



TESIS MHSEE - UNIVERSIDAD DEL BIO BIO

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE SOLUCIONES DE ENVOLVENTE VERTICAL DE
MADERA APLICADAS A ESTABLECIMIENTOS EDUCACIONALES.**

AUTOR:

Jeremy Piggot Navarrete

PROF. GUÍA:

Beatriz Piderit Moreno

CO – GUÍA:

Pierre Blanchet

CONCEPCIÓN, Septiembre de 2017

RESUMEN

Hoy en día gran cantidad de establecimientos educacionales chilenos posee deficiencias en su desempeño térmico y energético, lo que atenta en contra del desarrollo óptimo de las actividades educativas y genera grandes gastos energéticos y monetarios. Se han implementado ciertas medidas destinadas a evaluar y solucionar este problema, sin embargo aún quedan varios puntos sin resolver, entre ellos la incorporación de la madera como material eficiente de construcción que además abunda en el país.

Este estudio se enfoca en la evaluación de los efectos energéticos de la incorporación de soluciones eficientes de envolvente vertical de madera en establecimientos educacionales de la zona austral de Chile. Para lograrlo se toman como referencia seis soluciones constructivas constituidas de tabiquería de madera utilizadas en establecimientos educacionales en Canadá ya que, al poseer un contexto climático similar y grandes avances en el perfeccionamiento de la construcción en madera, este país representa el mejor ejemplo que se puede tomar para Chile. Las soluciones constructivas seleccionadas (tabiquería simple de 2"x4", tabiquería de 2"x4" con aislación continua de 2", tabiquería de 2"x4" con aislación continua de 4", doble tabiquería con aislación continua de 2" y doble tabiquería con aislación continua de 4") son evaluadas a nivel de flujo térmico para identificar la influencia de sus respectivos puentes térmicos, de manera posterior se evalúa su desempeño energético para entender los efectos que generan en la demanda energética de establecimientos educacionales de la zona austral de Chile y finalmente se analiza la relación entre el costo y el beneficio generado por cada una de ellas.

En los resultados se puede observar que todas las soluciones constructivas analizadas generan beneficios a nivel energético en establecimientos de la zona austral de Chile, sin embargo, al aplicar la variable económica (costos de construcción y ahorro monetario en energía) las soluciones de tabiquería simple de 2"x4", tabiquería de 2"x4" con aislación continua de 2" y la doble tabiquería con aislación continua de 2" aparecen como las mejores opciones para incorporar en envolventes verticales dependiendo del presupuesto inicial que se posee.

Palabras clave: *Evaluación Energética, Envolvente Vertical, Madera, Establecimientos Educacionales.*

ABSTRACT

Nowadays, a large number of Chilean educational establishments present deficiencies in their thermal and energetic performance; this is attentive to the optimal development of educational activities and generates large energy and monetary expenditures. Certain measures have been implemented to evaluate and solve this problem, however there are still several unresolved points, including the incorporation of wood as an efficient building material that also abounds in Chile.

This study is focused on the evaluation of the energetic effects of the incorporation of efficient wood vertical envelope constructive solutions in educational establishments of the Austral Zone of Chile. In order to achieve this, six constructive wood-frame solutions used in the construction of educational establishments in Canada are taken as reference. The selected constructive solutions (2"x4" wood-frame, 2"x4" wood-frame with 2" continuous insulation, 2"x4" wood-frame with 4" continuous insulation, Double wood-frame with 2" continuous insulation, Double wood-frame with 4" continuous insulation) are evaluated at thermal flow level to identify the influence of their respective thermal bridges, subsequently their energy performance is evaluated in order to understand the effects generated in the energy demand of educational establishments in the southern zone of Chile and finally the relation between the cost and the benefit generated is analyzed for each solution.

The results show that all the analyzed constructive solutions generate energetic benefits in establishments of the Austral zone of Chile, however, by applying the economic variable (cost of construction and monetary energy savings) the 2"x4" wood-frame, 2"x4" wood-frame with 2" continuous insulation, and Double wood-frame with 2" continuous insulation solutions appear as the best options to apply on vertical envelopes, depending on the initial budget.

Key Words: *Energetic evaluation, Vertical Envelope, Wood, Educational Establishments*

INDICE

1. ANTECEDENTES	6
1.1 Introducción	6
1.2 Problemática de investigación:	8
1.2.1 Guías y recomendaciones.....	8
1.2.2 Construcción con madera en Chile	9
1.3 Hipotesis	10
1.4 Objetivos:.....	10
1.5 Metodología:.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Lugares de estudio.....	13
2.1.1 ¿Por qué tomar como ejemplo a Canadá?.....	13
2.1.2 ¿Por qué aplicar lo estudiado en la zona austral de Chile?	14
2.2 Análisis del cuadro normativo térmico presente en Canadá y Chile	17
2.2.1 National Building Code of Canada.....	18
2.2.2 Normativa térmica chilena	20
2.2.3 Términos de Referencia estandarizados TDRe.....	21
2.3 Beneficios del uso de madera en edificios:.....	23
2.4 ¿Qué será considerado como “eficiente” en este estudio?	23
2.5 Estrategias utilizadas en establecimientos educacionales en Canadá.....	24
3. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE ENVOLVENTE VERTICAL CONSIDERADAS.....	29
3.1 Muros eficientes de tabiquería de madera utilizados en Canadá	32
3.1.1 Tabiquerías de madera de 2”x4” o 2”x6”	33
3.1.2 Tabiquerías de madera con aislación rígida continua.....	35
3.1.3 Tabiquería doble con aislación interior continua	36
3.2 Cumplimiento de estándares planteados.....	37
4. ESTUDIOS DE DESEMPEÑO TÉRMICO.....	38
4.1 Estudios de flujo térmico (Simulación de transmisión de calor)	39
4.1.1 Parámetros de entrada	39
4.1.2 Muro “Base”	44

4.1.3 Muros eficientes de madera	49
4.1.4 Síntesis del análisis de flujo térmico	65
4.2 Estudio aplicado de flujo térmico	66
4.2.1 Diseño del cubículo de prueba.....	66
4.2.2 Construcción del cubículo de prueba.....	68
4.2.3 Mediciones.....	75
4.2.4 Resultados.....	76
4.3 Simulación energética	80
4.3.1: Modelo tridimensional en DesignBuilder (Pabellón de aulas).....	80
4.3.2 Resultados de simulación	89
4.3.3 Comparación de resultados	93
5. COSTOS ASOCIADOS.....	95
5.1 Costo de incorporación de muros en envolvente.....	95
5.1.1 Costo total de muros (por m ²).....	98
5.1.2 Costo total de muros (Pabellón de aulas analizado)	100
5.2 Costo de la energía.....	101
5.3 Relación costo de envolvente / Ahorro energético	102
6. CONCLUSIONES:	106
6.1 Propuestas de trabajos futuros:.....	109
7. BIBLIOGRAFÍA.....	110
ANEXO 1.....	112
ANEXO 2.....	118
ANEXO 3.....	130

1. ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Los establecimientos educacionales se presentan ante la sociedad como el instrumento que hace posible el desarrollo óptimo de la formación de individuos, facilitando la dirección, transferencia y promoción del conocimiento (Okolie, 2011). Estos establecimientos poseen un rol fundamental en el desarrollo del país ya que son un medio, a veces el único, que entrega las herramientas necesarias para posibilitar el ascenso social de las personas, mejorando su calidad de vida e influyendo directamente en la disminución de los índices de pobreza. Sin embargo, el rendimiento de los jóvenes y niños, quienes pasan al menos un 70% de su tiempo en estos establecimientos, se ve influenciado directamente por el confort y bienestar que se les ofrece al interior de los espacios de aprendizaje (Tookaloo & Smith, 2015).

Un edificio, especialmente uno relacionado al área educacional, debería ser capaz de llevar a cabo todas sus funciones de manera tal que asegure satisfacción para sus usuarios, sin embargo para mantener las condiciones interiores necesarias en un ambiente de aprendizaje óptimo, se debe suplir la demanda energética generada por este y si las propiedades térmicas de sus elementos constructivos no son capaces de evitar pérdidas excesivas de calor, las demandas de calefacción generadas pueden crecer bastante (Nawawi & Khalil, 2008).

Hoy en día gran parte de los establecimientos educacionales en Chile posee problemas de desempeño térmico, lo que conlleva al gasto de grandes cantidades de dinero adicionales en calefacción, especialmente en los meses de invierno. Desde hace algunos años el Ministerio de educación, en conjunto con otras entidades, ha estado tomando una serie de medidas destinadas a evaluar y solucionar los problemas energéticos en el sector educacional, como por ejemplo, el Proyecto INNOVA-CORFO “Evaluación de estrategias de diseño constructivo y de estándares de calidad ambiental y uso eficiente de energía en edificaciones públicas, mediante monitorización de edificios construidos” el cual consistió en la monitorización de edificios públicos (entre ellos los establecimientos educacionales) con el objetivo de desarrollar un método de evaluación y certificación para estos. Otro ejemplo es la participación en el proyecto BID “Aprendizaje en las escuelas del siglo XXI” el cual se llevó a cabo en 12 países de Latinoamérica y el Caribe, y su objetivo fue la realización de proyectos que analicen la relación entre la infraestructura escolar y el rendimiento en el aprendizaje de los alumnos, tomando en cuenta el confort interior de los establecimientos. Además se han elaborado guías y manuales cuyo objetivo es asistir a diferentes tipos de profesionales en el marco de una educación más eficiente. Sin embargo, aún hay muchos puntos relacionados al mejoramiento energético de los establecimientos educacionales en los que se puede seguir avanzando.

Tomando en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, la incorporación de un material que posee buenas propiedades térmicas y existe en abundancia en nuestro país, como lo es la madera, en la envolvente de establecimientos educacionales podría generar una serie de beneficios, tanto a nivel energético como ambiental, sin embargo para lograrlo es necesario estudiar su funcionamiento tomando como referencia lugares en los que se haya incorporado con éxito. En ese contexto, Canadá se presenta como la mejor opción gracias al largo historial que posee en relación a la utilización y perfeccionamiento de técnicas de construcción con madera, y a que posee zonas en las que las condiciones climáticas son similares a parte de Chile.

También se debe tener en cuenta que en la envolvente de un establecimiento de mediana altura los elementos verticales, tales como los muros y sus respectivas uniones con otros elementos constructivos, son aquellos que predominan en superficie por lo que su desempeño térmico puede llegar a generar altos impactos (positivos o negativos) en la demanda energética. Además la modificación de su composición en la fase de diseño no conlleva a grandes complicaciones por lo representan un buen punto de estudio.

En base a todo lo mencionado, se presenta a continuación un estudio que se enfoca en la evaluación de los efectos energéticos generados por diferentes soluciones eficientes de envolvente vertical de madera, aplicadas en establecimientos educacionales de la zona austral de Chile. Se toman como referencia soluciones constructivas de muro utilizadas en zonas de Canadá cuyas condiciones climáticas son similares a Chile. Este estudio se ha desarrollado dentro del marco de una pasantía de investigación realizada desde el día 29 de enero de 2017 con una duración de 6 meses en la Universidad Laval (ULaval) ubicada en la ciudad de Quebec, Canadá. Esta pasantía se ha realizado bajo la tutela de Pierre Blanchet, PhD en ingeniería de la madera y director de postgrado ULaval como co-guía de tesis.

1.2 Problemática de investigación:

Los establecimientos educacionales con desempeño térmico deficiente son una realidad bastante común en Chile, especialmente en la zona austral del país donde los climas son más fríos y extremos, generando un gasto excesivo de dinero en energía por las altas demandas de calefacción que poseen. Además muchas veces dicha demanda se suple con sistemas de calefacción que liberan grandes cantidades de humedad al entorno como lo son el gas natural y la parafina, creando condiciones propicias para enfermedades respiratorias en los usuarios.

1.2.1 Guías y recomendaciones.

Toda mejora a nivel de desempeño térmico en un establecimiento debe partir por incorporar estrategias de diseño pasivo consistentes que permitan disminuir al máximo las pérdidas de calor, entre esas la más simple y útil para un edificio es el refuerzo de su envolvente. Es precisamente en virtud de dichas mejoras que, como se mencionó anteriormente, se han creado documentos cuyo objetivo es guiar a diseñadores y proyectistas hacia un diseño de establecimientos más eficientes. El problema es que aún hay información importante que no se menciona ni se considera, por ejemplo, en documentos como la “Guía de Eficiencia Energética de Establecimientos Educacionales” de la Agencia Chilena de la Eficiencia Energética (AChEE) y “Criterios de Diseño para los Nuevos Espacios Educativos, en el Marco del Fortalecimiento de la Educación Pública” del Ministerio de Educación (MINEDUC) se plantean mejoras para establecimientos educacionales las cuales se apoyan en base a resultados obtenidos a través de simulaciones térmico-dinámicas, considerando diferentes tipos de variables (entre ellas la envolvente), sin embargo, existen dos grandes problemas con estos documentos:

- 1) Las simulaciones realizadas para estas guías no consideran envolventes conformadas por elementos de madera las cuales, según el documento “Guía para el diseño de envolventes de edificios eficientes energéticamente” (Guide for Designing Energy Efficient Building Enclosures) del Canadian Wood Council pueden llegar a ser “*Substancialmente más eficientes que envolventes de acero, concreto o albañilería*”.
- 2) En algunos de estos documentos no se establecen materialidades específicas de envolvente si no que se establecen valores de resistencia al paso del calor a través de los elementos, bajo esa lógica la aplicación de envolventes de madera sería posible con estas guías, sin embargo los datos utilizados para calcular las mejoras en las simulaciones realizadas deberían considerar además las transferencias de calor producidas en las uniones de elementos como muros con el entrepiso, techumbre, entre otros. En otras palabras, para que las recomendaciones entregadas por una guía se puedan aplicar de manera realista a envolventes de madera se deben considerar los puentes térmicos puntuales y lineales producidos por estas.

1.2.2 Construcción con madera en Chile

No debería ser extraño hablar de incorporar la madera en la construcción en Chile considerando que, según datos de la Cámara Chileno Norteamericana de Comercio (AmCham Chile), este país posee un amplio mercado relacionado al rubro de la producción silvícola y está situado en el ranking de los veinte primeros países en producción y comercialización de productos forestales. Esto se ve de manera más evidente en el sector sur del país donde las condiciones climáticas son precisas para llevar a cabo este tipo de producción y se pueden observar amplias áreas cubiertas de plantaciones forestales, sin embargo, según datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) la abundancia de madera no se refleja en el sector de la construcción contemporánea ya que los materiales más utilizados en la construcción en Chile son la albañilería y el hormigón, siendo la madera uno de los menos utilizados.

Probablemente la baja consideración que poseen las empresas constructoras para incorporar la madera se debe a que esta genera ciertas dificultades adicionales en la construcción, sin embargo, no se está tomando en cuenta el hecho de que al poseer mejores cualidades térmicas, su incorporación puede generar disminuciones importantes en la demanda y marcar un nuevo paso en el camino hacia la independencia energética. Además su incorporación en establecimientos educacionales podría generar un ahorro importante de dinero a nivel mensual el cual puede ser destinado a satisfacer otro tipo de necesidades del ámbito educacional cuyo carácter es más relevante como aquellas relacionadas a la alimentación y salud de los alumnos.

Se debe tomar en cuenta que existe una serie de países en los que resalta la utilización de madera en el sector de la construcción inmobiliaria. Entre aquellos países Canadá es uno de los principales ya que como explica el decano de la Facultad de Silvicultura, geografía y geomática, de la Universidad Laval en Quebec *“La madera es un material liviano, fácil de trabajar en la construcción y que además tiene buena resistencia estructural y térmica”*. La industria de la construcción canadiense parece entender las verdaderas propiedades de la madera ya que más de un 70% del sector residencial está construido incorporando la madera como material principal. Es muy común en ciudades de Canadá cuyo clima alcanza temperaturas muy bajas como Winnipeg, Quebec o Montreal ver viviendas y edificios construidos en madera cuyas propiedades térmicas son altamente eficientes, por lo que parece interesante y una gran oportunidad poder estudiar las técnicas de construcción que se ocupan en un país como Canadá, con el fin de analizar la posibilidad de la incorporación de tales sistemas constructivos en Chile.

1.3 Hipotesis

La incorporación de soluciones constructivas de envolvente vertical de madera utilizadas en Canadá permitirá la disminución de la demanda de energía en establecimientos educacionales emplazados en la Zona Austral de Chile, con altos beneficios a nivel de ahorro energético siendo viable en su relación costo/beneficio.

1.4 Objetivos:

Objetivo principal:

Analizar el desempeño térmico de diferentes tipos de envolvente vertical de madera utilizadas en establecimientos educacionales en Canadá para evaluar los efectos en el desempeño energético de su incorporación en establecimientos emplazados en la zona Austral de Chile

Objetivos secundarios:

1. Revisión de las normativas térmicas, condiciones climáticas y el estado del arte de la construcción en madera en Chile y Canadá realizando una comparación que permita contextualizar los alcances de la investigación.
2. Identificar los sistemas constructivos de envolvente vertical de madera eficientes utilizados en Canadá seleccionando aquellos que cumplan con estándares definidos para lograr la eficiencia energética en el contexto de la investigación.
3. Evaluar el desempeño térmico de los sistemas constructivos seleccionados identificando los efectos energéticos de su incorporación en establecimientos educacionales de la zona austral de Chile.
4. Calcular los costos de construcción y ahorro energético de los sistemas constructivos de envolvente vertical analizados definiendo de manera preliminar la relación entre el costo y el beneficio generado por su incorporación.

1.5 Metodología:

Como se puede observar en la Figura 1.1, la metodología abordada en este estudio consta de 4 diferentes etapas, cada una de las cuales responde a uno de los objetivos específicos mencionados anteriormente:

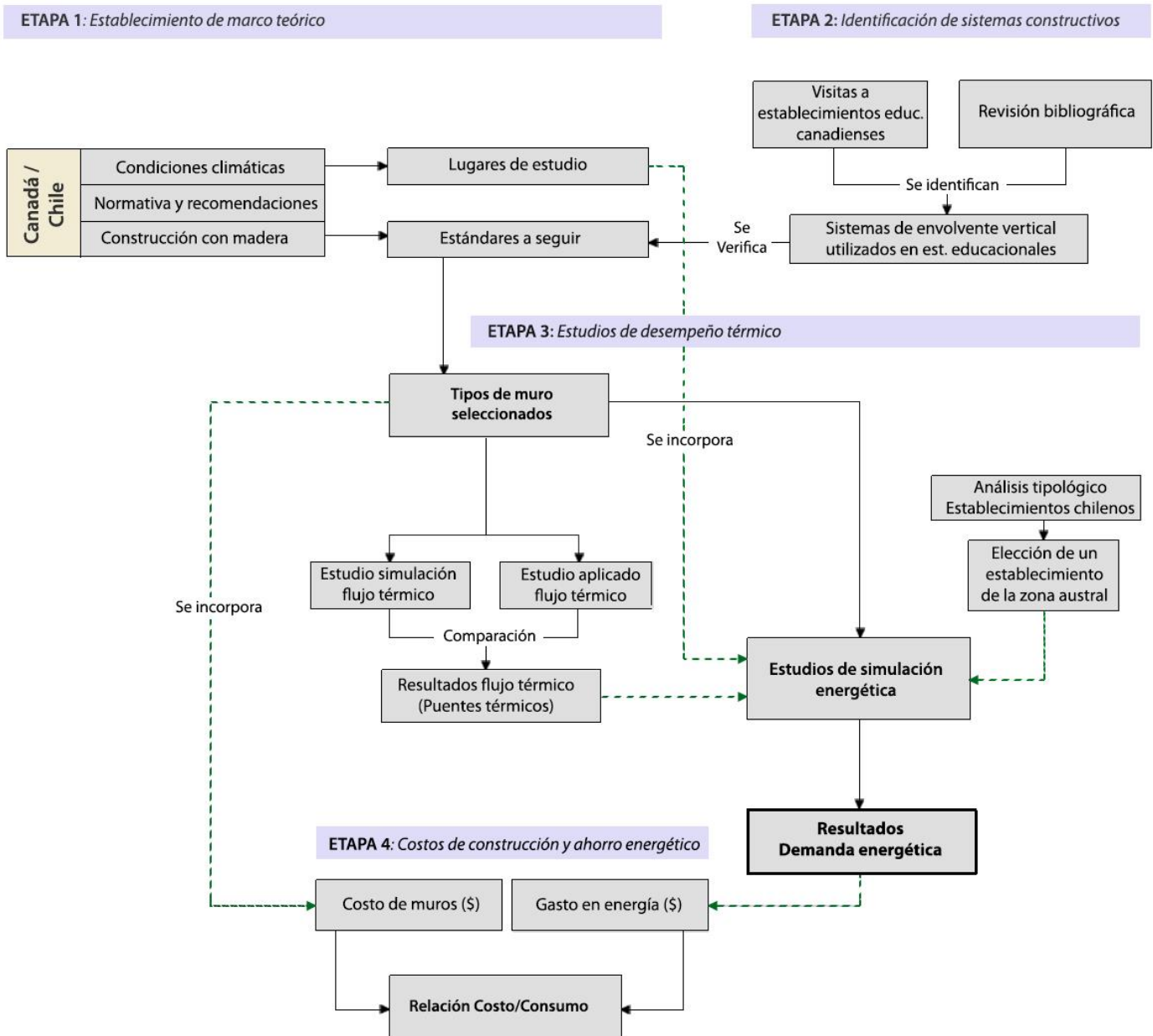


Figura 1.1: Mapa conceptual de metodología utilizada

Etapa 1: Establecimiento del marco teórico

Se recopila información de Chile y Canadá relacionada a la construcción con madera, condiciones meteorológicas, normativas y recomendaciones en la construcción, y funcionamiento del sector educacional para luego realizar comparaciones entre ambos países y poder establecer los marcos en los que los resultados obtenidos, utilizando técnicas de construcción canadienses, podrían ser aplicables a Chile. Con los datos obtenidos se establecen los lugares de estudio (en Chile y Canadá) y los estándares sobre los cuales se apoyan todos los estudios que se realizan en las etapas posteriores.

Etapa 2: Identificación de sistemas constructivos

Se hace un levantamiento de información relacionado a las técnicas de construcción de envolvente vertical de madera utilizadas en Canadá para edificios de carácter educacional. Esta información se obtiene en base a visitas realizadas a establecimientos educacionales canadienses y revisión bibliográfica. Una vez que los tipos de envolvente han sido identificados se verifica el cumplimiento de cada una de ellas con los estándares planteados previamente, con el fin de seleccionar aquellas que se utilizarán en los estudios posteriores.

Etapa 3: Estudios de desempeño térmico

Se realizan estudios de flujo térmico a cada uno de los tipos de muro seleccionados y sus respectivas uniones entre elementos, utilizando el software LBNL Therm, para así evaluar la ocurrencia de puentes térmicos y su magnitud. De manera simultánea se realiza un estudio de flujo térmico aplicado a la realidad en el cual se selecciona uno de los tipos de muro estudiados y se construye un cubículo de prueba al cual se le incorporan sensores de temperatura superficial (termocuplas) en diferentes secciones interiores del muro con el objetivo de evaluar su comportamiento y poder comparar los resultados con los estudios realizados con LBNL Therm.

Posteriormente, utilizando como herramienta el software Design Builder, se realizan análisis de demanda energética sobre el modelo tridimensional de un establecimiento educacional que se selecciona luego de hacer un análisis tipológico de los establecimientos de la zona austral de Chile. Los estudios de demanda se realizan para cada uno de los tipos de muro analizados, incorporando los datos climáticos de los lugares de estudio seleccionados previamente y los resultados obtenidos en los estudios de flujo térmico.

Etapa 4: Costos de construcción y ahorro energético

Como una medida complementaria a los resultados de demanda, se calculan los costos de construcción de cada tipo de muro (por m² y para el establecimiento seleccionado previamente) utilizando diferentes tipos de documentos como la "Tabla referencial de precios unitarios" y, en algunos casos, catálogos de empresas de venta de materiales. Luego, utilizando los datos de demanda energética obtenidos previamente y datos tarifarios de suministro energético, se realiza una comparación entre el costo y el beneficio generado para cada uno de los tipos de muro analizados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Lugares de estudio

2.1.1 ¿Por qué tomar como ejemplo a Canadá?

Actualmente Canadá es uno de los países que lidera a nivel mundial en el uso de la madera para la construcción de viviendas y edificios ya que posee un largo historial de uso y perfeccionamiento de este material. Según la información entregada por la corporación Chilena de la madera CORMA, la primera asociación canadiense de la construcción en madera se creó en el año 1637 y desde ese entonces se han creado una serie de asociaciones y documentos destinados a regular y establecer medidas para el correcto y eficiente uso de la madera en la construcción.

