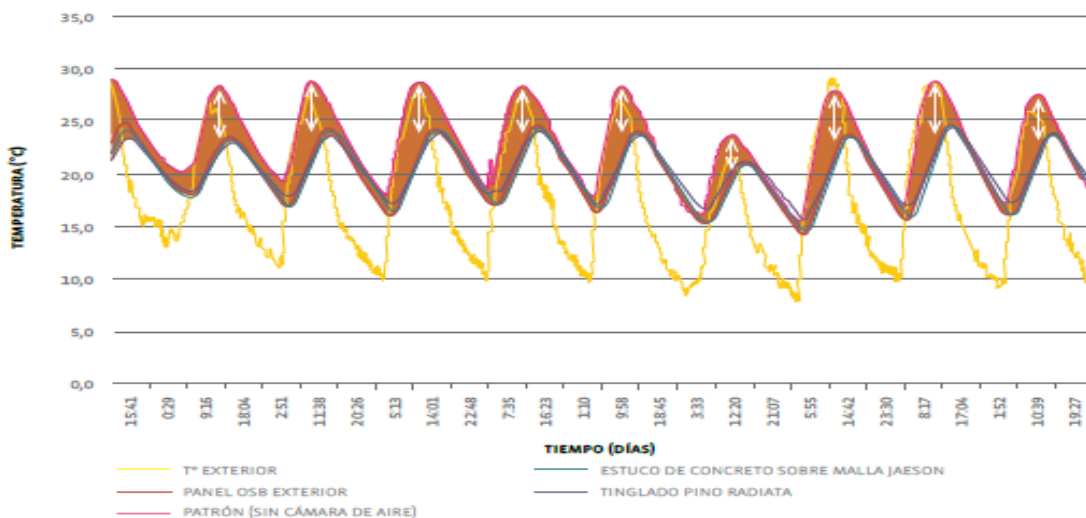


Figura 12: Variación de temperatura ambiental exterior e interior en módulos con diferentes tipos de envolvente de madera. Extraída de manual de diseño. Construcción, montaje y aplicación de envolventes para la vivienda de madera.

Por lo tanto, se concluye que al tener una vivienda que se puede construir en madera o en una técnica más tradicional como albañilería eligiendo utilizar el material extraído de los árboles, se logran no solo menores costos, también se obtiene una eficiencia térmica mucho mayor no por la madera en sí, sino porque al tener los muros hechos en base a pie derecho se cuenta con una gran cantidad de espacio dentro él, que es llenado con material aislante que proporciona un confort según lo establecen las normas nacionales, especialmente en invierno. Además, se considera que la madera es un tipo de construcción sustentable lo que se demuestra según la huella de carbono que se obtuvo en el capítulo 6, logrando así cumplir con los objetivos establecidos y demostrando científicamente las bondades térmicas y económicas que tiene la construcción en madera.

8. AGRADECIMIENTOS.

¹. Quiero agradecer a mi familia por siempre creer en mí, muchas veces más que yo mismo, a mi padre por hacerme entender que la única forma de surgir es con trabajo, esfuerzo y disciplina, a mi madre por enseñarme el valor del afecto, la familia y a M. Henríquez por apoyarme cada día. A la familia Osbén-Muñoz por cuidarme, ser mi familia penquista y hacerme sentir uno más de ellos. A mis abuelos por su constante preocupación. J. Pizarro por ser un pilar fundamental en los años más difíciles de Universidad. A mis amigos de Universidad ya que juntos llegamos lejos. Y sobre todo a O. A. C. C. por ser mi inspiración y mi ejemplo que seguir, de él aprendí en carne propia el valor del trabajo desde pequeño, que sin esfuerzo no hay recompensa, que la sabiduría no se aprende en ninguna escuela y que es más valioso ser sabio y respetado que cualquier cartón.

9. REFERENCIAS.

- Aroca, J (2010). *Vivienda Unifamiliar Loteo El Venado IV Etapa. Especificaciones Técnicas*.
- Baeza, A. (2016), *¿Cómo están distribuidas y construidas las viviendas residenciales en Chile?*. La Tercera.
- CORMA (2016). *Chile debe ser referente de la construcción sustentable en madera*. <http://www.corma.cl/corma-al-dia/nacional/-chile-debe-ser-referente-de-construccion-sustentable-en-madera>.
- Construcción Sustentable (2016). *Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile Tomo II Energía*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- ED11 (2014). *Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo-DITEC.
- ELIGEMADERA. (2017). *Cálculo estructural en madera*. Corporación del Fomento de la Producción.
- Fritz, A y Ubilla, M. (2012). *Manual de diseño. Construcción, montaje y aplicación de envolventes para la vivienda en madera*. FONDEF.
- González, A. (2012). *Evaluación de Herramientas de Simulación Energética: Estudio del Caso de la Determinación de la demanda de Calefacción en Viviendas en Concepción*. Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bio-Bio.
- González, M. (2013). *Bases de un sistema de certificación de madera para uso estructural en Chile*. Universidad del Bio-Bio.
- González, M. (2008). *Bienestar Habitacional y Eficiencia Energética de Viviendas Sociales Industrializadas Estructuradas con Madera de Pino Radiata*. Departamento de Ingeniería de la Madera, Universidad de Chile.
- LP BUILDING PRODUCTS, (2009). *Propiedades Físicas de Tableros LP OSB*.

Manual de Aplicación Térmica (2006). *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones Artículo 4.1.10*. Instituto de la Construcción, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

NCh853 (1991). *Acondicionamiento térmico – Envolvente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas*. Norma Chilena Oficial. Instituto Nacional de Normalización.

NCh1960. (1986). *Aislación térmica – Cálculo de coeficientes volumétricos globales de pérdidas térmicas*. Norma Chilena Oficial. Instituto Nacional de Normalización.

Rodríguez, G. (2008). *Clima y Construcción habitacional. Conceptos térmicos*. IDIEM, Universidad de Chile.

Rodríguez, G. (2008). *Confort*. IDIEM, Universidad de Chile.