En Canadá cerca del 80% de edificios residenciales y viviendas están construidos con madera y se estima que cada año se construyen más de un millón de viviendas y otras construcciones utilizando estas técnicas, en la Figura 2.1 se pueden observar algunos ejemplos. Incluso otros países como Japón, Corea del sur y Rusia están construyendo viviendas de madera de uso comercial y residencial utilizando técnicas de construcción Canadienses como ejemplo.



Figura 2.1: Ejemplos de edificios construidos con madera en Canadá

2.1.2 ¿Por qué aplicar lo estudiado en la zona austral de Chile?

Muchas de las ciudades de Canadá poseen climas bastante fríos, relativamente cercanos al ártico y es por eso que los sistemas constructivos utilizados están adaptados a este tipo de condiciones. Como se puede ver en las siguientes imágenes obtenidas con el software Climate Consultant, utilizando datos climáticos de formato Energy Plus Weather (.epw), los climas de la ciudad de Vancouver al Suroeste de Canadá y la ciudad de Sandspit ubicada al este de la provincia de Columbia Británica poseen características similares a las del clima de una ciudad como Punta Arenas que se emplaza en la zona Austral de Chile. Además al ser la ciudad más habitada (aproximadamente 129.400 habitantes) Punta Arenas representa bien esta zona que abarca todo el territorio de las regiones de Aysén (XI) y Magallanes (XII).

En la Figura 2.2 se puede observar que las temperaturas pueden ser un poco más extremas en Canadá en algunos momentos del año, por ejemplo en Vancouver las temperaturas más altas en verano exceden el rango de confort establecido por el ASHRAE standard 55, 2004 lo que podría generar una pequeña demanda de refrigeración en las edificaciones. En el caso de Sandspit ocurre lo contrario, siendo las temperaturas más bajas en invierno las que pueden ser un poco más bajas que el caso de Punta Arenas, sin embargo, ambas ciudades canadienses se mantienen dentro de rangos similares a Puntas Arenas.



Figura 2.2: Comparación entre temperaturas de Punta Arenas, Vancouver y Sandspit

Otras características como la humedad relativa en las entre las dos ciudades canadienses (Sandspit y Vancouver) y Punta Arenas para los meses más fríos de invierno (según la ubicación) pueden ser un poco más variables (Figura 2.3). Hay momentos en los que los que Vancouver alcanza valores más bajos que las otras ciudades, sin embargo, la mayor parte del tiempo se mantienen dentro de porcentajes similares variando en un rango aproximado entre 75% y 90%.

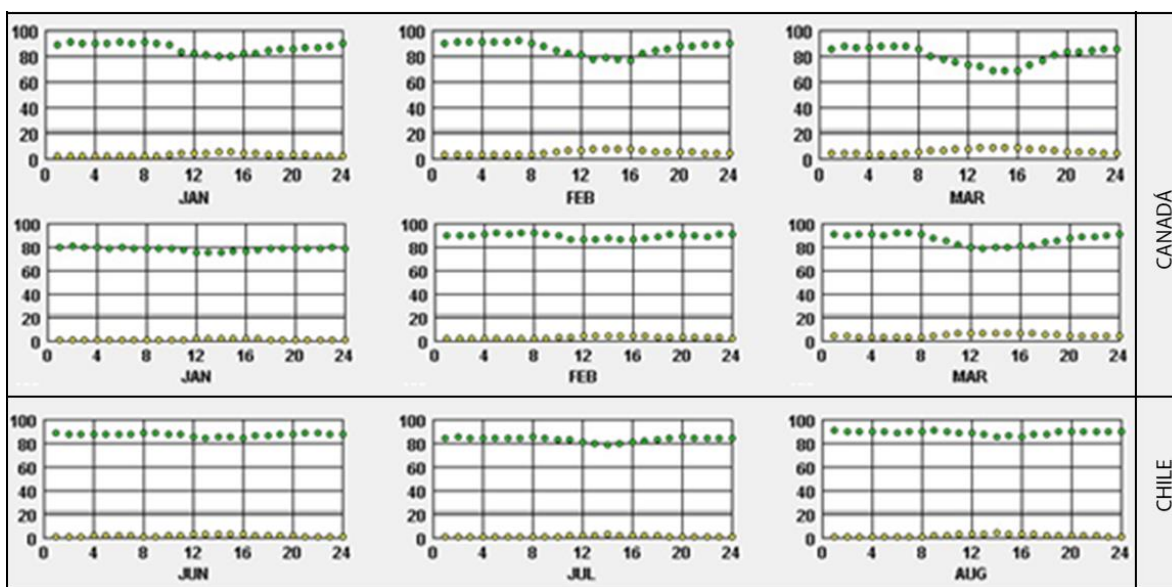


Figura 2.3: Comparación de humedad relativa Punta Arenas, Sandspit y Vancouver para meses más fríos del año.

Las estrategias planteadas por el software Climate consultant para las 3 ciudades son similares y están relacionadas en su mayoría con el refuerzo de la envolvente a nivel de aislación, la elección de materiales, la captación solar y diseñar volúmenes lo más compactos que sea posible.

Como se puede observar en la Figura 2.4 la primera estrategia planteada es la orientación de los espacios hacia el sur (o el norte, dependiendo del hemisferio) ya que esta orientación permite al edificio obtener ganancias solares valiosas al momento de necesitar calefacción. El software también plantea que una de las mejores estrategias es reforzar la envolvente con materiales aislantes dispuestos de manera continua entre techumbre, muros y piso, evitando la mayor cantidad de puentes térmicos posible.

Otras estrategias que también se plantean son la compacidad volumétrica, ya que mientras haya menor superficie en contacto con el exterior menor será la pérdida de calor a través de la envolvente. También se plantea la utilización de vidrios dobles en las ventanas para disminuir la transmitancia térmica de estas.

Todas las estrategias mencionadas están relacionadas con evitar las pérdidas de calor debido a la gran demanda de calefacción que podría tener un edificio emplazado en estas ciudades.

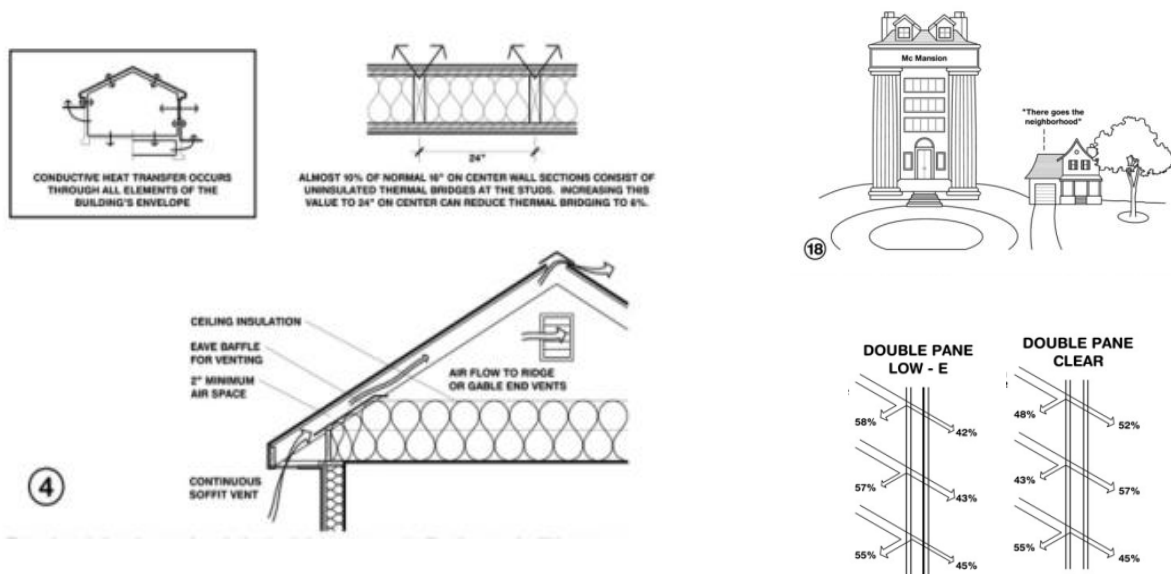


Figura 2.4: Estrategias planteadas por Climate Consultant para Vancouver, Sandspit y Punta Arenas.

2.2 Análisis del cuadro normativo térmico presente en Canadá y Chile

En lo que se refiere a normativa térmica Chile y Canadá poseen diferentes requerimientos y recomendaciones (Figura 2.5) así como también diferentes procesos para abordar dichas recomendaciones. Para el caso de Canadá el documento “National Building Code of Canada” (Código nacional de la construcción de Canadá) es aquel que describe las exigencias mínimas requeridas en materia de construcción y en Chile ese documento se llama Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (O.G.U.C), sin embargo, también se tomará en consideración el documento Términos de Referencia estandarizados TDRe del ministerio de obras públicas ya que, a pesar de que no conforma exigencias obligatorias ofrece recomendaciones más precisas y ajustadas a la realidad de cada una de las zonas climáticas de Chile. A continuación se presenta un breve análisis de estos documentos, enfocado en las exigencias y recomendaciones a nivel de coeficientes de transmisión térmica para los diferentes elementos de una construcción:



Figura 2.5: Documentos normativos analizados (Canadá – Chile)

2.2.1 National Building Code of Canada

Esta normativa canadiense establecida el año 2012 es la actualización de la normativa del año 1997 llamada “Model national energy code for building” y dentro de sus principales actualizaciones se puede ver una nueva estructuración que permite entregar exigencias más útiles según la ubicación del edificio o vivienda que se construirá, de hecho, en lo que se refiere a normativa térmica, el National Building Code of Canada es bastante parecido en funcionamiento a la normativa Chilena ya que divide el territorio en diferentes zonas térmicas pero lo hace según la cantidad de grados-día de calefacción (Heating degree days, HDD) que estas reciben. HDD es una unidad que mide que tan fría es una ubicación en un periodo de tiempo determinado sobre una temperatura base de 18°C (ASHRAE 90.1, 2007)

En la Figura 2.6 se puede ver la distribución de las zonas climáticas según su cantidad de HDD que poseen. Ciudades como Vancouver, Sandspit o Quebec responden a los requerimientos mínimos de la zona 7a que es la zona que se ubica entre las líneas que demarcan los 5000 y 6000 HDD y posee una exigencia máxima de valor U de 0,12 W/m²K en techumbre y 0,36 W/m²K en muros (Tabla 2.1). Esta norma no plantea exigencias para pisos ventilados debido a que en Canadá las edificaciones deben poseer fundaciones que alcancen una distancia subterránea que se ubique por debajo de la línea de congelación del terreno, muchas veces estas fundaciones son lo suficientemente profundas como para construir niveles subterráneos.



Figura 2.6: Zonificación climática canadiense, National Building Code of Canada

Tabla 2.1: Exigencias mínimas de resistencia y transmitancia térmica para elementos de envolvente NBC of Canada

Zona climática y HDD	Muros exteriores		Techumbre	
	R	U	R	U
	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W
Zona 4 (< 3000 HDD)	2,7	0,37	6,9	0,14
Zona 5 (3000 - 3999 HDD)	2,7	0,37	6,9	0,14
Zona 6 (4000 - 4999 HDD)	2,8	0,36	8,6	0,12
Zona 7a (5000 - 5999 HDD)	2,8	0,36	8,6	0,12
Zona 7b (6000 - 6999 HDD)	3,1	0,32	10,4	0,10
Zona 8 (7000 - 8000 HDD)	3,9	0,26	10,4	0,10

Actualmente en Canadá el porcentaje de construcción de edificios de uso no residencial de madera se limita al 21% lo que, según el centro de expertos en la construcción comercial de la madera de Quebec (CECOBOIS), no es un porcentaje muy alto si se compara con el área residencial que posee más de un 80% de las edificaciones construidas con este material, sin embargo, en reconocimiento a las propiedades de la madera a nivel estructural y ambiental, el gobierno canadiense está incorporando una serie de nuevas medidas destinadas a fomentar el uso de la madera por parte de las empresas, por ejemplo, el documento llamado “Charte du bois” que regulariza el uso de la madera en la construcción de edificios no residenciales (colegios incluidos en esta categoría) y subsidia en cierto porcentaje los costos adicionales por la incorporación de esta, además se están realizando seminarios de capacitación de profesionales en el manejo y buen uso de la madera para la construcción de establecimientos educacionales y se están elaborando manuales de uso público tales como el “Catalogue de coûts des bâtiments quebecoise en bois” con el cual los profesionales que diseñen y construyan los edificios podrán aprender sobre como minimizar algunos costos relacionados a la incorporación de la madera observando técnicas utilizadas en edificios que ya fueron construidos.

Como otras medidas complementarias a la normativa de construcción el gobierno canadiense también abrió una base de datos digital gratuita en la página web climate.weatheroffice.gc.ca de tal manera que los datos de ubicación y meteorología de ciudades que no se mencionan directamente en la normativa puedan ser consultados y sean de fácil acceso para todas las personas.

2.2.2 Normativa térmica chilena

En Chile la normativa térmica de construcción está sujeta a las exigencias planteadas en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (O.G.U.C) para cada una de las 7 zonas térmicas mencionadas. Técnicamente esta norma solo es exigible al sector residencial, sin embargo a falta de una normativa térmica para establecimientos educacionales es comúnmente utilizada como referencia.

En la Tabla 2.2 se pueden observar los parámetros mínimos de resistencia y transmitancia térmica necesarios en muros, techos y pisos ventilados. Para realizar los cálculos que comprueben el cumplimiento con las exigencias establecidas se deben utilizar los métodos establecidos en la Nch853.

La zona Austral junto a todas las ciudades representativas como Aysen, Cochrane y Punta Arenas están comprendidas dentro de la zona térmica n° 7 por lo tanto para construir un establecimiento en esos lugares se exige que cómo mínimo la construcción posea valores de transmitancia de 0,25 W/m²K en techumbre, 0,6 W/m²K en muros y 0,32 W/m²K en pisos ventilados.

Además de lo referido a transmisión de calor la normativa también establece los porcentajes máximos aceptables de superficie vidriada en una construcción según la zona térmica en la que se emplaza y el tipo de vidrio utilizado. En la Tabla 2.3 se puede observar que para la zona 7 se exige un máximo de 12% vidriado de la superficie de los paramentos verticales si esto se hace con vidrio monolítico, por otro lado si los vidrios utilizados son de doble vidriado hermético (DVH) el porcentaje máximo va a variar entre 28% y 37% dependiendo del valor U del elemento.

Se puede notar que las exigencias establecidas por la norma chilena para la zona austral son bastante bajas comparadas con las establecidas en la normativa canadiense para la zona 7a que en gran parte posee climas similares a los de la zona 7 chilena, por lo tanto, se decide considerar otro estándar que se adapta mejor a la realidad de cada zona climática chilena, los Términos de Referencia estandarizados (TDRe)

Tabla 2.2: Parámetros mínimos de resistencia y transmitancia térmica, normativa chilena

Zona	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U	Rt	U	Rt	U	Rt
	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/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

Tabla 2.3 Porcentaje máximo de superficie vidriada según zona térmica y tipo de vidrio

Zona	% máximo de superficie vidriada respecto a paramentos verticales		
	Vidrio Monolítico	Doble Vidriado Hermético	
		$3,6 \text{ W/m}^2\text{K} > U > 2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U < 2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$
1	50%	60%	80%
2	40%	60%	80%
3	25%	60%	80%
4	21%	60%	75%
5	18%	51%	70%
6	14%	37%	55%
7	12%	28%	37%

2.2.3 Términos de Referencia estandarizados TDRé

Los términos de referencia estandarizados plantean una serie de recomendaciones adaptadas a la realidad de las diferentes zonas del país ya que trabajan en conjunto con la zonificación climática planteada por la Nch1079 que divide el territorio nacional en 9 diferentes áreas según sus características meteorológicas. Las recomendaciones planteadas corresponden a los estándares de calidad mínimos asociados al uso de energía y a las condiciones de clima interior de los edificios.

En la Figura 2.7, que muestra el mapa de la zonificación climática dividido en 9 áreas, se puede ver que toda la zona austral de Chile forma parte de la zona 8 llamada Sur Extremo (SE). La zona austral comprende toda el área chilena desde Castro hasta Puerto Williams.

Los TDRé plantean estándares diferentes para cada una de las 9 zonas mencionadas anteriormente, la tabla 2.4 muestra los parámetros mínimos de valor U y Rt recomendados para los diferentes elementos de una edificación emplazada en la zona 8 Sur Extremo (SE). Como se puede observar todas las recomendaciones de valor U para elementos opacos de la envolvente son menores a $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, siendo la techumbre aquella con mayor exigencia ($0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$), seguido por los cerramientos en contacto con el terreno y muros de fachada ($0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$), además se establecen otros criterios que no habían sido mencionados en la normativa chilena como por ejemplo un valor U máximo de paramentos verticales ($1,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)

En el caso de las recomendaciones planteadas para la superficie acristalada de la envolvente se plantean valores U límite en función del porcentaje de área vidriada de la envolvente vertical y de la orientación que esta posea, por ejemplo, si el establecimiento posee el 41% del área de la envolvente vertical orientada hacia el norte con cristales, el valor U de esos cristales debe ser como máximo 2,9 W/m²K, sin embargo, si los cristales están orientados hacia el sur el valor U máximo debe ser 1,9 W/m²K. Si el establecimiento posee más del 60% del área con vanos acristalados se debe verificar el cumplimiento de ciertas exigencias.

Si se comparan las recomendaciones establecidas en los TDR con las exigencias de la normativa chilena se puede notar que en algunos puntos son bastante más exigentes, además a nivel de porcentaje de acristalamiento permiten mayor versatilidad en el diseño ya que se puede trabajar con porcentajes de área vidriada más altos, mientras que la normativa solo permite hasta 12% con vidrio monolítico y 35% con DVH para la zona térmica 7. Otro punto importante a tomar en cuenta es que se plantean estándares que logran acercarse bastante a los que son planteados en el Código nacional de la construcción de Canadá para muros y techumbre.

Tabla 2.4: Requerimientos de transmitancia para zona Sur extremo, TDR

Transmitancia térmica máxima (U) - Envolvente		Valor U
Parámetros Característicos Medios		Valor U
Transmitancia térmica límite de cubierta		0,25
Transmitancia térmica límite de muro de fachada		0,40
Transmitancia térmica límite de pisos en contacto con terreno		0,40
Transmitancia térmica límite de pisos ventilados		0,50
Transmitancia térmica límite de cerramiento en contacto con el terreno		0,40
Transmitancia térmica ponderada límite de paramentos verticales		1,15

Transmitancia térmica máxima (U) - Vanos Acristalados (Por orientación)				
% Vanos acristalados	N	E/O	S	NE/NO
0 a 10	2,9	2,9	2,9	2,9
11 a 20	2,9	2,9	2,9	2,9
21 a 30	2,9	2,9	2,9	2,9
31 a 40	2,9	2,9	2,9	2,9
41 a 50	2,9	2,9	1,9	2,9
51 a 60	2,9	2,9	1,9	2,9
> 60	Deberá cumplir con exigencias de Eficiencia Energética			



Figura 2.7: Zonificación climática Chilena, Nch1079

2.3 Beneficios del uso de madera en edificios:

En breves palabras, la madera posee amplias ventajas en el sector de la construcción si se compara con el concreto o la albañilería, comenzando por el hecho de que es un recurso renovable que se encuentra en gran abundancia en Chile por lo que su uso no sugiere ni un tipo de peligro ambiental, es más, posee propiedades ambientales potentes ya que se trata de un material al cual no se le modifican sus propiedades naturales y es por eso que posee una huella de carbono menor que otros materiales estructurales, además, su producción ayuda a la captación de carbono y por ende disminución de los niveles excesivos de carbono en el ambiente.

Las propiedades térmicas de la madera son bastante buenas, el valor U del pino radiata que es uno de los más desfavorables de la madera en Chile y Canadá es más alto que el del concreto tradicional H-20, H-30 o al de cualquier tipo de albañilería presente en alguna solución del listado de acreditaciones térmicas del MINVU. Los países más desarrollados tienen eso bastante claro y es por eso que en Canadá un gran porcentaje de la construcción de edificios está desarrollada en madera a través de diferentes sistemas constructivos

Existen estudios que han demostrado que, para la mayoría de las personas, la madera tiende a armonizar los espacios cuando es visible gracias a su textura y color, además gran cantidad de personas la tiende a ver como un material más sustentable (Strobel et al, 2017)

2.4 ¿Qué será considerado como “eficiente” en este estudio?

La “Guía de diseño en envolventes eficientes en Norte America” considera que aquellos sistemas constructivos que gracias a la medida, espesores y disposición de sus diferentes materiales poseen propiedades que se ubican por sobre los estándares mencionados en el National Building Code of Canada, poseen las propiedades mínimas para asegurar la eficiencia de un edificio o vivienda (Finch et al, 2013). En Chile los Términos de referencia estandarizados (TDRé) se definen como los estándares de calidad mínimos asociados al uso de la energía y a las condiciones de clima interior de los edificios, con el objetivo de mejorar la calidad ambiental, la eficiencia y el ahorro en el uso de la energía en la edificación pública por lo que se pueden entender como los parámetros mínimos para lograr que la construcción sea eficiente. (CITECUBB, 2012)

Tomando en cuenta lo antes mencionado se decidió que, para efectos de este estudio, se considerarán eficientes todas aquellas soluciones constructivas de muros de madera utilizados en Canadá que cumplan, al menos, con los parámetros de resistencia y transmitancia térmica establecidos en los TDRé para la zona austral de Chile y el National Building Code of Canada para la zona 7a que es dónde se ubican las ciudades canadienses que poseen climas similares al de la zona austral chilena.

2.5 Estrategias utilizadas en establecimientos educacionales en Canadá

Lo primero que se debe entender es que en Canadá las escuelas primarias y secundarias son administradas por grandes comisiones escolares que pueden llegar a estar constituidas por 40 o 50 establecimientos en los cuales los profesores pueden ir rotando por temporadas. Este tipo de organización permite distribuir equitativamente los presupuestos y tomar decisiones de diseño en conjunto para varios establecimientos a la vez, es por eso que muchas de las estrategias se repiten en todos los establecimientos.

Para observar de manera directa las estrategias utilizadas se realizaron visitas a establecimientos educacionales ubicados en las diferentes ciudades de Canadá como Victoriaville y la ciudad de Quebec, a continuación se presentan dichas estrategias:

Compacidad volumétrica:

Como se observa en los ejemplos de la Figura 2.8 la mayoría de los establecimientos educacionales emplazados en Canadá poseen volúmenes bastante compactos para evitar así las pérdidas de calor innecesarias. Además se puede ver cómo predominan los muros sobre los vanos en las fachadas para evitar pérdidas de calor considerables, sin embargo la captación solar puede ayudar bastante en ciertos casos por lo que se deja un mayor porcentaje de área vidriada en la fachada sur (norte en el caso del hemisferio sur) en comparación con otras orientaciones, aproximadamente 20% del área de la base del aula.



Figura 2.8: Imágenes colegio "Notre dame de bois franc", Victoriaville, Canadá

Espacio interior:

En el interior de los establecimientos se incorporan elementos de frenado del viento y pérdidas de calor tales como esclusas con puertas dobles en todas las entradas, especialmente en aquellas que están orientadas hacia donde los vientos predominan. Estos espacios separan las puertas por 2 m o más generando un espacio de transición que permite a los usuarios adaptarse a las temperaturas interiores que suelen ser bastante diferentes a las exteriores. Se puede ver un ejemplo en la figura 2.9.



Figura 2.9: Accesos con doble puerta para frenar el viento, pabellón Gene H-Kruger ULAVAL

La composición de las aulas es relativamente en general es similar a las de los colegios en Chile, como se puede ver en la Figura 2.10 las aulas poseen una morfología rectangular en la cual uno de los lados largos posee un ventanal completo con antepecho y el otro lado conecta con un pasillo interior y su superficie es de aproximadamente 60 m². En el interior del aula se pueden apreciar sistemas de calefacción a lo largo del antepecho del ventanal los cuales son alimentados por energía eléctrica en los casos convencionales o por energía geotérmica con intercambiadores de calor en los casos más eficientes.



Figura 2.10: Imágenes interiores escuela primaria "sans frontieres", Drummondville, Canadá

En uno de los establecimientos educacionales visitados la tabiquería interior que conforma los pasillos posee un revestimiento acústico hecho de fibra de madera para evitar crear molestias por el ruido al interior de las aulas, al acercarse se pueden observar las pequeñas cámaras de aire que se forman al juntar y comprimir las fibras que se obtienen de los residuos de madera que no pueden ser utilizados para construcción (Figura 2.11)



Figura 2.11: Imágenes interiores facultad de ingeniería en geografía y geomatica, Universidad Laval, Canadá

Debido a las bajas temperaturas en invierno se pueden observar grandes espacios comunitarios interiores los cuales generalmente poseen amplios paños vidriados por los que accede una gran cantidad de luz natural, como se puede ver en la Figura 2.12, dichos espacios generalmente se ubican cercanos al centro de los establecimientos para tener una distancia similar hacia todos los espacios.



Figura 2.12: Espacios interiores pabellón Kruger, Universidad Laval, Canadá

Así mismo en los establecimientos que están conformados por más de un edificio se pueden observar espacios intermedios vidriados como invernaderos o puentes (Figura 2.13), los cuales nacen de la necesidad de movilidad entre edificios de los usuarios pero que en muchos de los casos también funcionan como espacios de estudio y relaxo, además ayudan en el desempeño térmico de los edificios al frenar la entrada del viento y las pérdidas de calor a través de los accesos secundarios.



Figura 2.13: Espacios de transición establecimientos educacionales

Certificación:

Los establecimientos más eficientes optan por la certificación LEED, por lo que es común ver elementos como estacionamientos para bicicletas construidos en madera laminada que ayudan a obtener puntos LEED adicionales porque que fomentan este tipo de transporte (Figura 2.14), también es común ver espacios de recreación exterior y transito techados con el mismo fin. Como medida complementaria en la certificación estos establecimientos incorporan todos los elementos necesarios para realizar el reciclaje de prácticamente la totalidad de los desechos producidos.



Figura 2.14: Estacionamiento de bicicletas, “Ecole du bois franc” Victoriaville, Canadá

Construcción - Envoltente:

En Canadá es fundamental el diseño de envoltentes reforzadas de alta resistencia térmica. Estas pueden estar conformadas por diferentes materiales pero en su mayoría están compuestas en gran parte por elementos de madera, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 2.15.

El uso de la madera no solo se limita a la estructura, también se han creado alternativas eficientes de aislación utilizando los productos que se reciclan de la madera, en la Figura 2.16 se puede ver la utilización de SONOCLIMAT Eco 4 que es una alternativa de aislación rígida exterior compuesta en un 85% de fibras de madera reciclada y posee la misma resistencia térmica que el poliestireno expandido.



Figura 2.16: Establecimiento educacional con envoltente de madera



Figura 2.15: Envoltente de madera con aislación rígida SONOCLIMAT Eco4

Revestimiento:

Se utilizan diferentes tipos de revestimientos, es común ver madera tanto en el exterior como interior de ciertos espacios educativos (Figura 2.17) ya que se comprenden las propiedades positivas que esta posee para los usuarios de dichos establecimientos, además los revestimientos de madera machihembrada se presentan en gran variedad de tamaños y colores en el mercado canadiense.

En el capítulo 03 de este estudio se presentará un estudio más detallado de los diferentes tipos de envoltente vertical de madera que se pueden utilizar en Canadá para los establecimientos educacionales.



Fig. 2.17 Revestimiento exterior escuela "sans frontieres", Drummondville, Canadá

3. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE ENVOLVENTE VERTICAL CONSIDERADAS

La envolvente tiene un alto porcentaje de influencia en el desempeño térmico de un establecimiento ya que juega un importante rol en la transferencia de calor entre el interior y el exterior, esta influencia es mayor cuando dicho establecimiento está emplazado en una zona cuyo clima posee condiciones extremas. (Kosny et al, 2014).

En la envolvente de establecimientos de mediana y gran altura los elementos de la envolvente vertical son los que se encuentran en mayor superficie, su modificación no genera grandes dificultades o costos si se comparan con otros elementos de la envolvente, y poseen un porcentaje de influencia considerable en el desempeño térmico, por lo que pueden llegar a generar mejoras notorias en la demanda energética. (Awad et al, 2014)

En este capítulo se identificarán aquellas soluciones constructivas de envolvente vertical que, en base a las visitas a terreno y recopilación de información, son utilizadas para la construcción de nuevos edificios de todo tipo en Canadá, entre esos, edificios de carácter educacional. Las soluciones constructivas mencionadas están constituidas principalmente por una estructura de tabiquería de madera porque es uno de los sistemas constructivos más utilizados para la construcción de edificios y viviendas, tiene bastante aceptación por la comunidad canadiense, los materiales necesarios existen en abundancia tanto en el mercado canadiense como en el chileno, además su construcción es más fácil y también más económica que cualquier otro tipo de construcción en madera como CLT o madera maciza (Awad et al, 2014).

Como se mencionó anteriormente, se ha propuesto como método de selección el cumplimiento de al menos lo mínimo recomendado por los "TDRe" para la zona Sur Extremo de Chile y el "National Building Code of Canada" para la zona 7.a de Canadá por lo que se procederá a verificar dicho cumplimiento, en el caso de que algún tipo de muro no cumpla con los estándares no será considerado en los siguientes análisis.

Por cada una de las soluciones constructivas analizadas se mostrará una tabla con un listado de materiales utilizados en Canadá seguido de un listado de materiales homologados en Chile con sus respectivas propiedades, indicando si las propiedades del material canadiense son idénticas a las del material homologado o varían levemente. Es importante mencionar que, para efectos de obtener resultados útiles para su incorporación en Chile, en caso de existir alguna diferencia entre las propiedades, los estudios térmicos posteriores se realizarán utilizando las propiedades del material presente en Chile.

Algunos de los materiales estructurales y de recubrimiento utilizados en Canadá, tales como placas de terciado (Plywood) y tableros de yeso cartón (Gypsum board), se encuentran en el mercado Canadiense en diferentes espesores similares a los disponibles en Chile.

Para verificar el cumplimiento de las normativas indicadas se obtendrá el valor U de manera manual incorporando los datos de los materiales mencionados para cada tipo de muro en una planilla Excel que utiliza las siguientes formulas de la Nch 853:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{s_i} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{s_e}} \quad R_j = \frac{e_j}{\lambda_j}$$

Donde,

U: Resistencia térmica

R: Resistencia térmica

R_{s_i}, R_{s_e}: Resistencia superficial interior, resistencia superficial exterior

e_j: Espesor del material presente en el elemento

Para el caso de los elementos que poseen cámaras de aire se realizarán las siguientes operaciones a través de las planillas Excel de cálculo:

1. Para el caso de elementos con cámaras de aires no ventiladas se utilizará la fórmula:

$$R_T = \frac{1}{U} = R_{s_i} + R_i + R_g + R_e + R_{s_e}$$

Donde,

R_g: Resistencia térmica de la cámara de aire (se obtiene en tabla 7 de Anexo C en Nch853)

R_i: Resistencia térmica de las capas interiores del elemento

R_e: resistencia térmica de las capas exteriores del elemento

2. Para el caso de elementos con cámara de aire medianamente ventilada, la fórmula utilizada para el cálculo de transmitancia es la siguiente:

$$U = \frac{1}{R_T} = U_1 + \alpha(U_2 - U_1)$$

Donde,

U₁: Valor U del elemento bajo el supuesto que la cámara de aire no está ventilada

U₂: Valor U del elemento bajo el supuesto que la cámara de aire está muy ventilada

a: Coeficiente de ventilación de cámara, se obtiene de tabla 3 en Nch853

Cada tipo de muro posee un resumen del cálculo de valor U y R para verificar el cumplimiento de las normas mencionadas anteriormente. Las planillas de datos de cálculo detalladas de los valores U de cada uno de los elementos analizados se pueden observar en el **Anexo 1:** Planillas de cálculo de transmitancia térmica.

Por motivos de adaptación, para lograr que su incorporación en Chile sea posible, todos los elementos de placas y revestimientos tendrán espesores acreditados en el “Listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico” del Ministerio de Vivienda y Urbanismo para sistemas constructivos que utilicen el mismo tipo de estructura, por ejemplo, aquellos muros que utilizan una estructura de madera de 2”x4” con recubrimiento interior de yeso cartón utilizarán los espesores obligatorios de yeso cartón planteados en los sistemas constructivos del código: 1.2.M.C.25 de muros de estructura de madera de sección 2”x4” (Figura 3.1)

El espesor de aislación utilizado para cada uno de los estudios será el recomendado en las fuentes donde se obtuvo la información, los documentos “Guide for designing energy-efficient building enclosures in North America”, “Canadian Wood-frame construction” y “A review of high R-value wood framed and composite wood wall technologies using advanced insulation techniques” ya que gran parte de las estrategias para evitar puentes térmicos depende de eso. Dicho espesor también estará sujeto a su disponibilidad en el mercado chileno.

Código 1.2.M.C25.8		Muro estructurado en MSD cepillado Arauco 2x4, exterior placa AraucoPly, aislante térmico lana de vidrio (rollo) 60mm, interior yeso cartón de 15mm.				Institución	Vigencia
Forma de cumplir con las exigencias				Densidad material aislante			
Certificado de ensaye	X	Cálculo (NCh 853)	X	13,1 kg/m ³	Arauco S.A.	Diciembre 2013	
Corte:					Detalle (opcional)		

Figura 3.1: Imagen solución n° 1.2.M.C25.8, Listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico

3.1 Muros eficientes de tabiquería de madera utilizados en Canadá

Como se mencionó anteriormente este tipo de construcción es muy utilizada en Canadá desde hace bastante tiempo por lo tanto lleva años desarrollándose y perfeccionándose para que pueda resistir sin problemas los climas extremos de este país. Se puede utilizar de diferentes maneras, generalmente se utilizan piezas de madera de 2"x4" o 2"x6" para la estructura dependiendo del tamaño de la edificación, con la disposición de una barrera de humedad debajo de una cámara de aire que se forma bajo el revestimiento exterior y una barrera de vapor bajo el revestimiento interior. Según la definición expresada en la Nch853, las cámaras de aire presentes en este tipo de muros son consideradas medianamente ventiladas ya que la sección de apertura dividida por su superficie es mayor que 20 cm²/m pero menor que 500 cm²/m.

Un ejemplo de este tipo de construcción es el Colegio "Notre-Dame de bois franc" ubicado en Victoriaville dentro de la provincia de Quebec (Figura 3.2). Posee una estructura vertical que está construida completamente con tabiquería de madera utilizando piezas de escuadría de 2"x6". En la Figura 3.3 se pueden ver otros ejemplos de diferentes tipos de muros de tabiquería utilizados en establecimientos educacionales canadienses, a continuación se describirán los diferentes tipos de muro utilizados en la zona 7.a del Código Nacional de la Construcción en Canadá.



Figura 3.2: Colegio "Notre-Dame de bois franc" en fase de construcción



Figura 3.3: Ejemplos de tabiquería utilizada en establecimientos educacionales canadienses.

3.1.1 Tabiquerías de madera de 2"x4" o 2"x6"

Este tipo de construcción de envolvente vertical consiste en la utilización de un entramado de madera de pino de 2"x4" o 2"x6" con pies derechos cada 40 cm y que en su interior rellena todas las cavidades con aislación de lana de vidrio. La ventaja que posee este sistema es que posee aislación completa de toda la cavidad interior de la tabiquería, además posee una cámara de aire medianamente ventilada en toda su extensión para evitar la acumulación de humedad al interior del muro. Otra ventaja es que su incorporación no debería significar un costo muy alto comparado con otros sistemas. En la Tabla 3.1 se puede observar el cálculo resumido de valor U con una estructura de madera de 2"x4".

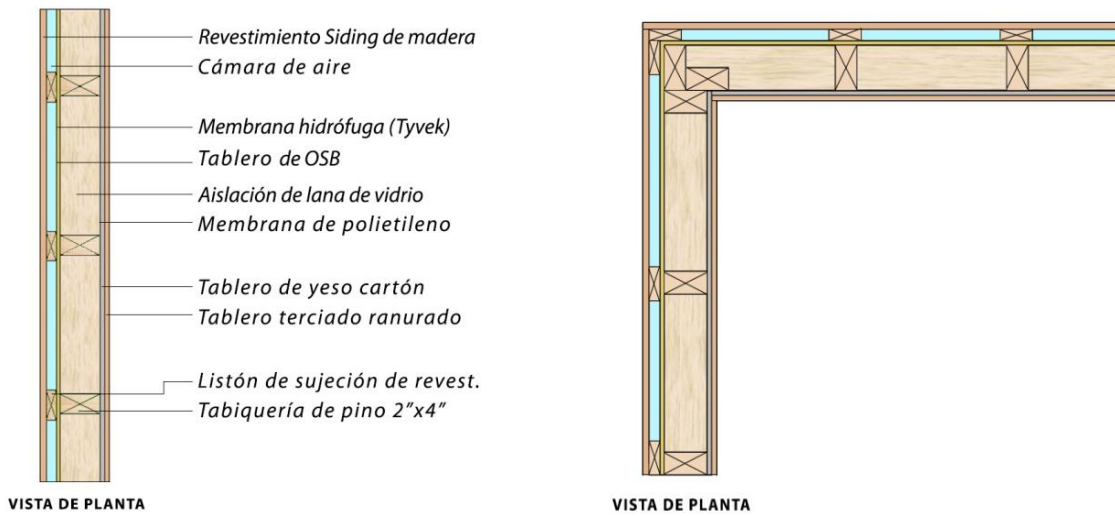


Tabla 3.1 Propiedades de los materiales y transmitancia térmica, solución de tabiquería de 2"x4"

MATERIAL CANADIENSE			MATERIAL CHILENO			
Capa exterior (Rse=0,12)	Espesor (m)	λ	Material homologado	λ	Rg (c. aire)	Espesor/ λ
Maibec ext. Wood Siding	0,0140	0,103	MSD pino de uso exterior	0,104	N/A	0,135
Airgap (semi-ventilated)	0,0254	N/A	Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,105	N/A
Pine wood joist 1"x3"	0,0254	0,103	Listón de sujeción de pino	0,104	N/A	0,244
Asphaltic vapour-permeable sheathing membrane Tyvek	0,0010	0,05	Membrana hidrófuga Tyvek	0,05	N/A	0,020
Oriented Stranded Board OSB	0,0095	0,095	Placa OSB estructural de pino	0,095	N/A	0,100
Wood framing 2x4"	0,1000	0,103	Tabiquería interior 2x4"	0,104	N/A	0,962
Interior glass wool insulation	0,1000	0,041	Lana de vidrio (22 kg/m ²)	0,041	N/A	2,439
Polyethylene film	0,0001	0,5	Lamina de Polietileno	0,5	N/A	0,002
Gypsum board	0,0100	0,24	Yeso cartón estándar (650 kg/m ³)	0,24	N/A	0,042
Interior pine siding	0,0120	0,095	Terciado ranurado de pino	0,095	N/A	0,126
Capa interior (Rsi=0,12)						

Tramo	Valor U	Rt	%
Sección estructural	0,525	1,9047619	14
Sección aislada	0,319	3,1347962	86
TOTAL (Ponderado)	0,348	2,8735632	100
Cumple con U y Rt establecidos	SI	SI	

*Para información detallada referente a los cálculos de transmitancia revisar Anexo 1

Como se mencionó anteriormente también se pueden ocupar perfiles de escuadría 2"x6" como pie derecho para el muro. Al modificar dicha dimensión el espacio interior del muro también se verá modificado dejando espacio para una mayor cantidad de aislación por lo que también se debe evaluar el desempeño térmico de esa posibilidad. Este tipo de construcción se puede encontrar bastante en establecimientos canadienses. Además es reconocido como uno de los tipos de tabiquería más convenientes ya que por su alto espesor posee buenas propiedades térmicas y su construcción no genera grandes complicaciones (Burrows, 2016). En la Tabla 3.2 se puede observar el cálculo resumido de transmitancia utilizando una estructura de 2"x6".

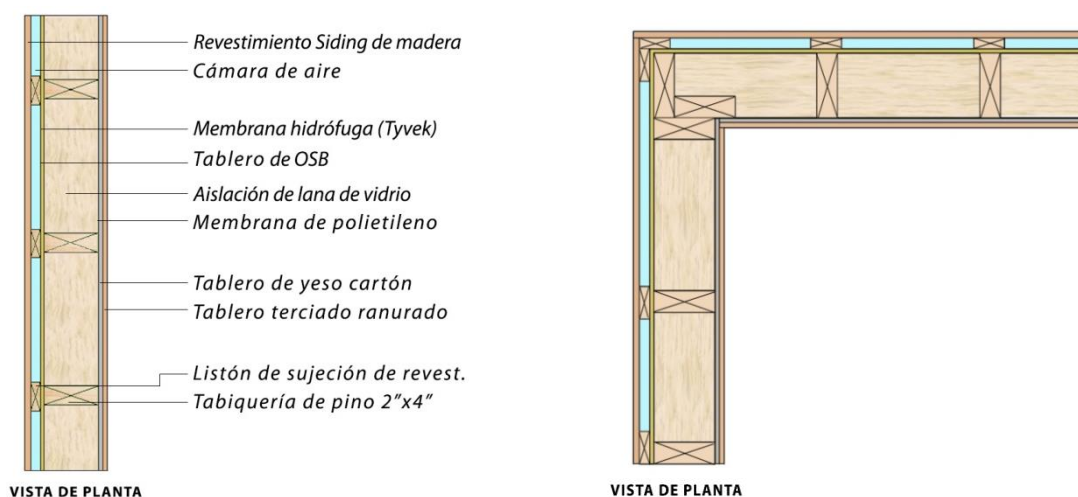


Tabla 3.2: Propiedades de los materiales y transmitancia térmica, solución de tabiquería de 2"x6"

MATERIAL CANADIENSE			MATERIAL CHILENO			
Capa exterior (Rse=0,12)	Espesor (m)	λ	Material homologado	λ	Rg (c. aire)	Espesor/ λ
Maibec ext. Wood Siding	0,0140	0,103	MSD pino de uso exterior	0,104	N/A	0,135
Airgap (semi-ventilated)	0,0254	N/A	Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,105	N/A
Pine wood joist 1"x3"	0,0254	0,103	Listón de sujeción de pino	0,104	N/A	0,244
Asphaltic vapour-permeable sheathing membrane	0,0010	0,05	Membrana hidrófuga Tyvek	0,05	N/A	0,020
Oriented Stranded Board OSB	0,0095	0,095	Placa OSB estructural de pino	0,095	N/A	0,100
Wood framing 2x6"	0,1500	0,103	Tabiquería interior 2x6"	0,104	N/A	1,442
Interior glass wool insulation	0,1500	0,041	Lana de vidrio (22 kg/m ²)	0,041	N/A	3,659
Polyethylene film	0,0001	0,5	Lamina de Polietileno	0,5	N/A	0,002
Gypsum board	0,0100	0,24	Yeso cartón estándar (650 kg/m ³)	0,24	N/A	0,042
Interior pine siding	0,0120	0,095	Terciado ranurado de pino	0,095	N/A	0,126
Capa interior (Rsi=0,12)						

Tramo	Valor U	Rt	%
Sección estructural	0,418	2,3923445	14
Sección aislada	0,229	4,3668122	86
TOTAL (Ponderado)	0,255	3,9215686	100
Cumple con U y Rt establecidos	SI	SI	

*Para información detallada referente a los cálculos de transmitancia revisar Anexo 1

3.1.2 Tabiquerías de madera con aislación rígida continua

Esta técnica de construcción consiste en la incorporación de aislación tanto al interior de los muros de tabiquería de 2"x6" (pie derechos cada 40 cm) como al exterior de esta. La aislación al interior de la tabiquería es de lana de vidrio, la cual se elige por su alta disponibilidad en el mercado de la construcción. Esta aislación rellena por completo la cavidad interior de la tabiquería (4"). Al exterior la aislación debe ser rígida con un espesor recomendado de 2" (Tabla 3.3), ya que de esa manera se pueden utilizar listones de 2"x2" de pino para generar el espacio donde se colocará dicha aislación. Al igual que en los casos anteriores, bajo el revestimiento exterior se deja una cámara de aire medianamente ventilada destinada a evitar la concentración de humedad al interior del muro. En la cara interna, bajo la aislación rígida de dicha cámara se dispone una membrana hidrófuga.

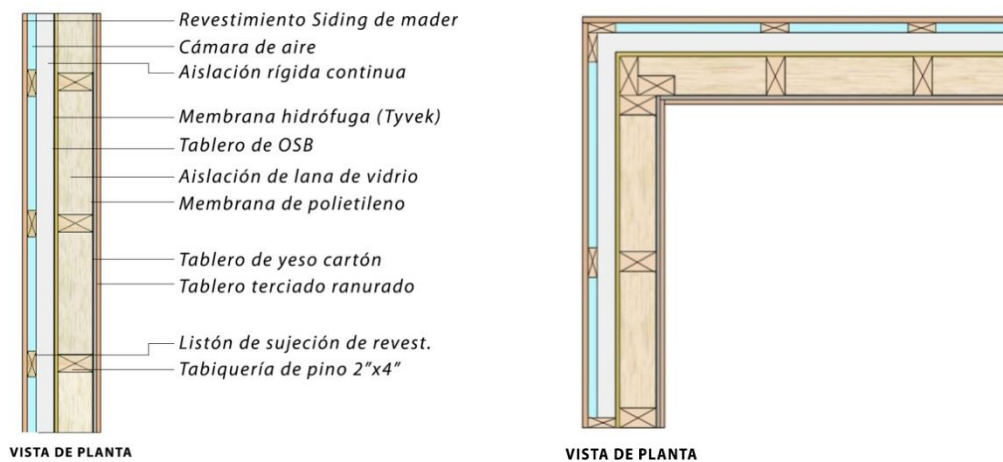


Tabla 3.3: Propiedades de los materiales y transmitancia térmica, solución de tabiquería de 2"x4" con aislación rígida exterior

MATERIAL CANADIENSE			MATERIAL CHILENO			
Capa exterior (Rse=0,12)	Espesor (m)	λ	Material homologado	λ	Rg (c. aire)	Espesor/ λ
Maibec ext. Wood Siding	0,0140	0,103	MSD pino de uso exterior	0,104	N/A	0,135
Airgap (semi-ventilated)	0,0254	N/A	Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,105	N/A
Pine wood joist 1"x3"	0,0254	0,103	Listón de sujeción de pino	0,104	N/A	0,244
Rigid Polystyrene or SONO-CLIMAT insulation (Screwed)	0,0500	0,0361	Poliestireno expandido (30 kg/m ²)	0,0361	N/A	1,385
Asphaltic vapour-permeable sheathing membrane	0,0010	0,05	Membrana hidrófuga Tyvek	0,05	N/A	0,020
Oriented Stranded Board OSB	0,0095	0,095	Placa OSB estructural de pino	0,095	N/A	0,100
Wood framing 2x4"	0,1000	0,103	Tabiquería interior 2x4"	0,104	N/A	0,962
Interior glass wool insulation	0,1000	0,041	Lana de vidrio (22 kg/m ²)	0,041	N/A	2,439
Polyethylene film	0,0001	0,5	Lamina de Polietileno	0,5	N/A	0,002
Gypsum board	0,0100	0,24	Yeso cartón estándar (650 kg/m ³)	0,24	N/A	0,042
Interior pine siding	0,0120	0,095	Terciado ranurado de pino	0,095	N/A	0,126
Capa interior (Rsi=0,12)						

*Para información detallada referente a los cálculos de transmitancia revisar Anexo 1

Tramo	Valor U	Rt	%
Sección estructural	0,3824	2,6150628	14
Sección aislada	0,2597	3,8505968	86
TOTAL (Ponderado)	0,270	3,7037037	100
Cumple con U y Rt establecidos	SI	SI	

3.1.3 Tabiquería doble con aislación interior continua

Esta solución constructiva consiste en muros que poseen una resistencia térmica bastante alta (Tabla 3.4), incluso para estándares estrictos y para lograr eso se construye un doble entramado de madera de pino, uno interior de 2"x4" y otro exterior de 2"x3" los cuales poseen pie derechos cada 40 cm y aislación de lana de vidrio en todas las cavidades internas, además se deja un espacio intermedio de 2" que se rellena con aislación continua para poder eliminar la mayor cantidad de puentes térmicos posible. La estructura mencionada se cubre con placas de OSB y luego con yeso cartón al interior y con revestimiento de Siding por el exterior (como se puede observar en el esquema).

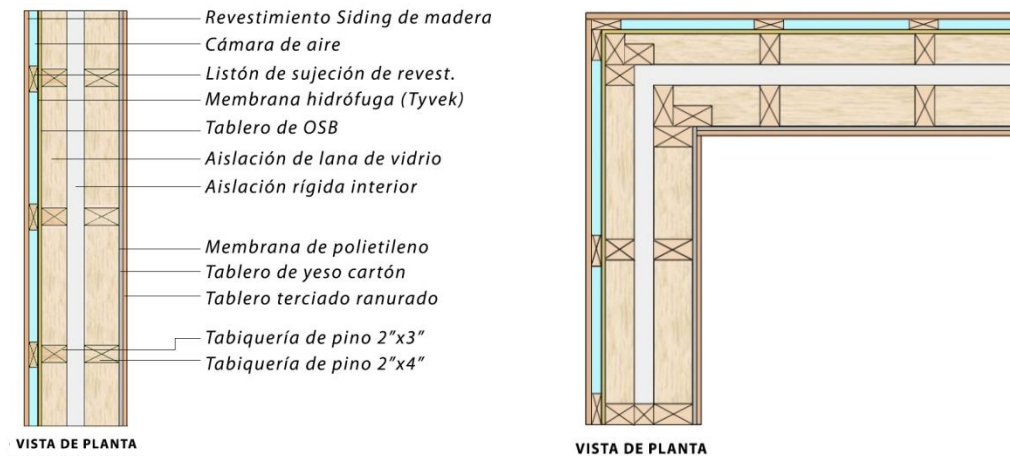


Tabla 3.4 Propiedades de los materiales y transmitancia térmica, solución de doble tabiquería 2"x3" y 2"x4"

MATERIAL CANADIENSE			MATERIAL CHILENO			
Capa exterior (Rse=0,12)	Espesor (m)	λ	Material homologado	λ	Rg (c. aire)	Espesor/ λ
Maibec ext. Wood Siding	0,0140	0,103	MSD pino de uso exterior	0,104	N/A	0,135
Airgap (semi-ventilated)	0,0254	N/A	Camara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,105	N/A
Pine wood joist 1"x3"	0,0254	0,103	Listón de sujeción de pino	0,104	N/A	0,244
Oriented Stranded Board OSB	0,0095	0,095	Placa OSB estructural de pino	0,095	N/A	0,100
Wood framing 2"x3"	0,0750	0,103	Tabiquería interior 2x3"	0,104	N/A	0,721
Interior glass wool insulation	0,0750	0,041	Lana de vidrio (22 kg/m ²)	0,041	N/A	1,829
Rigid Polystyrene or SONO-CLIMAT insulation (Screwed)	0,0500	0,0361	Poliestireno expandido (30 kg/m ²)	0,0361	N/A	1,385
Asphaltic vapour-permeable sheathing membrane	0,0010	0,05	Membrana hidrófuga Tyvek	0,05	N/A	0,020
Wood framing 2"x4"	0,1000	0,103	Tabiquería interior 2x4"	0,104	N/A	0,962
Interior glass wool insulation	0,1000	0,041	Lana de vidrio (22 kg/m ²)	0,041	N/A	2,439
Polyethylene film	0,0001	0,5	Lamina de Polietileno	0,5	N/A	0,002
Gypsum board	0,0100	0,24	Yeso cartón estándar (650 kg/m ³)	0,24	N/A	0,042
Interior pine siding	0,0120	0,095	Terciado ranurado de pino	0,095	N/A	0,126
Capa interior (Rsi=0,12)						

Tramo	Valor U	Rt	%
Sección estructural	0,248	4,0322581	14
Sección aislada	0,157	6,3694268	86
TOTAL (Ponderado)	0,17	5,8823529	100
Cumple con U y Rt establecidos	SI	SI	

*Para información detallada referente a los cálculos de transmitancia revisar Anexo 1

3.2 Cumplimiento de estándares planteados

Como se puede observar en la tabla 3.5 que resume los resultados relacionados al cumplimiento de los estándares, todos los tipos de muro analizados cumplen con los valores mínimos establecidos. El muro de tabiquería simple de 2"x4" se encuentra casi en el límite de las exigencias de valor U y Rt establecidas en el Código Nacional de la Construcción de Canadá, mientras que el muro de doble tabiquería las supera en gran medida. El muro de tabiquería simple de 2"x6" y el muro de tabiquería de 2"x4" con aislación rígida exterior parecen ser bastante similares a nivel de resistencia y transmitancia térmica, sin embargo, las diferencias en la composición de cada uno de ellos podría mostrar diferencias en los análisis de desempeño térmico que se realizarán en el capítulo 04 de este estudio.

La construcción de estos muros en Canadá no considera cadenetras debido al tamaño y poca separación de las piezas utilizadas, es por eso que los cálculos consideran 14% de estructura (correspondiente a los pie derechos), sin embargo, todos los valores U ponderados de muro fueron calculados, además, con 20% de estructura y los resultados no variaron en más de 0,01 W/m²K por lo que aun así todos cumplen con los estándares establecidos.

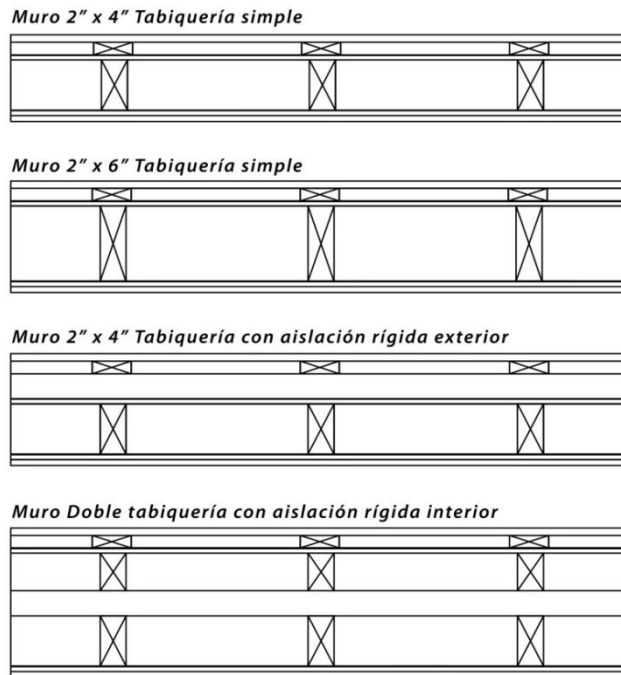


Tabla 3.5 Resumen de valores U y cumplimiento con estándares planteados.

Tipo de muro	Valor U	NBC of Canada	TDR _e	Cumple
2"x 4"	0,348	0,36	0,4	Sí
2"x 6"	0,255	0,36	0,4	Sí
2"x 4" + Aislación	0,27	0,36	0,4	Sí
Doble tabique	0,17	0,36	0,4	Sí

4. ESTUDIOS DE DESEMPEÑO TÉRMICO

En este capítulo se llevarán a cabo diferentes estudios de desempeño térmico realizados a las diferentes soluciones constructivas de muro que se presentaron en el capítulo anterior. Con el objetivo de obtener resultados más reales primero se hará un análisis de flujo térmico en cada uno de los tipos de muro identificados para evaluar la ocurrencia de puentes térmicos ya que estos pueden causar diferencias notorias en el desempeño térmico por pérdidas de calor, incluso pueden generar otro tipo de problemas como condensaciones superficiales, aparición de moho y deterioro de las estructuras. (Muñoz & Bobadilla, 2012)

Se hace énfasis en los puentes térmicos lineales de las uniones de elementos ya que en estructuras compuestas por elementos de madera son aquellos que pueden generar pérdidas más significativas a nivel de transmisión de calor (Tadeu et al, 2011). Los valores de transmitancia térmica lineal (Ψ) que se obtengan para las uniones entre los muros y los diferentes elementos del edificio como techo, piso y entrepiso, servirán para analizar el porcentaje de influencia de los puentes térmicos en cada unión y además serán incorporados en las simulaciones que se realizarán de manera posterior.

Como segunda parte de este capítulo, apoyado de un estudio tipológico de establecimientos educacionales de la zona austral de Chile, se seleccionará un establecimiento en el cual se realizarán simulaciones energéticas térmico-dinámicas incorporando todos los resultados de transmitancia térmica y puentes térmicos obtenidos previamente para cada uno de los diferentes tipos de muro analizados. Una vez obtenidos los resultados de demanda energética del establecimiento se podrá evaluar como varía dicha demanda con la utilización de cada una de las soluciones constructivas de muro, y así poder medir la magnitud de los cambios y beneficios generados por estas.

4.1 Estudios de flujo térmico (Simulación de transmisión de calor)

A continuación se pueden observar los estudios de flujo térmico de cada uno de los tipos de muros estudiados. Estos estudios se realizaron utilizando el software LBNL THERM versión 7.2 como herramienta de simulación, con el fin de obtener datos relevantes acerca del desempeño térmico de cada tipo de muro. Como se mencionó anteriormente, algunos de estos datos serán ingresados a las simulaciones térmico-dinámicas que se realizarán de manera posterior para así obtener resultados más precisos. Para visualizar planillas Excel de datos obtenidos en THERM 7.2 se utilizó el software LBNL WINDOW 7.4

4.1.1 Parámetros de entrada

Temperatura: Para realizar los estudios se utilizan las temperaturas estándar de medición planteadas en el Código Técnico de la Edificación de España (CTE), 20°C al interior y 0°C al exterior, de esta manera los resultados obtenidos pueden ser comparados con aquellos obtenidos en otros estudios que tomen como referencia dicho código.

Materiales utilizados:

Los materiales utilizados, y sus respectivas propiedades, son los que se encuentran en el listado del Anexo A de la NCh 853. Si algún material no aparece en el listado mencionado se utilizará las especificaciones dictadas por el fabricante chileno. Cada uno de los conjuntos de elementos que se mostrarán a continuación posee una tabla de datos que muestra los materiales utilizados para el estudio.

Gravedad:

Para los estudios en vista de corte se utiliza la gravedad "Down" con la cual el software entiende que piso está ubicado en la parte superior de la pantalla y para los estudios en vista de planta se utiliza la gravedad llamada "Into screen" con la cual el software entiende que el piso se está observando desde arriba y que todo flujo representado en los resultados se desplazará de manera horizontal.

Coefficiente de film:

Este coeficiente de film representa el inverso que las resistencias superficiales, es decir, $1/R_{si}$ o $1/R_{se}$. Los valores de R_{si} y R_{se} incorporados son los mencionados en la tabla 2 de la NCh 853, por lo tanto cuando el flujo de calor sea horizontal el coeficiente interior será $1/0,12$ y el exterior será $1/0,05$ cuando no haya cámaras de aire presentes, en el caso de haber cámara de aire ambos coeficientes serán $1/0,12$. Por otro lado cuando el calor fluya de manera vertical a través de un elemento horizontal (o con una pendiente menor o igual que 60°) los valores del coeficiente serán $1/0,09$ para el interior y $1/0,05$ para el exterior cuando el flujo sea ascendente. Cuando el flujo sea descendente el coeficiente será $1/0,17$ para el interior y $1/0,05$ para el exterior.

Detalles de Unión:

Todos los detalles de unión entre elementos que se muestran en los esquemas de transmisión de calor se obtienen de la revisión bibliográfica de diferentes códigos y guías canadienses como la “Guide for designing energy efficient enclosures in North America” y “Canadian Wood-frame construction”.

Techo: Para los esquemas de traspaso de calor de uniones entre elementos se utilizó una techumbre de cercha de madera de pino con pendiente de 20° común en Chile y Canadá, en la Figura 4.1 se puede ver el detalle. Dicha techumbre posee aislación de lana de vidrio que asegura el valor U mínimo de 0,25 w/m²k que se menciona en el artículo 4.1.10 O.G.U.C para la zona austral de Chile. Los valores Rsi y Rse utilizados para este elemento en THERM son los mencionados en Nch853 para flujo ascendente en elementos horizontales con presencia de cámara de aire interior.

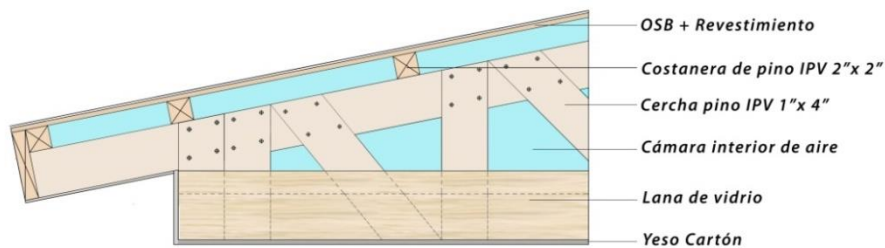


Figura 4.1 Detalle techumbre utilizada en detalles de unión en THERM

Piso: Para los detalles de uniones del muro con el piso se utilizó el respectivo tipo de muro para cada análisis junto con un piso compuesto por fundaciones y un radier de hormigón (Figura 4.2). El valor Rsi utilizado en THERM es el mencionado en Nch853 para flujo descendente en elementos verticales y el valor Rse corresponde a 0 ya que el piso está en contacto con el terreno.

Ventanas: Ya que el estudio se centra en el desempeño térmico de la utilización de los diferentes muros de madera, se utilizará, para todos los tipos de muro, el mismo tipo de ventana de doble vidrio hermético con marco de PVC (utilizados tanto en climas fríos de Chile como Canadá), la ventana utilizada en el modelo se dibujó a partir de un detalle técnico de la marca Wintec.

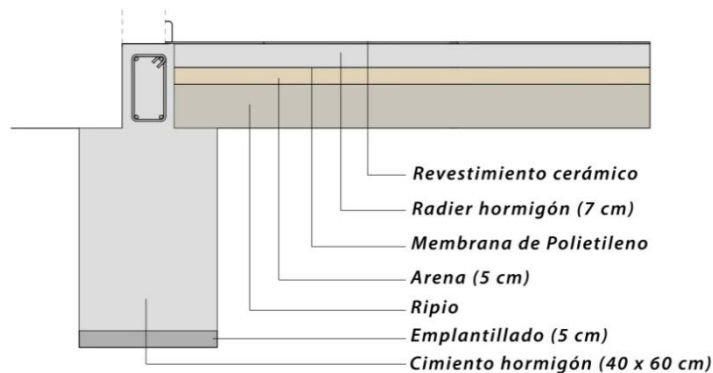


Figura 4.2 Detalle de piso en contacto con terreno utilizado en THERM

Datos entregados por el software:

El software THERM entrega diferentes tipos de resultados que permiten visualizar la transferencia de calor a través de los elementos analizados en una serie de esquemas bidimensionales.

Isotermas: Se forman líneas que siguen una misma temperatura a través del muro, estas demuestran si existen grandes diferencias producidas por la forma, disposición y propiedades de los elementos como ocurre en el ejemplo de la Figura 4.3 que posee material aislante con elementos intermedios de acero que pierden calor.

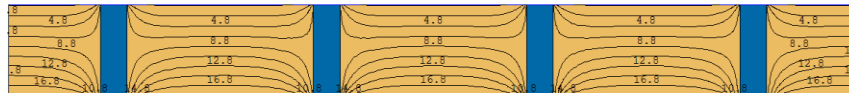


Figura 4.3: Ejemplo de diagrama de isotermas

Flujo de calor en infrarrojo: Muestra el flujo térmico del calor a través de colores que están relacionados con una escala gráfica como la que se puede ver en la Figura 4.4, dicha escala depende de las máximas y mínimas temperaturas configuradas por el usuario de la herramienta. Para todos los estudios que se mostrarán a continuación la escala es (0,0°C – 20,0°C)

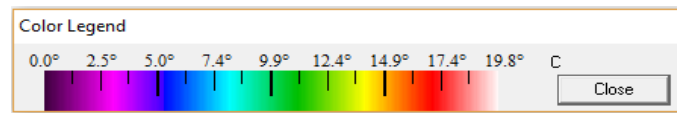


Figura 4.4: Escala gráfica por colores para diagramas de flujo de calor infrarrojo

Flujo vectorial: Esquemas que muestran la dirección del flujo térmico a través de vectores. Como se puede ver en la Figura 4.5 en este tipo de esquemas la magnitud del vector ejemplifica la magnitud del flujo de calor.

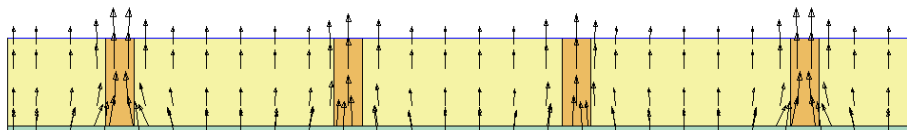


Figura 4.5: Ejemplo de diagrama de flujo vectorial de calor

Temperatura superficial: Es la temperatura que posee la superficie de un elemento estudiado, ya sea un muro, piso o cielo y esta puede ser interior o exterior. Su medición es útil al momento de querer identificar los puntos de mayor y menor pérdida de calor.

Para este proyecto los datos de T° superficial obtenidos en THERM fueron exportados hacia el software WINDOW 7.4 para obtener una planilla excel con valores ordenados en una base de datos. De esta manera fue posible crear gráficos con los datos de T°sup. cada 5 cm en el tramo lineal del muro escogido.

También se obtuvieron los valores U ponderados de los detalles de unión entre elementos, los cuales pueden ser incorporados en el software de simulación térmico-dinámica DesignBuilder en la sección “transmitancia lineal del puente térmico en uniones”. Para obtener el valor U ponderado de un detalle en THERM se debe seleccionar la condición de borde del detalle y luego se le incorpora un nombre a ese valor U para diferenciarlo del resto del muro. Al momento de seleccionar “Show U values” o “Mostrar valores U” se obtendrán los datos de transmitancia térmica, longitud y flujo térmico del detalle de unión en una tabla similar a la de la Figura 4.6.

	U-factor W/m2-K	delta T C	Length mm	Rotation		Heat Flow W
Unión muro-entrepiso	0.4226	20.0	370.507	N/A	Total Length	3.1316

Figura 4.6: Ejemplo de tabla de resultados entregada por Therm

Los valores de transmitancia térmica lineal (Ψ) de cada una de las uniones entre elementos se obtienen a través de la utilización de las siguientes fórmulas, incorporando los valores obtenidos con el software THERM (Los cálculos se llevan a cabo según los procedimientos y fórmulas indicados en la normativa UNE-EN ISO 10211-1 de cálculo de puentes térmicos)

$$\psi = l_j \cdot (U_{factor (PT)} - U_{muro})$$

Donde,

- Ψ Transmitancia térmica lineal del puente térmico (W/m K)
- U factor (PT) Transmitancia térmica del modelo 2d del puente térmico, entregada por el software
- U muro Transmitancia térmica ponderada del muro (tramo lineal constante)
- l_j Longitud dentro del modelo geométrico bidimensional sobre la cual se obtiene el valor U factor (PT)

Para el cálculo de transmitancia térmica lineal de los detalles de unión muro-piso y muro-techo, además de considerar los valores de transmitancia del muro y del puente térmico se deben considerar también los valores U del piso y el techo respectivamente. Para estos casos la fórmula utilizada para obtener el valor Ψ es la siguiente:

$$\psi = L^{2D} - \sum U_j \cdot l_j$$

$$L^{2d} = U \text{ factor (PT)} \times l(\text{PT})$$

Donde,

Ψ	Transmitancia térmica lineal del puente térmico (W/m K)
L^{2d}	Coficiente acoplamiento lineal obtenido en el modelo bidimensional (W/m K)
U factor (PT)	Transmitancia térmica del modelo 2d del puente térmico, entregada por el software (W/m ² K)
l(PT)	Longitud total del modelo bidimensional que incorpora el puente térmico mencionado (m)
U_j	Transmitancia térmica ponderada de un elemento de flujo homogéneo, ya sea muro, piso o techo (W/m ² K)
l_j	Longitud del modelo geométrico bi-dimensional sobre el cual se aplica el valor U_j (m)

Los resultados de transmitancia térmica lineal (Ψ) obtenidos se miden en W/mK y representan el exceso de calor que se transfiere por la presencia del puente térmico, en otras palabras, mientras el resultado se acerque más a 0 la influencia del puente térmico será menor, si el resultado es negativo, la influencia es positiva generando menores pérdidas de calor que los muros en sí.

Los cálculos detallados utilizados para obtener los valores (Ψ) para cada uno de los casos se pueden revisar en la sección “Cálculo de transmitancia lineal a través de planillas excel utilizando fórmulas ISO EN 10211-1” en el **Anexo 1**.

A continuación se presentarán los estudios realizados con THERM a cada uno de los tipos de muro mencionados anteriormente, incluyendo además un “Muro base” establecido.

4.1.2 Muro “Base”

Para poder comprender la diferencia entre los tipos de muro analizados en este estudio y uno utilizado comúnmente en Chile, se decide establecer como “base” un muro de madera cuyas propiedades térmicas y estructurales cumplan con lo establecido en la Normativa y que sea utilizado en envolventes verticales de establecimientos de la zona austral. Es por eso que se selecciona del “Listado oficial de soluciones constructivas para Acondicionamiento térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo” el muro que posee el código “1.2.M.C24.32”, siguiendo las especificaciones de espesor de aislación que el mismo documento menciona para la zona 7 y así cumplir con el valor $U = 0,6 \text{ W/m}^2\text{k}$ exigido por el Art. 4.1.10 O.G.U.C.

Forma de cumplir con las exigencias				Densidad material aislante	Institución	Vigencia
Certificado de ensaye	---	Cálculo (NCh 853)	X	40kg/m ³	Andes Construction Chile S.A.	NCh 853
Corte:				Detalle (opcional)		

Figura 4.7: Muro código “1.2.M.C24.32” del listado de acreditaciones térmicas

Como se puede apreciar en la Figura 4.7 el tipo de muro escogido está constituido por una estructura de tabiquería de madera de pino de escuadría de 2”x3” con aislación de lana mineral de 40 kg/m^3 de densidad y un espesor de 65 mm especificados para la zona 7 de Chile. De revestimiento interior se especifica yeso cartón estándar de 15 mm de espesor y en el exterior se colocan placas de fibrocemento de 8 mm de espesor revestidas con pintura acrílica para fibrocemento. La suma de todos los elementos mencionados lo hace alcanzar el valor U de $0,59 \text{ W/m}^2\text{k}$.

En la figura 4.8 se pueden observar diferentes diagramas de transferencia de calor entregados por el software THERM para el de muro base, en el diagrama de flujo de calor infrarrojo se puede ver que la temperatura forma ondas más pronunciadas en la zona donde se encuentran los elementos estructurales de madera al interior del muro, lo que significa que estos conforman puentes térmicos y fluye más calor por ese lugar, esto se comprueba al observar el esquema de flujo vectorial de calor que muestra vectores más alargados en la zona de la estructura de madera lo que significa que en ese sector el flujo de calor es mayor, también, se observa por la dirección de los vectores que en algunos tramos cercanos a la estructura el flujo tiende a dirigirse hacia esta (la mayor concentración de vectores no indica que exista mayor flujo de calor, solo es resultado de la grilla de elementos finitos que el software estableció para analizar el muro)

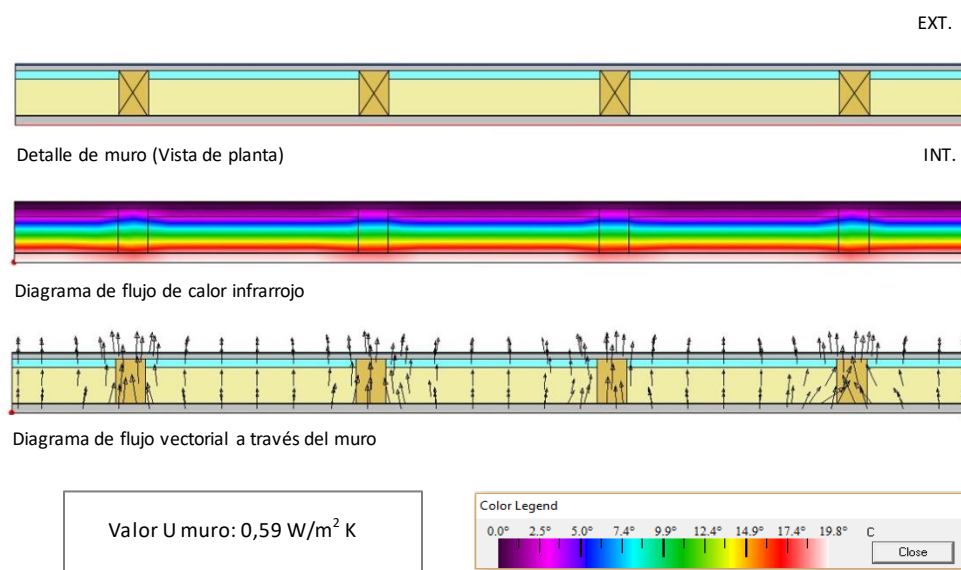


Figura 4.8: Esquemas de flujo térmico, tramo lineal muro base.

En el diagrama de isotermas (Figura 4.9) se puede observar que al interior del muro las líneas que representan una misma temperatura se deforman al acercarse a la estructura de madera, al mismo tiempo el gráfico de temperatura superficial exterior, que representa los valores de 28 mediciones de T° a lo largo del muro, muestra una línea ondulada en la cual la diferencia entre el punto de mayor T° sup. exterior (0.921 °C) y menor T° sup. exterior (0.59 °C) es 0,331°C por lo tanto se puede deducir que en las secciones del muro donde hay estructura se pierde casi el doble de calor que en las zonas donde solamente hay aislación y aire interior. El diagrama de isotermas demuestra, además, que la temperatura superficial interior también varía según la composición interior del muro, presentando una superficie más fría en las zonas del muro que poseen elementos estructurales en su interior.

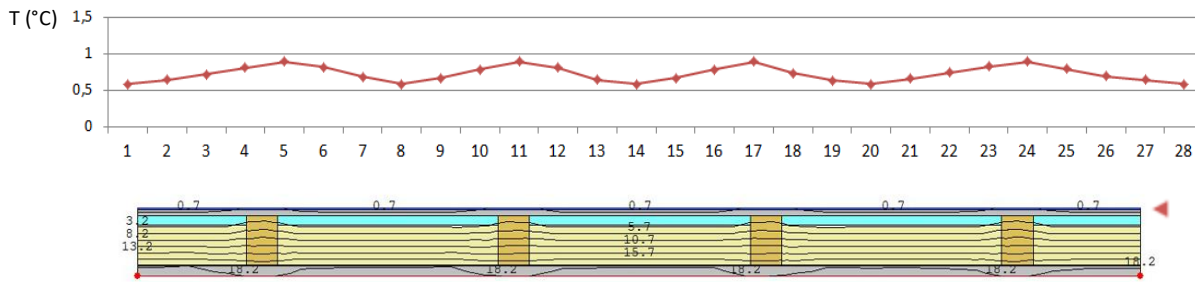


Figura 4.9: T° superficial exterior y diagrama de isotermas, muro base

Uniones entre elementos:

El análisis de flujo de calor del muro lineal demostró el comportamiento de los puentes térmicos al interior de este pero para obtener resultados más verídicos en los estudios de simulación térmico dinámica que se llevarán a cabo más adelante es necesario analizar el comportamiento de las uniones entre elementos. En la Figura 4.10 se puede observar que las variaciones producidas son bastante considerables, en el caso de las uniones de esquina (muro-muro) el diagrama de isotermas muestra que en la esquina interior se presenta el punto en el que la T° superficial interior es más fría.

Al observar el valor U ponderado del detalle de unión entregado por el software (0,681 W/m²K) se puede notar que es más alto que el de la sección del muro lineal, indicando que la resistencia térmica de la unión es menor por lo tanto conforma un puente térmico, eso mismo se comprueba al observar que la transmitancia térmica lineal de la unión (Ψ), es positiva indicando que se pierde más calor por esa zona. Para el caso de la unión muro-marco el efecto es el mismo que la unión muro-muro pero en una magnitud menor ya que en este caso los valores U del muro (0,59 W/m²k) con el de la unión poseen un diferencial más bajo, por lo tanto a pesar de que su transmitancia térmica lineal (Ψ) es positiva se acerca más a 0 W/m K que en el caso de las esquinas.

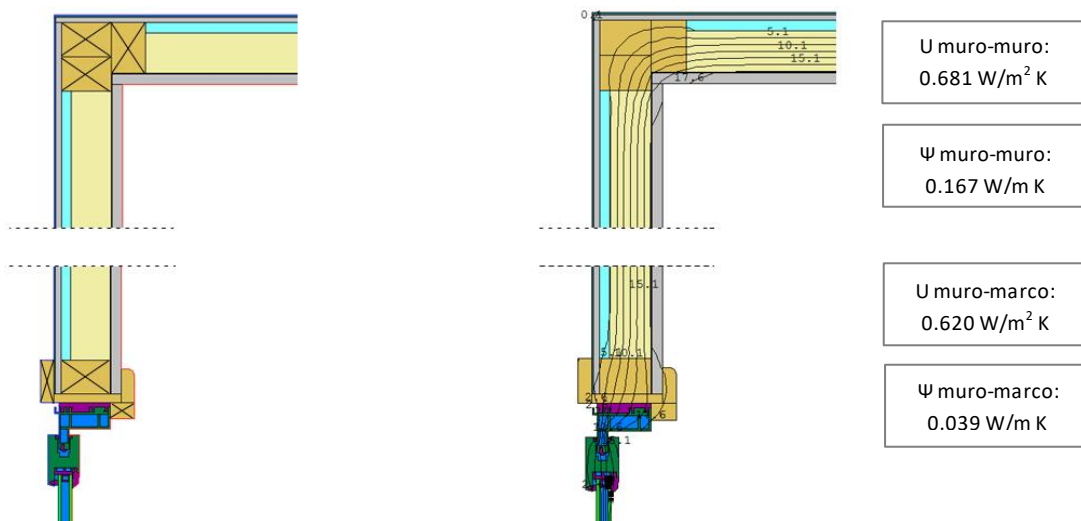


Figura 4.10: Detalle y diagrama de unión de esquina y unión muro-marco en vista de planta, muro base

En el diagrama de la figura 4.11 se puede observar que, en la sección de la estructura que conecta los muros con el entrepiso, el cual posee 50 mm de aislación rígida interior, las isothermas tienden a acercarse al borde exterior especialmente en la solera superior del muro de abajo por tener dos piezas de madera unidas que conforman un puente térmico mayor. Al observar el valor U de la unión entregado por el software se puede ver que es más alto que el del muro en sí y es por eso que su transmitancia lineal es positiva.

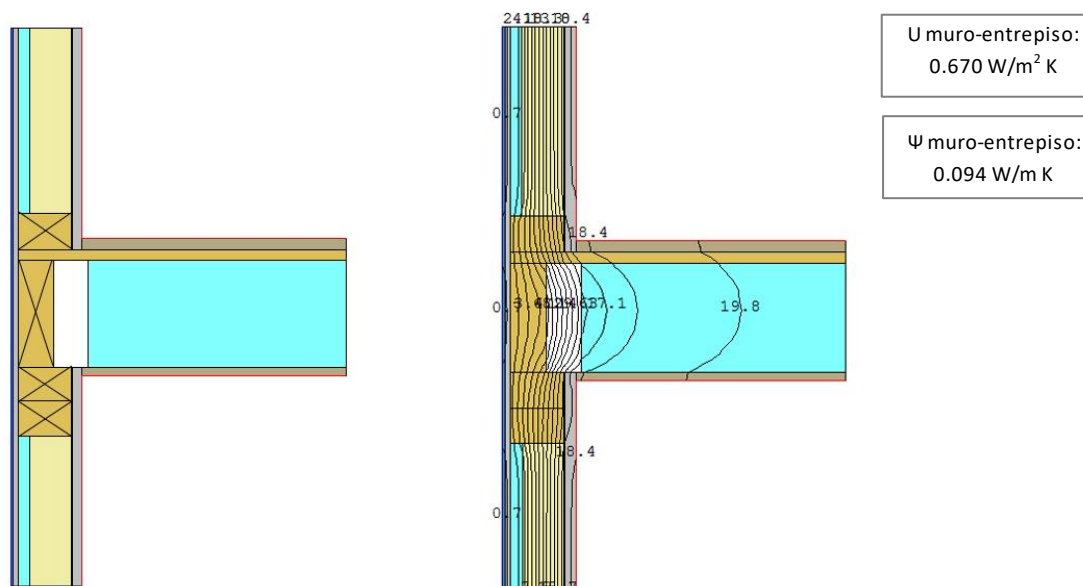


Figura 4.11: Detalle y diagrama isothermas unión muro - entrepiso, en vista de corte

Para el caso de las uniones muro-techo (Figura 4.12) el valor de transmitancia térmica lineal es más alto que los otros detalles mencionados anteriormente, esto probablemente se relaciona con que dicha unión posee más elementos estructurales porque se puede observar en el diagrama de isothermas como se deforman las líneas cuando alcanzan la solera inferior.

Al observar la unión muro-piso (Figura 4.13) se puede notar que es la que presenta la mayor pérdida de calor con un valor U de 0,991 W/m²K en la unión, lo que se traduce en un valor de transmitancia lineal notoriamente más alto que los otros (0,696 W/m K). Es probable que esta gran pérdida de calor en la unión se produzca debido a que los elementos estructurales del muro (solera inferior) están prácticamente en contacto directo con elementos de hormigón como el sobrecimiento, cuyas propiedades térmicas son inferiores a las de la madera.

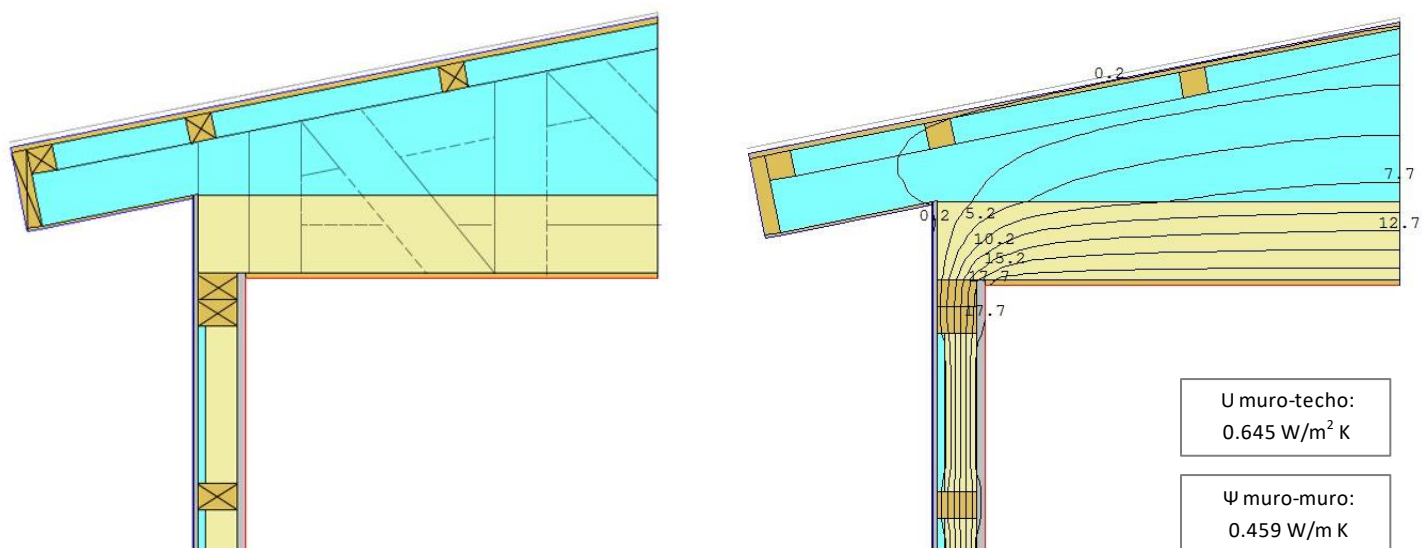


Figura 4.12: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-techo, en vista de corte utilizando Muro Base

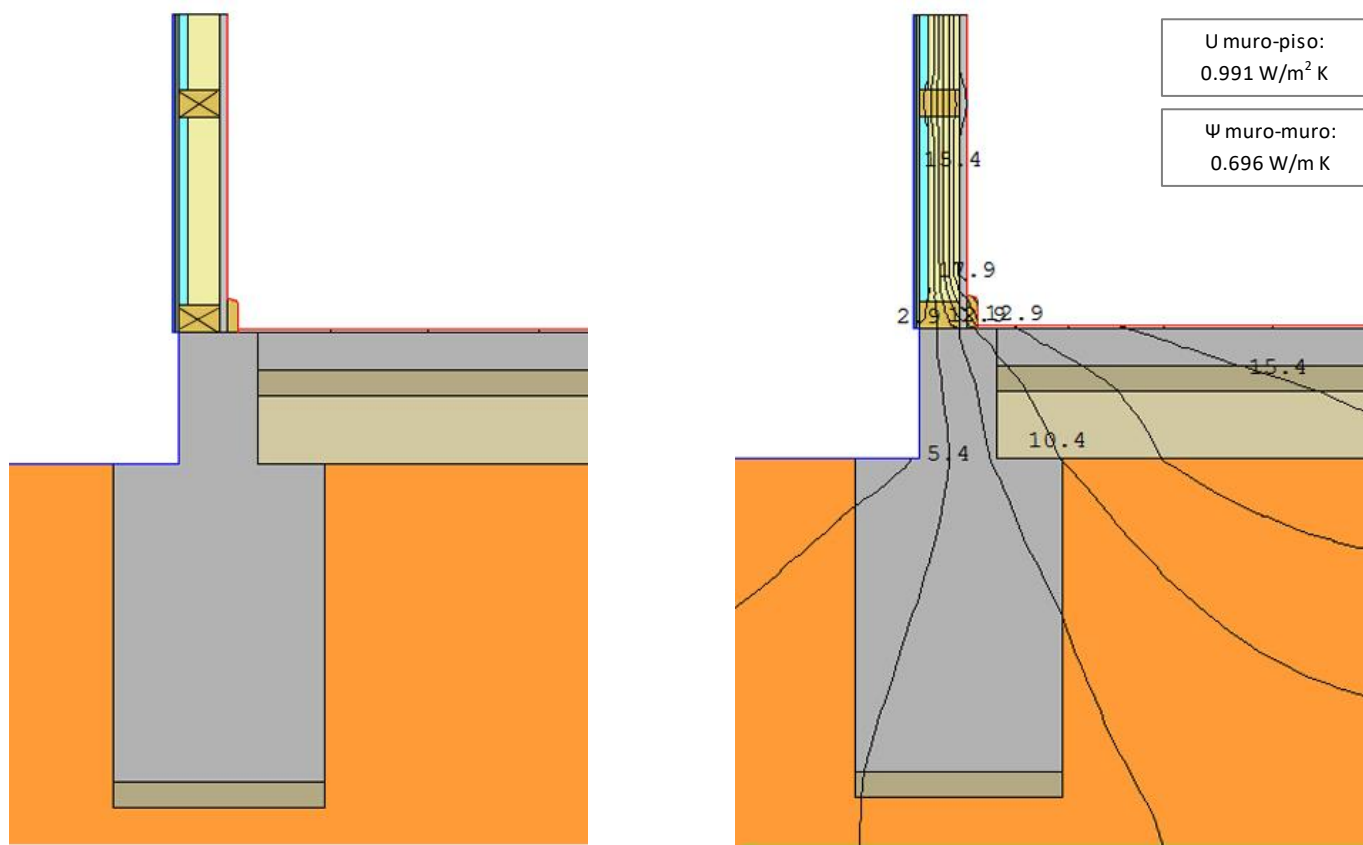


Figura 4.13: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-piso, en vista de corte utilizando Muro Base

4.1.3 Muros eficientes de madera

4.1.3.a Tabiquería simple con estructura de 2"x4"

Como se mencionó anteriormente este tipo de muro cumple con los estándares de transmisión de calor mencionados en los TDR e el NBC of Canada. El diagrama de flujo de calor infrarrojo de la Figura 4.14 muestra que el calor forma ondas en las zonas internas del muro que poseen elementos de madera, sin embargo, si se compara con el caso anterior (muro base) la zona en la que esas ondas se producen de manera más evidente se ubica más lejos de la cara exterior del muro por lo que la diferencia en las T° sup. exteriores debería ser menor, esto se produce gracias a que el aumento de espesor de los materiales e incorporación de la cámara de aire medianamente ventilada en la cara exterior han mejorado bastante las propiedades térmicas del muro.

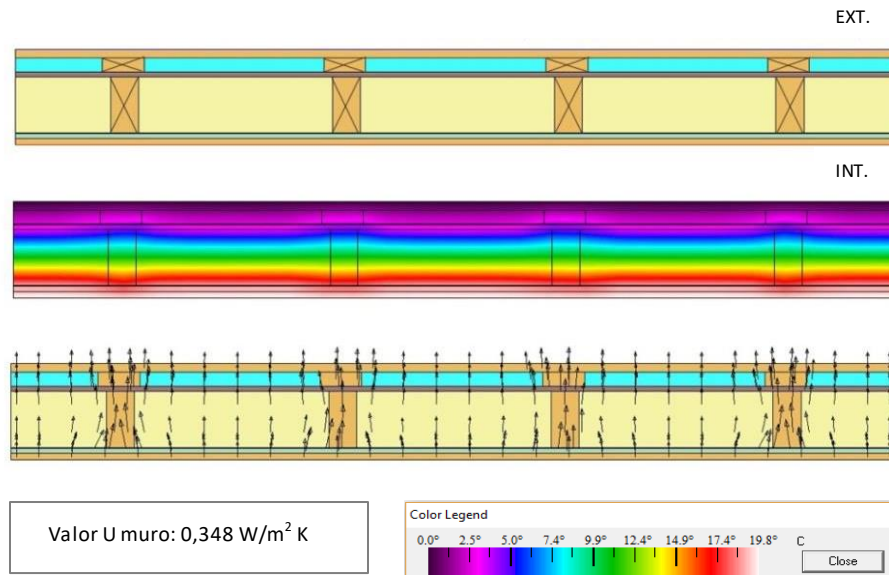


Figura 4.14: Esquemas de flujo térmico, tramo lineal de muro tabiquería 2"x4"

En la Figura 4.15 se puede ver que la diferencia entre las temperaturas superficiales exteriores del muro en las secciones de la estructura ($0,418^{\circ}\text{C}$) y aislación ($0,375^{\circ}\text{C}$) es $0,043^{\circ}\text{C}$ lo que comparado con el caso anterior cuya diferencia fue $0,331^{\circ}\text{C}$ demuestra que este tipo de muro logra disminuir el puente térmico producido por la estructura en aproximadamente un 85%. De este gráfico también se puede deducir que la cámara de aire medianamente ventilada posee una gran influencia en la T° interior del muro ya que en su cara interior la T° varía entre los $2,8^{\circ}\text{C}$ y los $3,6^{\circ}\text{C}$, diferencia mucho mayor que la T° superficial exterior, se puede deducir que luego de pasar por esta cámara las temperaturas se regulan.

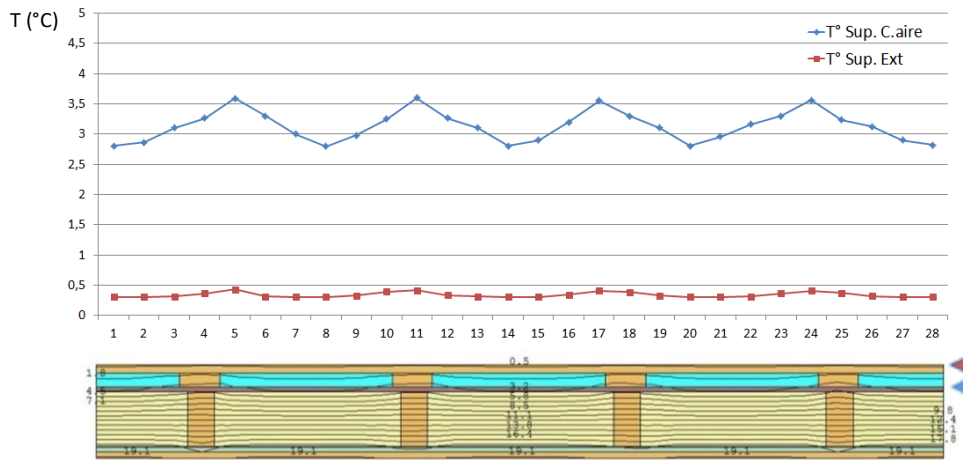


Figura 4.15: T° superficial exterior y diagrama de isotermas, tabiquería de 2"x4"

Uniones entre elementos:

Al momento de analizar los detalles de uniones entre elementos se pueden ver variaciones más considerables, para el caso de las uniones de muros en una esquina (Figura 4.16). se puede observar que el valor U ponderado de la unión entregado por THERM es más alto que el del tramo lineal del muro, acercándose a $0,4 \text{ w/m}^2\text{K}$ y es por eso que la transmitancia térmica lineal (Ψ) es positiva ($0,084 \text{ W/mK}$) indicando que se pierda más calor por ese punto, además en el diagrama se puede ver que las isotermas se cortan en la esquina por lo que es el punto interior más frío del detalle (Temperatura superficial interior $17,1^\circ\text{C}$). Las uniones muro-marco generan algo de pérdida de calor pero esta no es muy diferente a al valor ponderado del tramo lineal del muro, es por eso que a pesar de ser positivo, el valor de transmitancia térmica lineal de esta unión se acerca bastante a $0 \text{ W/m}^2\text{K}$.

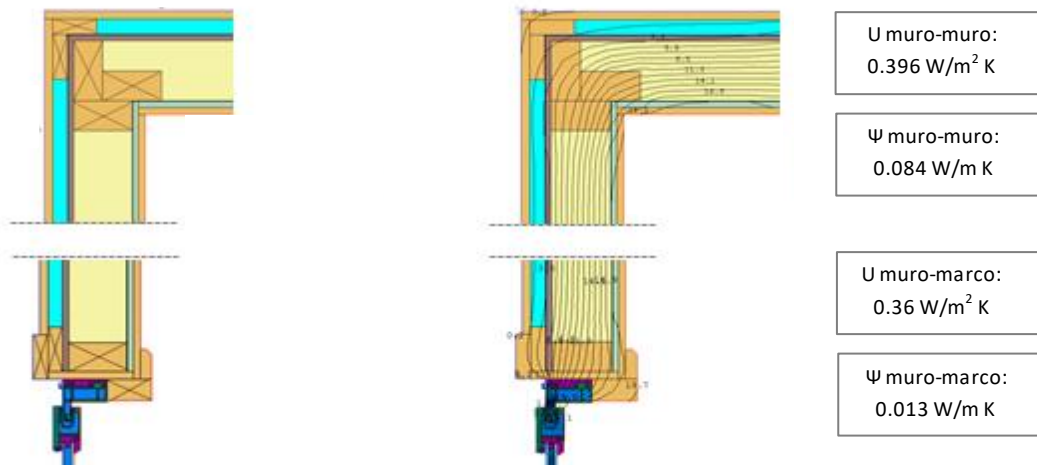


Figura 4.16: Detalle y diagrama de unión de esquina y unión muro-marco en vista de planta, tabiquería 2"x4"

Para el caso de las uniones entre muros y entrepiso (Figura 4.17) se puede observar que el punto de mayor temperatura superficial exterior es el punto donde se unen los muros con el entrepiso llegando a $0,5^{\circ}\text{C}$, aun así se debe tener en cuenta dicha pérdida podría ser mayor ya que como se puede observar se incorporan 100 mm de aislación rígida (poliestireno expandido) al interior del entrepiso como parte de las técnicas utilizadas para este tipo de construcción en Canadá, esto con el fin de evitar en el mayor porcentaje posible dicha pérdida.

El valor de transmitancia térmica ponderada de la unión muro-entrepiso entregada por el software es $0,43 \text{ W/m}^2\text{K}$, valor que al ser comparado con el valor U de la sección lineal del muro ($0,348 \text{ W/m}^2\text{K}$) da a entender que la pérdida de calor es considerablemente mayor en este punto. Al observar el diagrama de isotermas se puede notar que la mayor pérdida de calor se produce porque la unión se conforma por varios elementos estructurales como las soleras cuya resistencia térmica es menor que la sección aislada del muro.

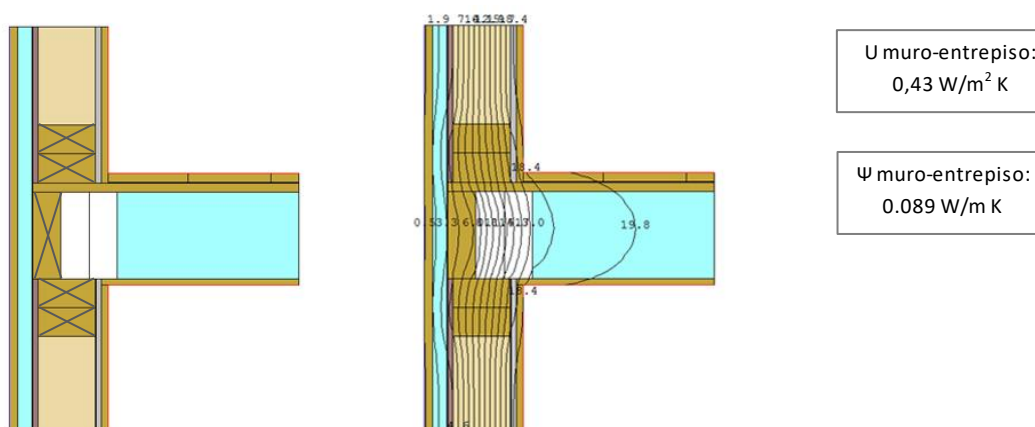


Figura 4.17 Detalle y diagrama isotermas unión muro - entrepiso, tabiquería 2"x4" en vista de corte

En el diagrama de la Figura 4.18 se puede observar cómo las isotermas tienden a acercarse a los bordes del muro a la altura de las soleras superiores además en este punto se alcanza una temperatura superficial exterior de $0,451^{\circ}\text{C}$, lo que si se compara con la temperatura superficial exterior máxima del tramo lineal del muro ($0,418^{\circ}\text{C}$) deja en evidencia que existe una pérdida de calor mayor. También se puede notar que el valor U entregado por THERM ($0,408 \text{ W/m}^2\text{K}$) es mayor que el del tramo lineal del muro ($0,348 \text{ W/m}^2\text{K}$).

El diagrama de isotermas de la unión muro-piso (Figura 4.19) muestra que las isotermas se cortan en el punto de la esquina interior donde el muro con el piso se conectan, siendo el punto más frío del detalle. El valor de transmitancia térmica lineal que alcanza la unión ($0,588 \text{ W/mK}$) deja en evidencia que la resistencia al paso del calor en ese punto es bastante deficiente, sin embargo, es importante tomar en cuenta que si se compara el desempeño térmico de esta unión con la del muro base se puede notar una gran mejora.

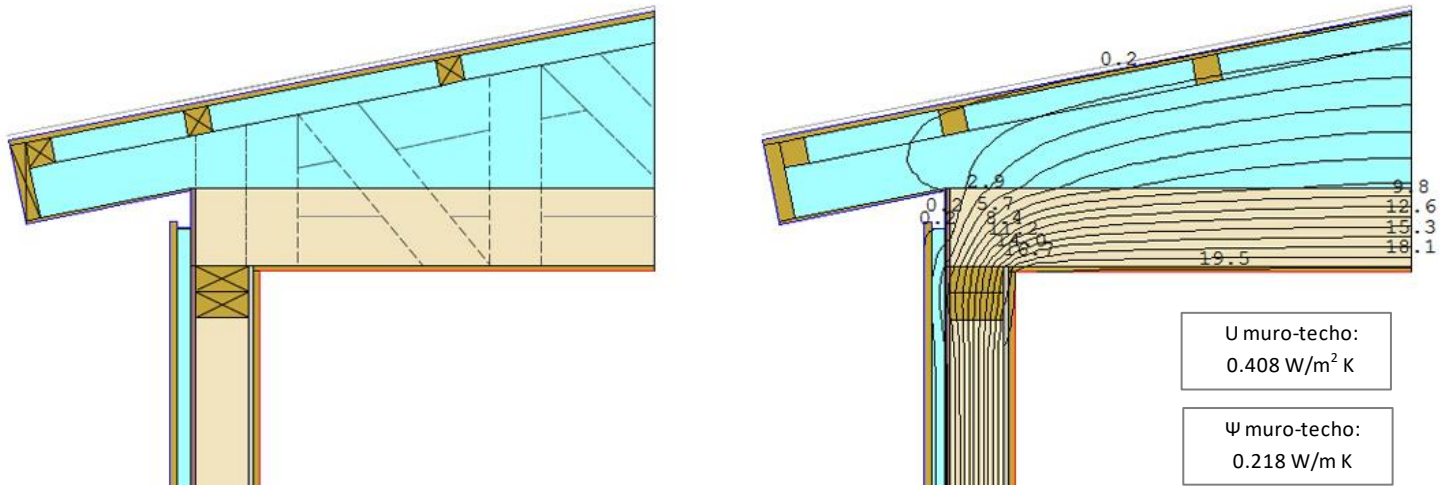


Figura 4.18: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-techo, en vista de corte utilizando tabiquería de 2"x4"

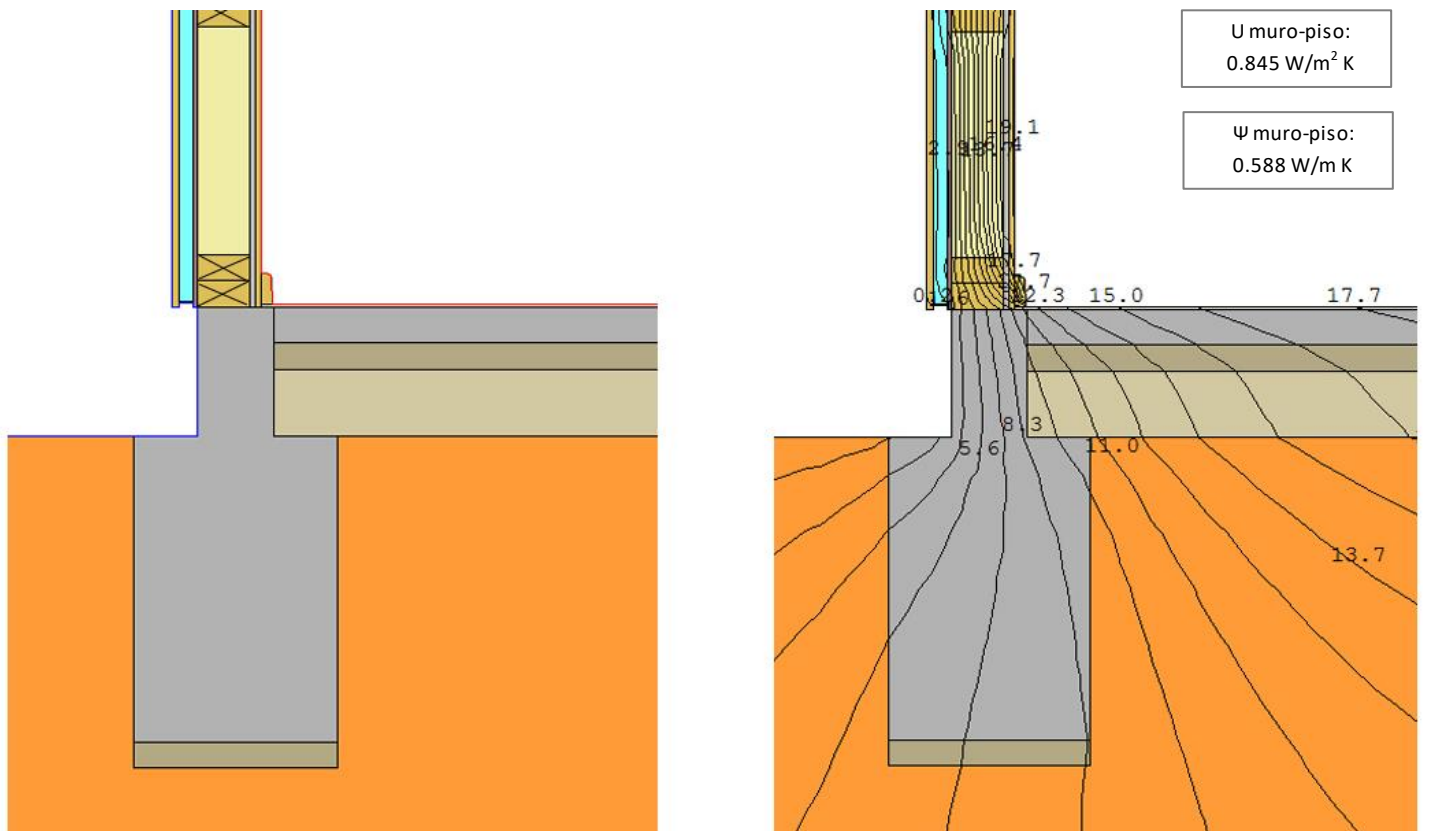


Figura 4.19: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-piso, en vista de corte utilizando tabiquería de 2"x4"

4.1.3.b Tabiquería simple con estructura de 2"x6"

Lo primero que se puede notar en la Figura 4.20 es que, gracias a que el muro posee un mayor espesor, la transmitancia térmica ponderada disminuyó en $0,093 \text{ W/m}^2\text{K}$ en comparación con el muro anterior (tabiquería simple de 2"x4"), mejorando notoriamente sus propiedades térmicas. El esquema de flujo de calor infrarrojo da a entender que las variaciones del flujo de calor al interior del muro se presentan de manera aún visible pero con una magnitud menos pronunciada que en casos anteriores, además a nivel de flujo vectorial se puede notar cierta disminución en la tendencia de los vectores a dirigirse hacia la estructura.

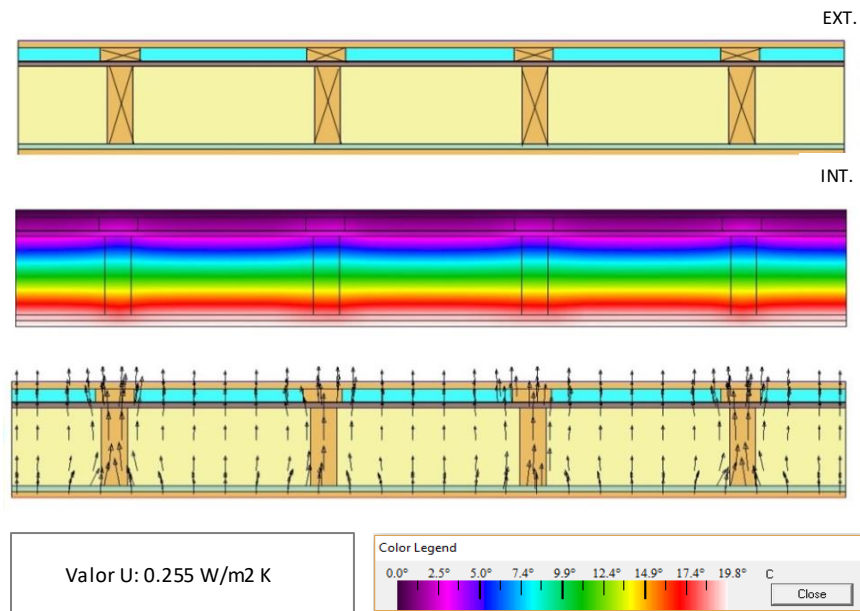


Figura 4.20: Esquemas de flujo térmico, tramo lineal de muro tabiquería 2"x6"

En la Figura 4.21 se pueden observar algunas diferencias entre las temperaturas superficiales exteriores del muro según sea estructura o sección aislada de este, en este caso la T° superficial varía entre $0,11^\circ\text{C}$ y $0,32^\circ\text{C}$ demostrando que por el mayor espesor del muro se está perdiendo menos calor que en el caso anterior (estructura de 2"x4") que alcanzó los $0,418^\circ\text{C}$. En el caso de la temperatura de la cara interior de la cámara de aire medianamente ventilada, esta vez se mantuvo dentro del rango entre $2,02^\circ\text{C}$ y $2,81^\circ\text{C}$ demostrando una mejora notoria en comparación con el caso anterior.

En general el sistema de tabiquería simple puede considerarse el más básico de los sistemas de construcción con madera pero, como se ve en este estudio, con la correcta cantidad y disposición de materiales se pueden alcanzar valores de transmitancia totalmente considerables para un muro eficiente ya que sobrepasa sin problemas los valores mínimos requeridos por los TDR e el National Building code of Canada y además deja de generar puentes térmicos de alta relevancia.

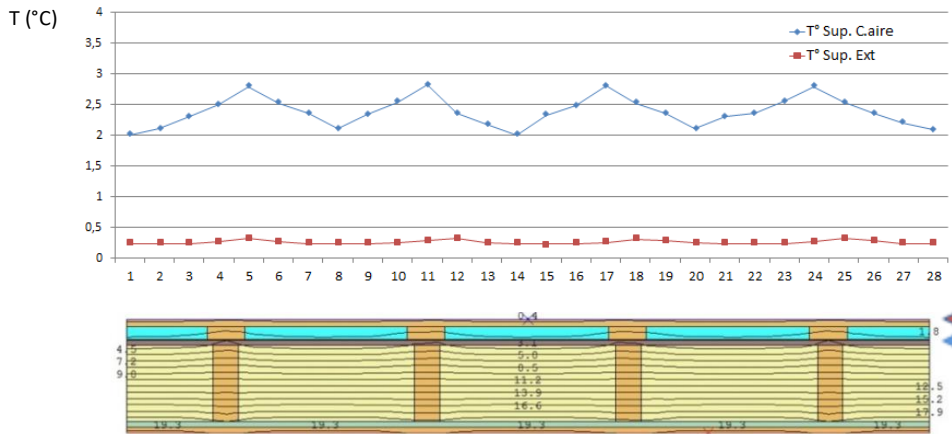


Figura 4.21: T° superficial exterior y diagrama de isotermas, tabiquería de 2"x6"

Uniones entre elementos:

Al observar la Figura 4.22 se puede notar que las uniones entre muros (en vista de planta) presentan algo de pérdida de calor, la esquina nuevamente posee el punto de menor temperatura superficial interior de la unión con 17,7°C, sin embargo se ve un gran aumento comparado con los 17,1°C que presentaba el muro de estructura de madera de 2x4". Dicha mejora puede ser explicada por el alto espesor de los muros y la disposición de los pie derechos en las esquinas ya que está pensada de tal manera que sin perder sus propiedades estructurales se pueda rellenar el mayor porcentaje posible de muro con aislación térmica. Aun así el valor U ponderado del tramo de unión entre ambos muros es mayor al del tramo lineal de este, lo que demuestra que hay una pérdida de calor mayor en este punto.

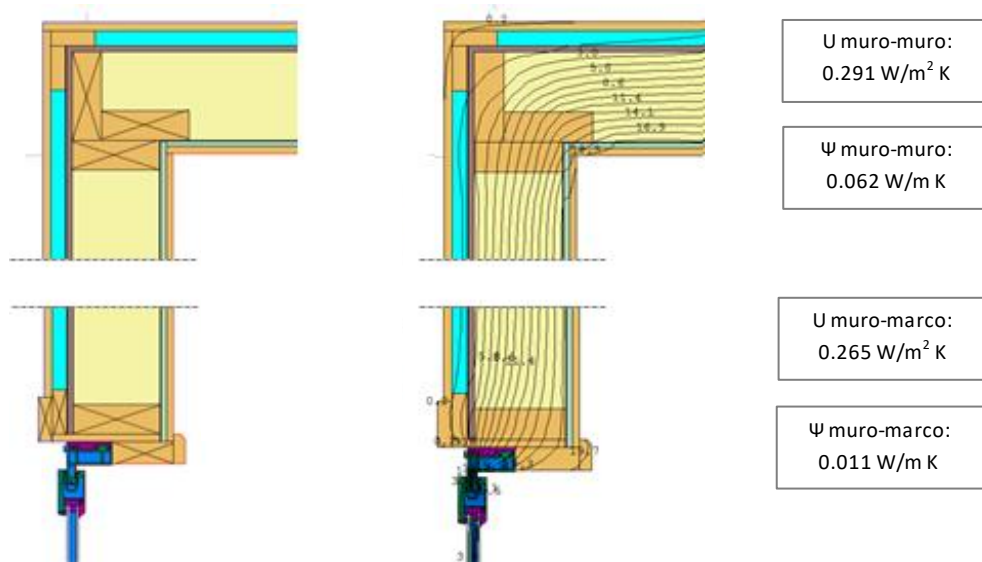


Figura 4.22: Detalle y diagrama de unión de esquina y unión muro-marco en vista de planta, tabiquería 2"x6"

En la Figura 4.23 se puede observar que la unión entre los muros con estructura de 2"x6" y el entrepiso actúa como un gran puente térmico, especialmente a la altura de las soleras inferiores y superiores logrando alcanzar temperaturas superficiales exteriores de 0,41°C lo que comparado con la temperatura superficial máxima del tramo lineal del muro (0,32°C) es bastante más alto. El hecho de que el valor U ponderado para la unión (0,33 W/m²K) sea más alto que el del tramo lineal (0,255 W/m²K) reafirma que se está perdiendo calor por ahí, aun así esta unión posee mejor desempeño que la unión muro-entrepiso de los muros presentados anteriormente.

Con respecto a la unión entre el muro y el techo, se puede observar en la Figura 4.24 que en el punto donde las soleras se unen con la cercha las isoterma tienden a acercarse más al exterior lo que indica que se está perdiendo calor, es por eso que la temperatura superficial exterior en ese punto aumenta a 0,44°C y en el resto del muro se mantiene en cercano a 0,2°C. El valor U ponderado de esa zona corrobora dicha pérdida de calor ya que, es notoriamente mayor que el valor U ponderado del tramo lineal del muro.

La unión muro-piso (Figura 4.25) se presenta nuevamente como el punto de mayor pérdida de calor de todas las uniones de elementos ya que está en contacto directo con el terreno a través de elementos de hormigón. El diagrama muestra como gran parte de las isoterma se cortan en la esquina interior demostrando que es el punto más frío de todos los detalles de unión (13,3 °C).

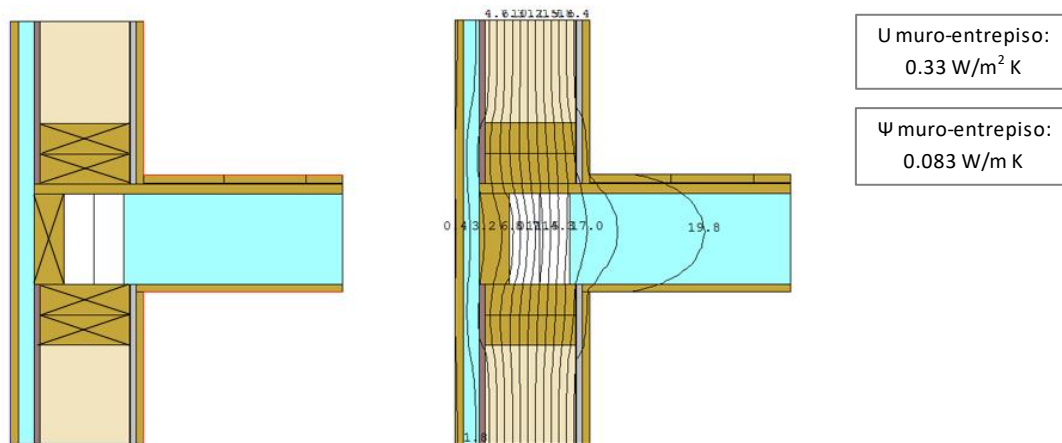


Figura 4.23: Detalle y diagrama isoterma unión muro - entrepiso, en vista de corte con tabiquería 2"x6"

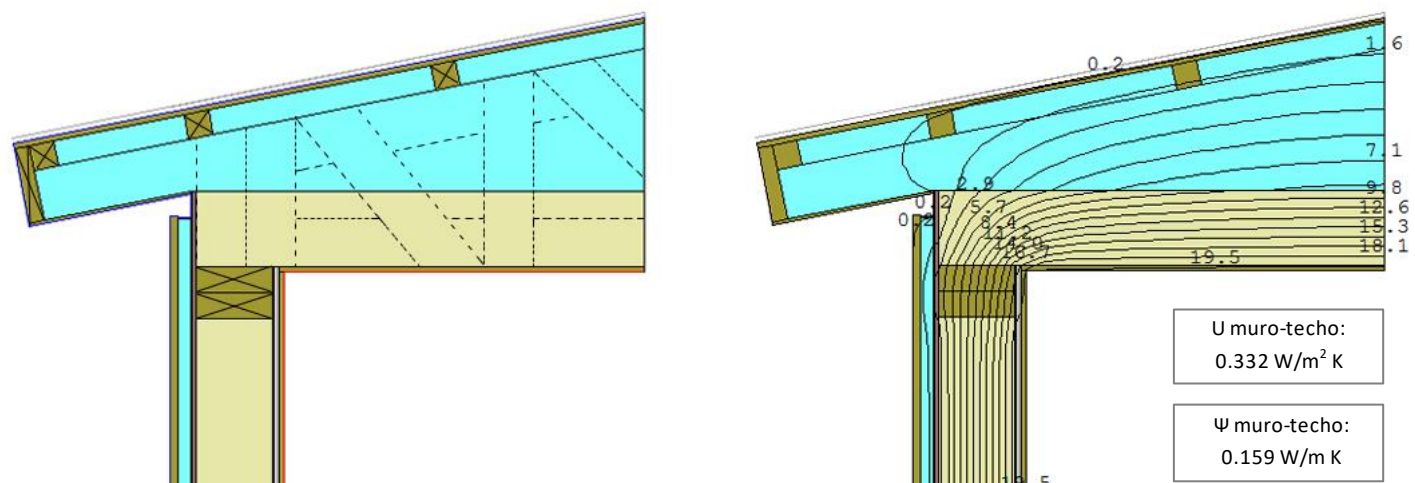


Figura 4.24: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-techo, en vista de corte utilizando tabiquería de 2"X6"

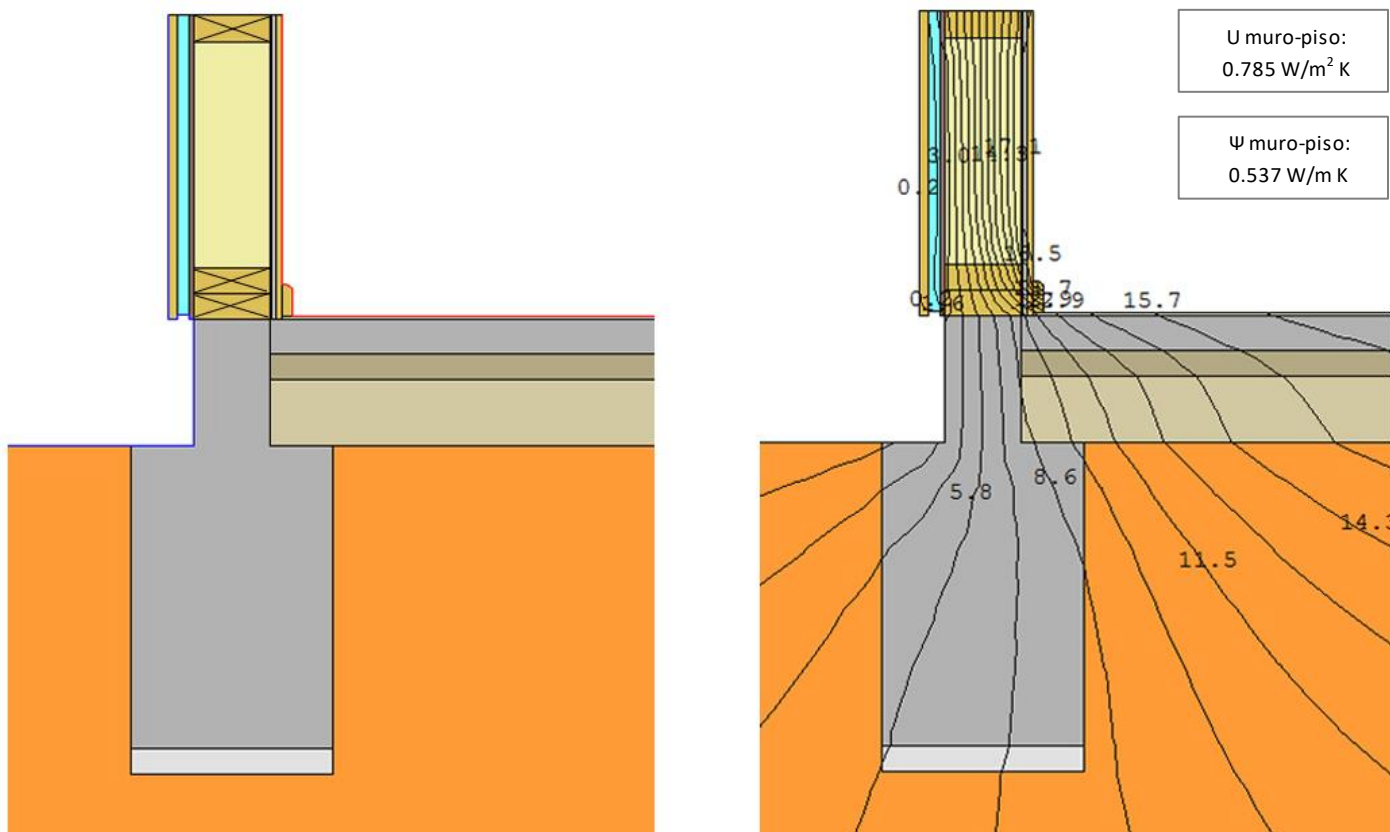


Figura 4.25: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-piso, en vista de corte utilizando tabiquería de 2"X6"

4.1.3.c Tabiquería de 2"x4" con aislación rígida continua

Este tipo de tabiquería posee una capa de aislación exterior rígida continua además de la aislación interior, lo que como se puede notar en la Figura 4.26 aumenta su valor U ponderado considerablemente en comparación con otros tipos de muro que poseen estructura de madera de 2"x4". En el esquema de flujo vectorial se puede notar que, luego de atravesar la capa de aislación rígida continua, los vectores disminuyen su longitud y estabilizan su dirección lo que puede considerarse como el rompimiento del puente térmico, así mismo el diagrama de flujo infrarrojo muestra que las ondas de calor se estabilizan luego de atravesar la capa continua de aislación.

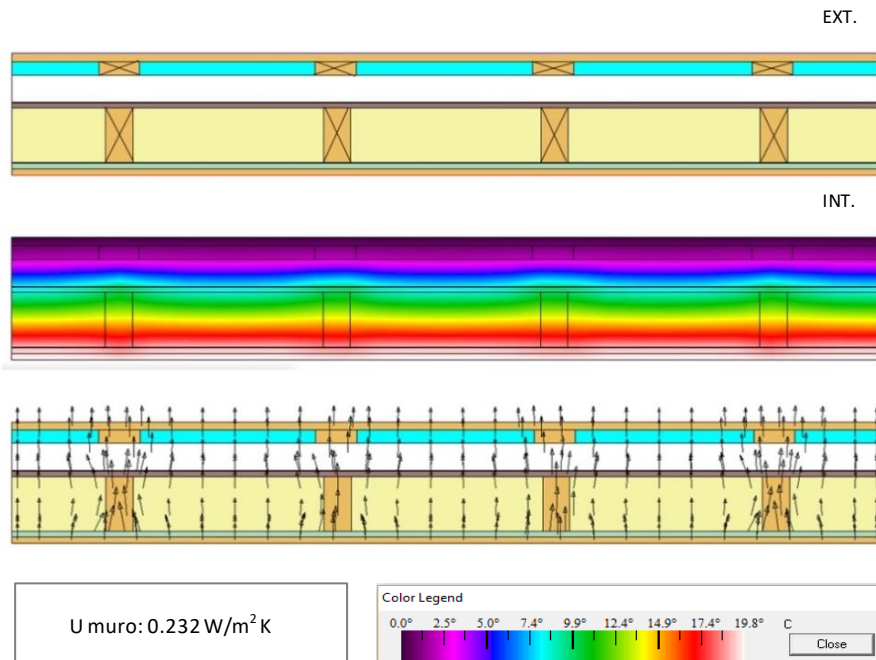


Figura 4.26: Esquemas de flujo térmico, tramo lineal de muro tabiquería 2"x4" con aislación rígida

Observando el comportamiento de la temperatura interior de la cámara de aire se puede notar que gracias a la adición de una capa continua de aislación rígida la temperatura varía muy poco (2,011°C a 2,191°C). Lo mismo sucede con las temperaturas superficiales exteriores (Figura 4.27), la línea generada por las mediciones varía mucho menos que en otros casos lo que corrobora que el puente térmico que se generaba en otros tipos de muro ha sido evitado prácticamente por completo. Esto proporciona evidencia de que la incorporación de aislación exterior continua es una estrategia eficiente al momento de querer evitar puentes térmicos en estructuras de madera.

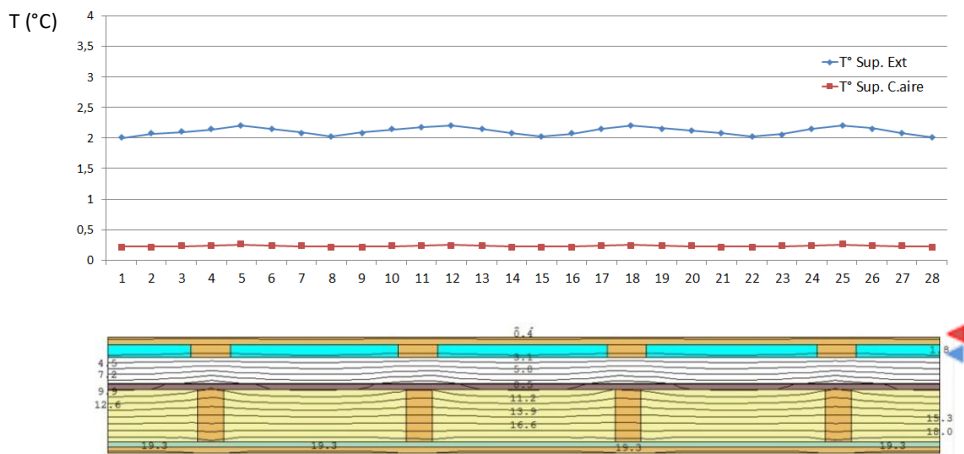


Figura 4.27: T° superficial exterior y diagrama de isotermas, tabiquería de 2"x4" con aislación rígida

Para el caso de las uniones de esquina y ventana (Figura 4.28) se puede observar que existen pérdidas pero que gracias a la aislación continua han sido disminuidas en un gran porcentaje, los diagramas de isotermas muestran que el punto interior de la esquina (en vista de planta) aún es el punto más frío del detalle ($18,1^{\circ}\text{C}$) pero comparado con casos anteriores la mejora es notoria, así mismo el detalle de unión muro-marco no muestra grandes variaciones a nivel de isotermas que evidencien la existencia de grandes pérdidas de calor. El hecho de que los valores de transmitancia térmica lineal de ambos detalles se acerquen a 0 demuestra que los puentes térmicos han sido disminuidos en un gran porcentaje.

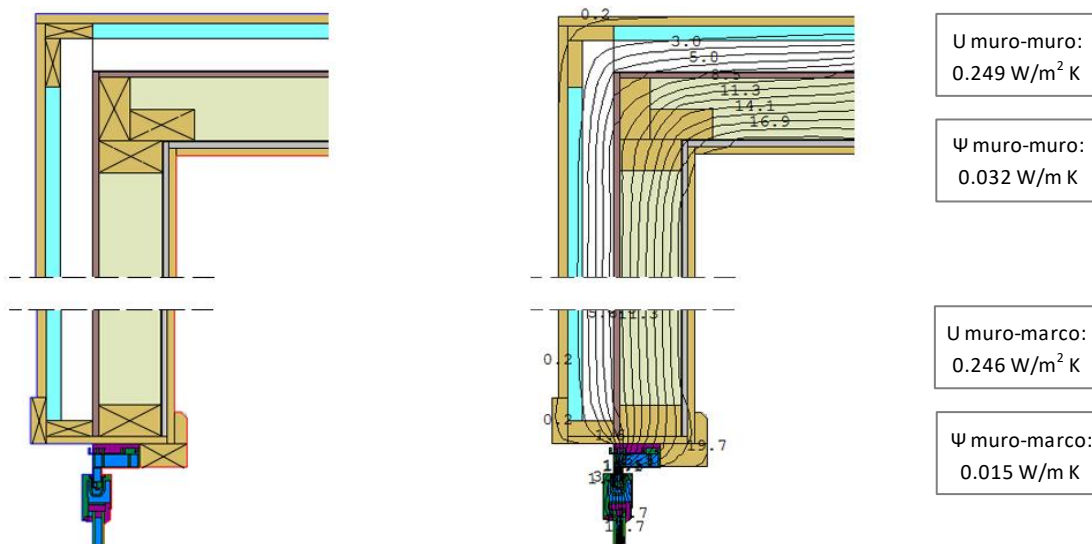


Figura 4.28: Detalle y diagrama de unión de esquina y unión muro-marco en vista de planta, tabiquería 2"x4" con aislación rígida

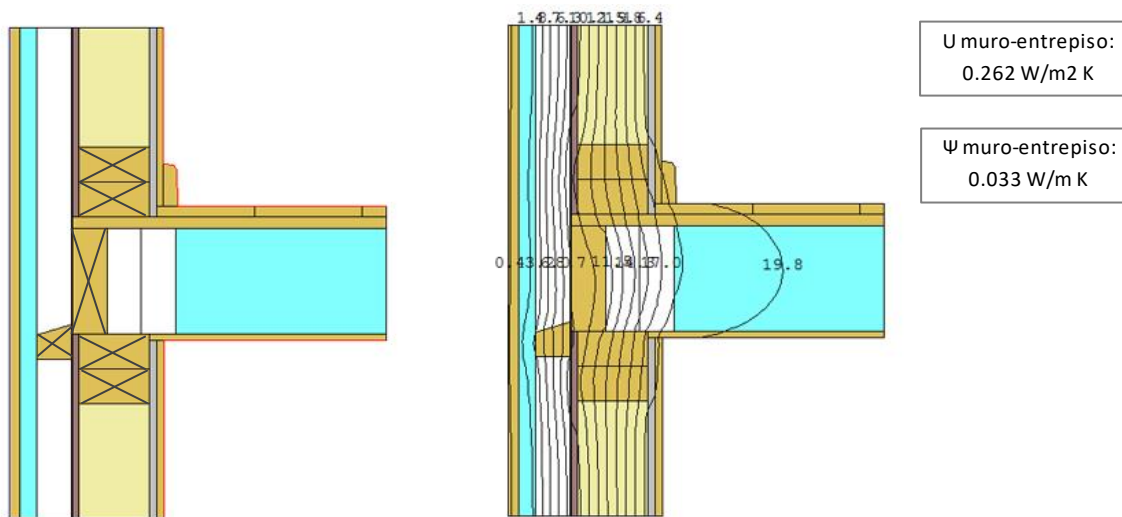


Figura 4.29: Detalle y diagrama de isotermas unión muro - entrepiso, en vista de corte con tabiquería 2"x4" con aislación rígida

Para el caso de la unión muro-entrepiso (figura 4.29) se puede notar que, en los puntos cercanos a la superficie exterior, las isotermas se mantienen bastante estables con una T° superficial exterior de aproximadamente $0,2^\circ\text{C}$, sin embargo el soporte de madera necesario para sostener la aislación rígida conforma un puente térmico relevante con el cual la T° superficial exterior alcanza $0,31^\circ\text{C}$.

Para el caso de la unión muro-techo (Figura 4.30) el diagrama de isotermas muestra que las variaciones de la temperatura al interior del muro y la unión son menos notorias que otras uniones de este tipo de muro, sin embargo la incorporación de aislación rígida continua ha disminuido el efecto de puente térmico que generaba la unión de las soleras superiores del muro con la techumbre. El punto de menor temperatura interior en el detalle sigue siendo la unión entre el muro y el cielo ($18,3^\circ\text{C}$) pero si este valor se compara con el mismo punto en el detalle del muro base ($16,9^\circ\text{C}$) la mejora es evidente.

La unión muro-piso (figura 4.31) aún posee un porcentaje mayor de pérdida de calor que todas las otras uniones de este tipo de muro, sin embargo, en comparación con las uniones de muro- piso presentadas previamente muestra una mejora notoria. Dicha mejora se puede comprobar al comparar el valor de transmitancia térmica lineal de $0,382 \text{ W/mK}$ con los de otros muros como los de tabiquería de 2"x4" y 2"x6" sin aislación rígida cuyos valores de transmitancia lineal en uniones muro-piso son de $0,588 \text{ W/mK}$ y $0,537 \text{ W/mK}$ respectivamente.

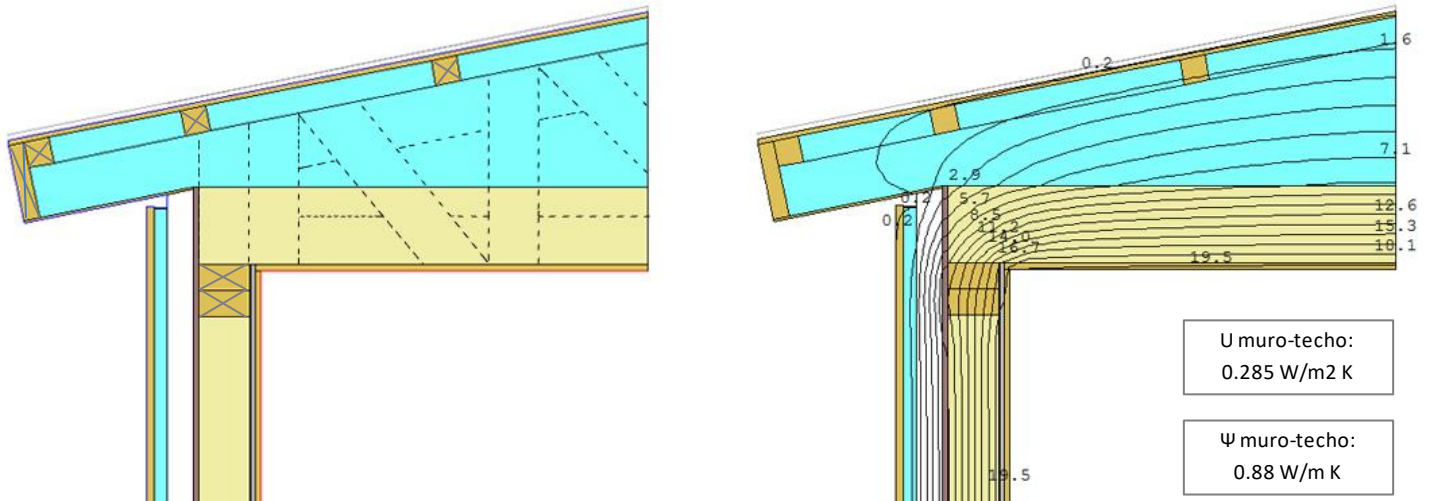


Figura 4.30: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-techo, utilizando tabiquería de 2"x4" con aislación rígida

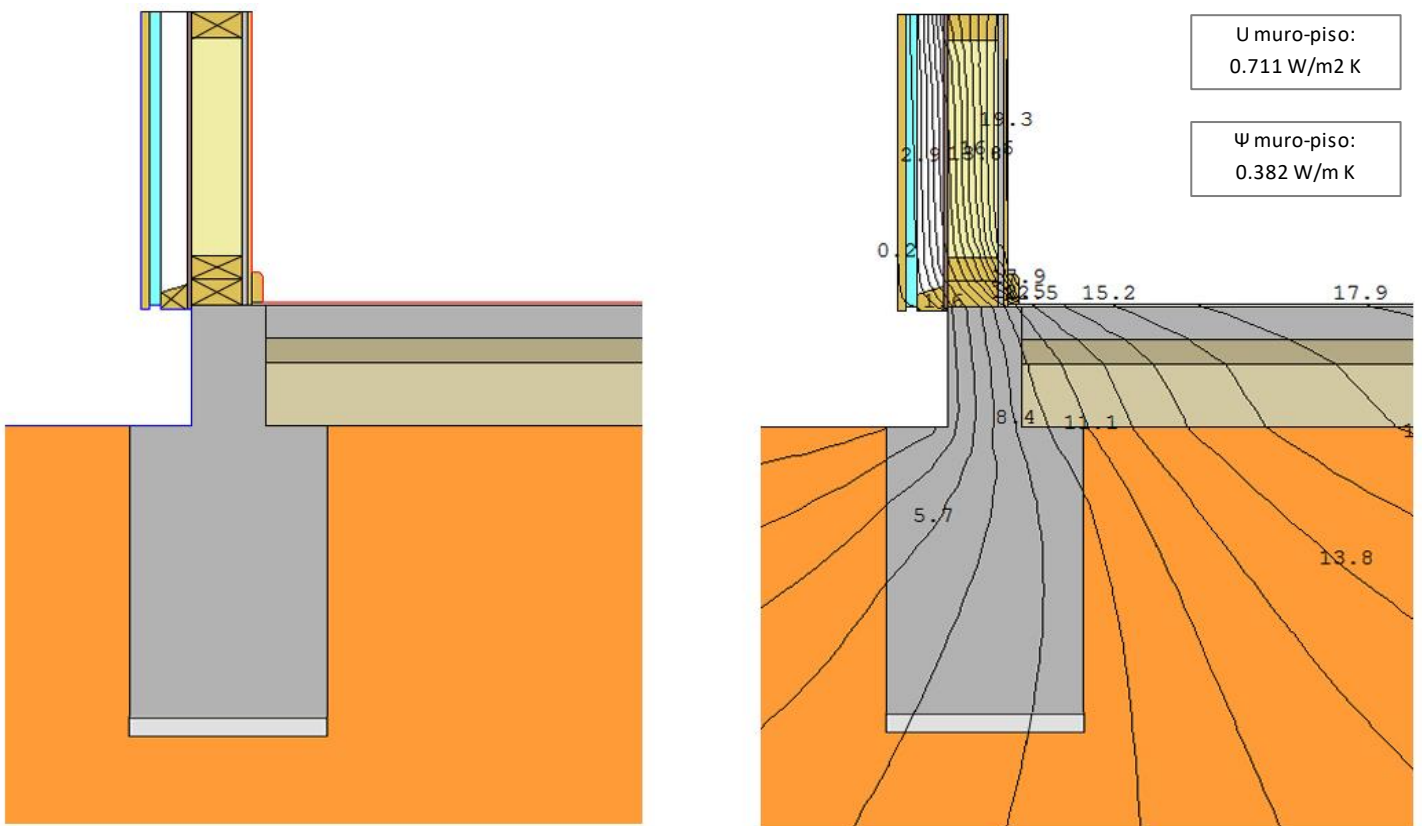


Figura 4.31: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-piso, utilizando tabiquería de 2"x4" con aislación rígida

4.1.3.d Tabiquería doble con aislación interior continua

Esta solución constructiva es aquella que posee el espesor más alto y valor U ponderado más bajo, con $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Al observar el diagrama de flujo de calor infrarrojo se puede notar que gracias al alto espesor del muro (Figura 4.32), toda la cara exterior posee una tonalidad morada oscura, incluso antes de la cámara de aire, indicando que las temperaturas superficiales exteriores son bajas y por ende se está perdiendo menos calor.

En el diagrama de flujo vectorial se nota que en el punto interno del muro donde está la aislación rígida el flujo tiende a regularse sin embargo después tiende a deformarse nuevamente al alcanzar el segundo tabique ($2'' \times 3''$).

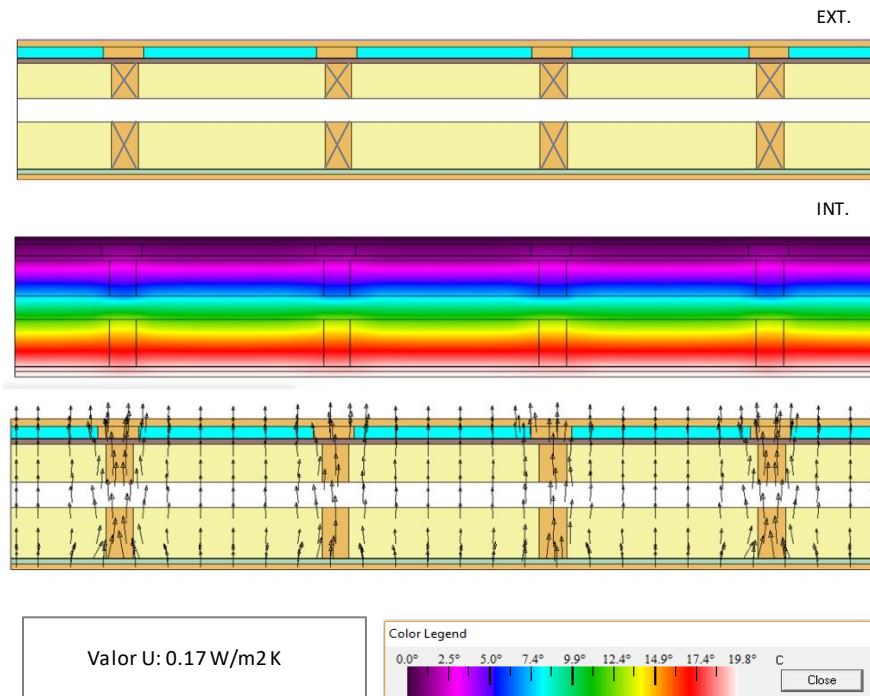


Figura 4.32: Esquemas de flujo térmico, tramo lineal de muro de doble tabiquería

Cómo se observa en la Figura 4.33 las temperaturas al interior de la cámara de aire son más bajas que en cualquier otro tipo de muro mencionado ($1,43^\circ\text{C}$ a $1,84^\circ\text{C}$), sin embargo estas presentan un diferencial mayor que en el caso anterior ($2,011^\circ\text{C}$ a $2,191^\circ\text{C}$) debido a que esta vez la aislación rígida continua se ubica al interior del muro dejando elementos estructurales a centímetros de separación con la superficie exterior que funcionan como puente térmico, eso mismo se puede notar en los puntos estructurales del diagrama de isotermas ya que las líneas se deforman justo antes de entrar a la cámara de aire medianamente ventilada. Aun así se debe tener presente que las temperaturas superficiales exteriores de este muro son bastante bajas y varían muy poco ($0,25^\circ\text{C}$ y $0,29^\circ\text{C}$) por lo que el efecto del puente térmico debería ser poco considerable.

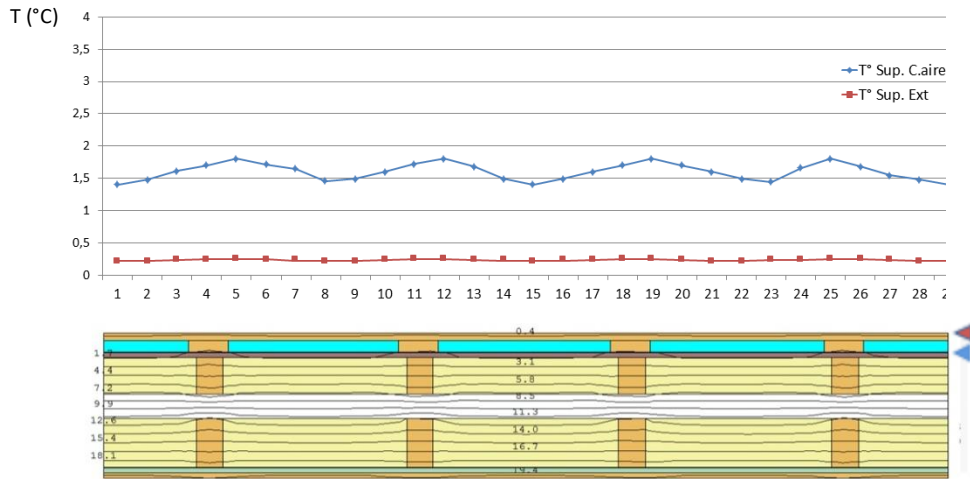


Figura 4.33: T° superficial exterior y diagrama de isotermas, doble tabiquería.

En el detalle de unión muro-muro de la Figura 4.34 se puede observar que una isoterma se corta en la esquina interior mostrando el punto más frío con 18,4°C, sin embargo al comparar esta T° superficial con los casos anteriores se puede ver que este muro posee la más alta, lo que demuestra su buen desempeño térmico. Al comparar el valor de transmitancia lineal Ψ con el muro anterior (2"x4" con aislación rígida continua) se nota que la influencia del puente térmico aumentó, esto puede estar relacionado nuevamente con el hecho de que la aislación continua está en el interior y no al exterior.

En lo que respecta a la unión muro-marco se notan leves mejoras a nivel de disminución de influencia del puente térmico si se hace una comparación con el muro anterior (0.015 W/mK).

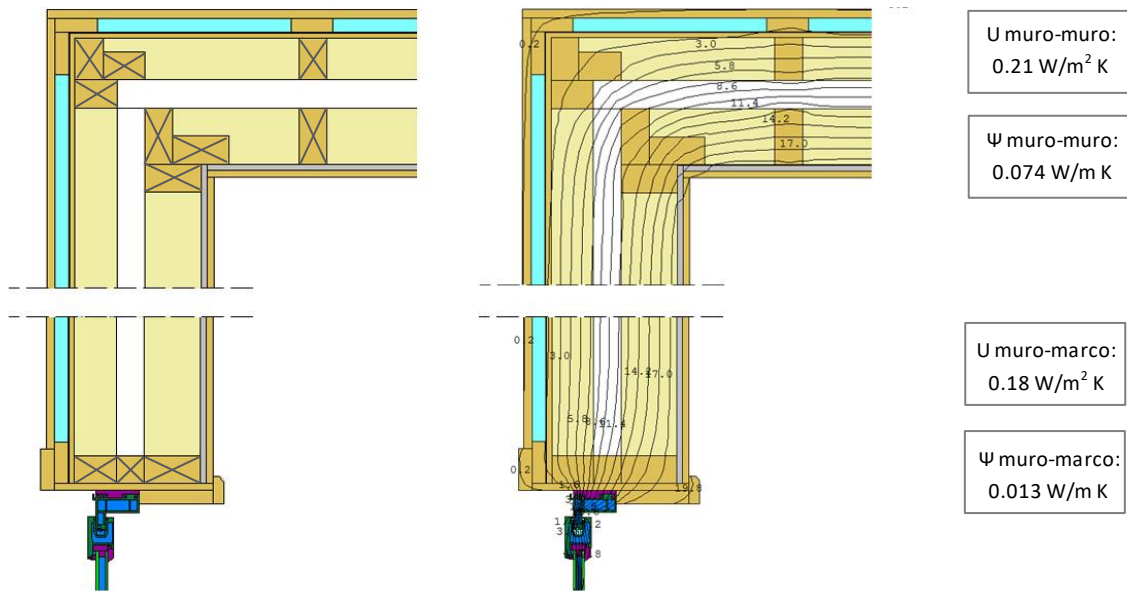


Figura 4.34: Detalle y diagrama de unión de esquina y unión muro-marco en vista de planta, doble tabiquería

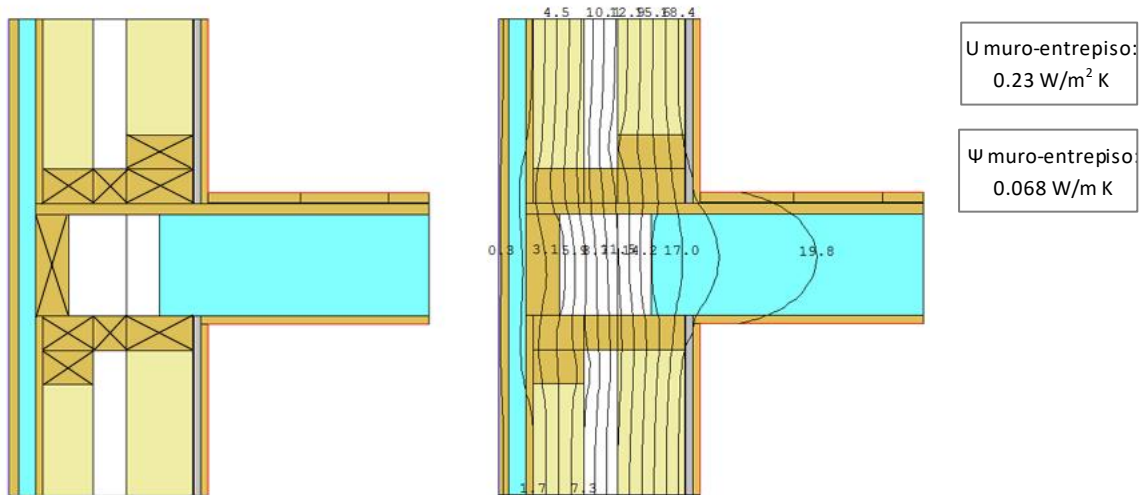


Figura 4.35: Detalle y diagrama isotermas unión muro -entrepiso, en vista de corte con doble tabiquería

Como se puede ver, la unión muro – entrepiso de la Figura 4.35 posee un valor U ponderado más bajo que cualquier otro tipo de muro por lo que se deduce que sus propiedades de resistencia térmica son altas, sin embargo, a pesar de sus buenas propiedades el diagrama muestra algunas isotermas onduladas, lo que evidencia que no hay un flujo estable al 100%. Eso se corrobora al ver que el valor de transmitancia lineal de este punto (0.068 W/mK) es el doble que en el muro anterior ($0,33 \text{ W/mK}$), lo que no significa que se pierda el doble de calor que en el muro anterior, sino que la influencia del puente térmico en relación a las propiedades del muro es el doble que en el muro anterior. Esto puede deberse a la gran cantidad de elementos estructurales que posee la unión de ambos muros con el entrepiso ya que, como se ve en el detalle, es necesario disponer 3 soleras a cada lado y un listón de soporte en el medio para la cavidad en la que va la aislación rígida, debido a su gran dimensión.

Con respecto a la unión muro-techo (Figura 4.36), se pueden observar algunas isotermas irregulares en la unión de las soleras con la techumbre evidenciando posibles pérdidas de calor. Esto se demuestra al observar que la transmitancia térmica lineal de la unión posee algo de relevancia con $0,22 \text{ W/mK}$, aun así se debe tomar en cuenta que, si se compara con cualquier otra unión muro-techo presentada anteriormente, es un valor bastante bajo y probablemente sea difícil alcanzar uno más bajo con estructuras de madera.

La unión muro-piso (Figura 4.37) sigue conformando un puente térmico lineal ($0,041 \text{ W/mK}$), ya que está en contacto directo con el terreno, aun así la influencia de este puente ha disminuido considerablemente en comparación con la misma unión en otros tipos de muro como el de tabiquería de $2''\times 4''$ sin aislación rígida ($0,588 \text{ W/mK}$) y con aislación rígida ($0,382 \text{ W/mK}$).

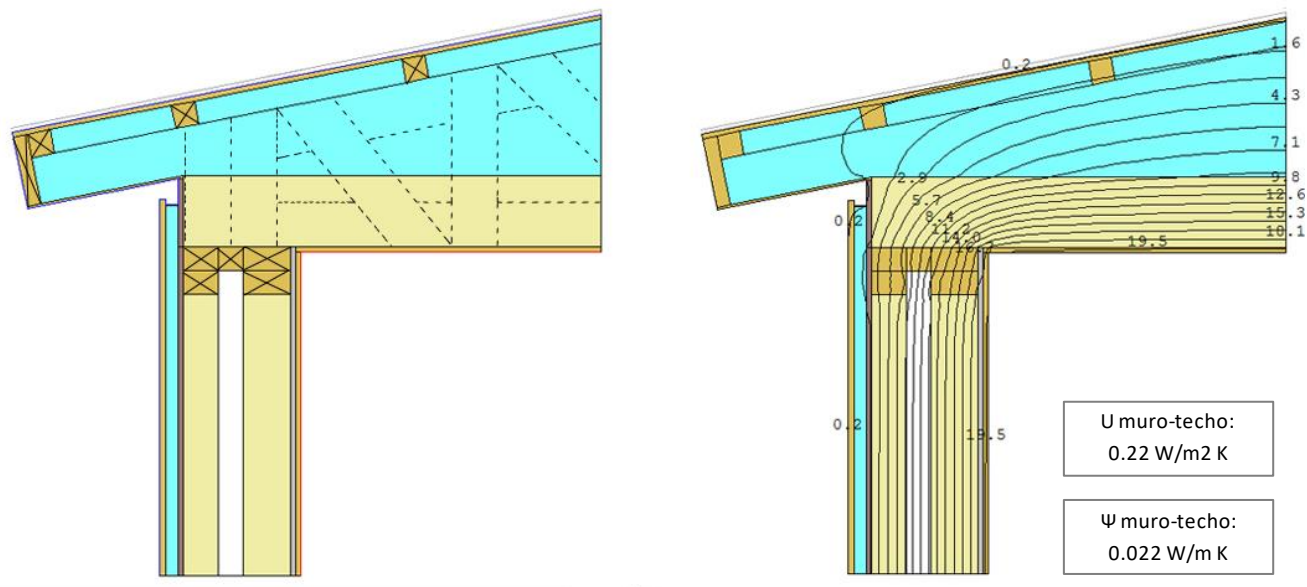


Figura 4.36: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-techo, en vista de corte utilizando doble tabiquería.

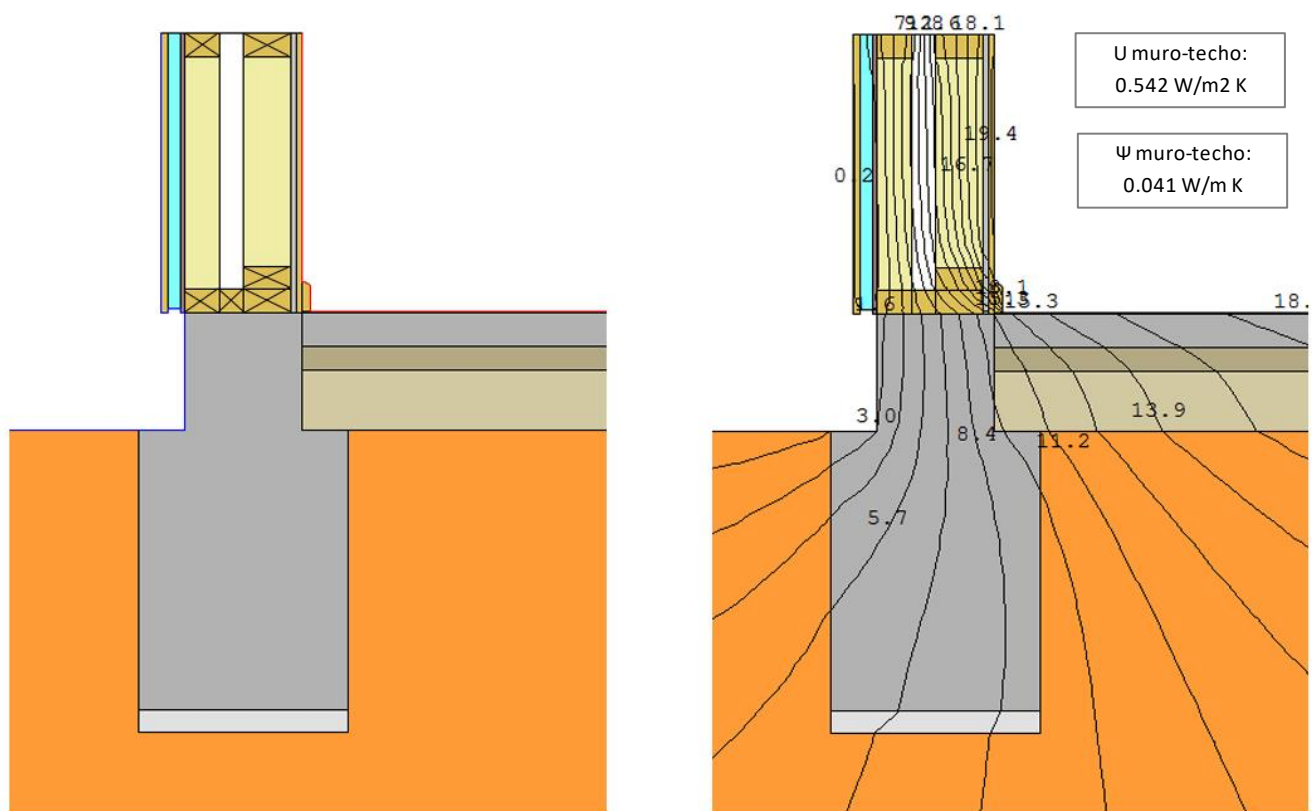


Figura 4.37: Detalle y diagrama de isotermas unión muro-piso, en vista de corte utilizando doble tabiquería.

4.1.4 Síntesis del análisis de flujo térmico

Del estudio de flujo de calor recién presentado se puede inferir que cada una de las soluciones constructivas de muro mencionadas posee diferentes cualidades que le atribuyen algún tipo de ventaja, por ejemplo, el muro de tabiquería simple de 2"x4" es aquel cuyo valor U es mayor, sin embargo muestra mejoras notorias en comparación con el muro base planteado, especialmente en la disminución de la influencia de los puentes térmicos en las uniones entre elementos constructivos, además la simpleza en su construcción le da una ventaja práctica frente a los otros tipos de muro analizados.

El tipo de muro de tabiquería de 2"x4" con aislación rígida continua exterior destaca por ser uno de los más eficientes a nivel de disminución de influencia de puentes térmicos. La aislación continua permite disminuir hasta un punto casi imperceptible la diferencia entre las temperaturas superficiales exteriores en puntos del muro en los que hay estructura y en los que hay aislación.

El muro de tabiquería de 2"x6" se presenta como una opción intermedia entre los dos tipos de muro recién mencionados, ya que posee mejores propiedades térmicas que el muro de tabiquería simple de 2"x4" y mantiene cierta simpleza en su construcción (solo cambia la medida de las piezas de madera utilizadas), sin embargo sus propiedades a nivel de transmitancia térmica e influencia de puentes térmicos son inferiores a las observadas en el muro de tabiquería de 2"x4" con aislación rígida exterior.

El muro de tabiquería doble es, a nivel de transmitancia térmica, aquel que mostró el mejor desempeño de todos los mencionados. En lo que se refiere a influencia de los puentes térmicos posee un buen desempeño si se compara con la mayoría de los otros tipos de muro, sin embargo el muro de tabiquería de 2"x4" con aislación continua logra una disminución mayor en detalles de unión como las esquinas (muro-muro) o las uniones del muro con el entrepiso por poseer la aislación continua al exterior cubriendo la estructura. Aun así el muro de doble tabiquería resalta por sus cualidades térmicas y constructivas.

4.2 Estudio aplicado de flujo térmico

Como parte de la Pasantía de investigación realizada en Quebec, Canadá y dentro del marco del proyecto “Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois” (Desarrollo de nuevos materiales de alta inercia térmica a base de madera) llevado a cabo por el estudiante de doctorado en ciencias de la madera Damien Mathis, se decide realizar un estudio aplicado que consiste en tomar mediciones de temperatura en diferentes puntos al interior de un muro y en sus superficies, utilizando un cubículo de prueba construido con una solución constructiva de tabiquería seleccionada de aquellas que se presentaron en el capítulo 3 de este documento. El objetivo es medir la diferencia en la transferencia de calor entre los puntos del muro donde hay estructura con los puntos donde hay aislación y de esa manera evaluar la ocurrencia y magnitud del puente térmico generado en la realidad. Los resultados obtenidos en este estudio podrán ser comparados con los obtenidos en el Software THERM 7.4 y así evaluar el grado de similitud con la realidad que estos poseen.

4.2.1 Diseño del cubículo de prueba

Para llevar a cabo este estudio primero se debió seleccionar uno de los tipos de muro estudiados para ser construido en la realidad, por temas prácticos además de la abundancia de material para su construcción y de su gran porcentaje de aceptación por parte de la comunidad canadiense se decide seleccionar el muro de tabiquería simple de pino IPV de 2"x6" con aislación interior de lana de vidrio y cámara de aire medianamente ventilada al exterior.

Se han realizado diversos estudios de evaluación de desempeño térmico y ocurrencia de puentes térmicos en los que se ha concluido que la mejor manera de realizar mediciones en una envolvente es en ambientes exteriores porque se están considerando condiciones de borde reales en magnitud, rango, secuencia y probabilidad de ocurrencia (Awad, 2014). Es por esto que, como parte del proyecto en el que se enmarca este estudio, se plantea que las mediciones se deben realizar en un ambiente exterior considerando todas las variables que pueda haber.

Para realizar mediciones en el exterior se debe diseñar un cubículo de prueba que posea la cualidad de ser transportable por lo que debe ser compacto y liviano. En la Figura 4.38 se puede ver que se diseña un cubículo con forma de una pequeña vivienda compuesto de una techumbre, un piso y 4 muros que incorporan una puerta y una ventana.

El cubículo mide 6 pies de ancho (1,83 m), 8 pies de largo (2,44 m), su altura exterior es de 9,7 pies (2,96 m) y la altura interior de 8 pies (2,44 m). Su estructura es completamente de madera para que sea liviano y transportable. Además se deja uno de los muros libre de elementos como ventanas o puertas para poder colocar en él los sensores que miden la temperatura superficial.



Figura 4.38: Diseño estructural y volumétrico del cubículo de prueba (tabiquería simple de 2"x6")

4.2.2 Construcción del cubículo de prueba

A continuación se mostrará, en orden cronológico, parte del registro de la construcción del cubículo de prueba, para ver la secuencia fotográfica completa revisar **Anexo 2**

Piso: La construcción del cubículo comienza con el piso que está que está constituido por una estructura de vigas I de madera cuyos ejes están separados por 16" (Figura 4.39). Estas vigas se apoyan a través de pletinas metálicas a los bordes que son piezas de madera de pino de 2"x8", luego se cubre la base con placas terciado de pino y se llenan los espacios interiores con aislación de lana de vidrio de 8" (20,32 cm) de espesor, finalmente se coloca la membrana de polietileno y se cubre la parte superior del piso con una placa de terciado de pino. La barrera de polietileno sobresale porque luego se unirá con la de los muros.



Figura 4.39: Construcción del piso del cubículo de prueba

Muros: Como se ve en la Figura 4.40, la estructura de los muros se hace por separado con piezas de madera de 2"x6" dispuestas de manera vertical cada 16" unidas a soleras inferiores y superiores con clavos de 2", en dos de los muros se dejan vanos con bordes reforzados donde irán la ventana y la puerta. Una vez que se construyeron los 4 muros, se fijan sobre el piso construido previamente con tornillos para madera de 4" en la solera inferior y en la parte superior se coloca una segunda fila de soleras superiores que reafirman la estructura.

Después de que los muros están posicionados se cubre todo el exterior con placas de OSB y por dentro se rellenan los espacios entre los pie derechos de los muros con lana de vidrio de 6" de espesor. Luego se recubre todo el exterior con una membrana hidrófuga Tyvek y cintas adhesivas especiales de tipo Tucktape para evitar que ingrese agua por las uniones entre elementos. Sobre la membrana hidrófuga se fijan con clavos de 1,5" listones de madera de pino de 1"x3" distanciados cada 16" a eje, sobre estos se colocará el revestimiento de siding de madera. (Figura 4.41)



Figura 4.40: Construcción, montaje de muros y aislación interior del cubículo de prueba



Figura 4.41: Colocación de barrera hidrófuga y listones de sujeción en cubículo de prueba

Techo: La estructura del techo se construye de manera separada a la vivienda (Figura 4.42), su composición es la misma que la del piso, vigas I de madera cada 16" sujetas con pletinas metálicas a piezas de 2"x8" de pino y relleno interior de lana de vidrio de 8" de espesor. Se dispone una barrera de polietileno en la parte inferior que sobresale hacia los lados por que luego se conectará con la de los muros para no perder la continuidad. Luego se cubren las dos caras de mayor superficie con placas de terciado de pino, se monta dicha estructura sobre los muros utilizando una grúa horquilla como se ve en las imágenes, se fija la unión con tornillos de 4" cada 16", se agrega el recubrimiento de OSB y membrana hidrófuga Tyvek faltante en la techumbre y se asegura la unión entre ambas barreras con cintas adhesivas especiales para membranas hidrófugas. Finalmente se colocan los listones de 1"x3 faltantes en la techumbre.



Figura 4.42: Construcción y montaje del techo del cubículo de prueba

Puerta: Antes de colocar la puerta de 34" x 80" (0,86 x 2,03 m) de madera pintada blanca con marco incluido (Figura 4.43), se debe cubrir la parte inferior del vano con silicona adhesiva, luego se coloca la puerta con el marco sobre la silicona, se fija el marco al vano con pequeños trozos de madera que sobresalen y luego se cortan (ya que el vano es un poco más ancho que el marco). Se nivela y se fija el marco con tornillos de 1,5" en todos sus bordes, excepto el inferior porque esta adherido con silicona. Luego se rellenan todos los orificios que quedaron entre el marco de la puerta y el vano con espuma de poliuretano de expansión media para evitar pérdidas de calor, entrada de agua o de ruidos exteriores molestos.

Ventana: Como se ve en la Figura 4.44 se coloca una ventana de termopanel Low-e corredera con marco de PVC marca Wintec (misma ventana utilizada en los detalles muro-marco en Therm) de 60" x 48" sobre el vano y se fija con tornillos de 2" a través de los orificios que el marco trae por diseño tomando la precaución de que quede nivelada. Al igual que con la puerta, una vez que la ventana está fija se rellenan los espacios vacíos entre el marco y el vano con espuma de poliuretano de expansión media.



Figura 4.43: Colocación de puerta en cubículo de prueba.



Figura 4.44: Colocación de ventana en cubículo de prueba

Termocuplas: Como se ve en la Figura 4.45, ocho termocuplas (sensores de medición de temperatura superficial) se ubican en la parte central del muro opuesto al de la ventana a 1 m de alto, el posicionamiento de las termocuplas está pensado para poder medir los diferenciales de la transferencia de calor en puntos donde hay estructura y donde hay aislación, es por eso que la mitad de ellas están posicionadas en el punto donde hay un pie derecho (2-4-6-8) y la otra mitad exactamente en el medio entre los pie derechos (1-3-5-7). Cuatro de estas termocuplas (3-4-5-6) se deben colocar antes de que se coloquen los revestimientos (exterior e interior) de los muros, en la Figura 4.46 se puede ver que estos sensores atraviesan perforaciones hechas previamente en las diferentes capas del muro, luego se adhieren a una superficie con cintas adhesivas teniendo cuidado de que la punta del cable quede apoyada en la superficie que corresponde medir. Todos los cables llegan al interior donde rematan en un adaptador (conector) que le permite a la termocupla conectarse a dispositivos llamados data logger que registran la información de las temperaturas que mide cada sensor.

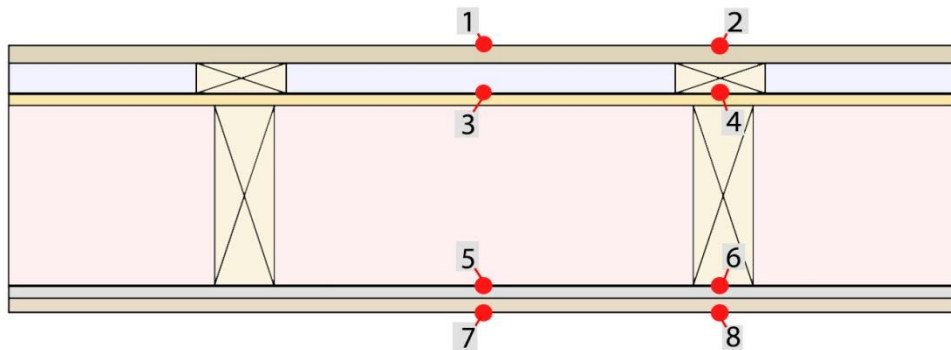


Fig. 4.45 Posición de las termocuplas en el muro del cubículo de prueba



Figura 4.46: Colocación de termocuplas en cubículo de prueba

Terminaciones y revestimientos: El interior se cubre con placas de yeso cartón de 10 mm de espesor atornilladas a la estructura principal con tornillos de 1,5" (Figura 4.47), dejando los orificios necesarios para que las termocuplas que miden la temperatura superficial interior puedan ser colocadas. Estas termocuplas se adhieren con cinta adhesiva para asegurar que midan la temperatura de la superficie requerida, la cinta es de color rojo para no perder la ubicación de los sensores.



Figura 4.47: Colocación de yeso cartón y termocuplas interiores

Para el caso del revestimiento exterior de siding de madera primero se deben disponer todos los elementos metálicos destinados a sujetar el revestimiento, como se ve en la Figura 4.48 estos son perfiles de aluminio de color negro que se colocan en los bordes de los marcos de la ventana y la puerta, las esquinas de unión entre muros y los bordes inferiores de todo el cubículo. Para que el agua no entre por la parte superior de los marcos de puerta y ventana, los perfiles de aluminio que se colocan sobre ellos van debajo de la membrana hidrófuga y se sellan con cintas adhesivas Tyvek.

Con los soportes en su lugar se puede comenzar a colocar las piezas de siding de madera una por una, estas piezas se fijan al muro por medio de grapas que perforan el siding y lo unen con los listones de 1"x3" que se habían colocado previamente (figura 4.49), además cada pieza posee bordes machihembrados que aseguran una unión sellada sin necesidad de adhesivos.

Finalmente para revestir el techo se cubre la estructura de madera con una membrana negra impermeable a base de petróleo.



Fig. 4.48 Perfiles metálicos de soporte de revestimiento en cubículo de prueba.



Figura 4.49: Colocación del siding en superficie exterior del cubículo

La construcción del cubículo de prueba se llevó a cabo con fondos de la Cámara industrial de investigación de la construcción eco-responsable en madera de Quebec (CIRCERB), el laboratorio de investigación FPinnovations y la empresa canadiense de revestimientos de madera MAIBEC.

4.2.3 Mediciones

Posicionamiento de la vivienda: Una vez terminada la vivienda es posicionada al exterior del laboratorio del pabellón Gene H Kruger de la universidad Laval, como se ve en la Figura 4.50, ya que como se mencionó anteriormente se espera analizar el comportamiento de la envolvente vertical en un ambiente real donde las condiciones sean variables, aun así se toma la medida preventiva de que el muro que posee las termocuplas no reciba radiación solar directa ya que afectaría en las mediciones de temperatura superficial exterior.



Figura 4.50: Cubículo de prueba en posición para el registro de temperaturas

Temperatura superficial y temperatura del aire interior: Para medir las temperaturas superficiales se utilizan termocuplas tipo T (cobre y constantán) ya que estas son resistentes a la humedad que podría haber en la cámara de aire y revestimiento exterior. Para registrar los resultados se utilizan dos Data Loggers HOBO UX120 como el de la Figura 4.51, cada uno de ellos es capaz de registrar las mediciones de 4 termocuplas cada 1 minuto por un periodo de 3 semanas. Para las mediciones de temperatura del aire interior se utilizó una termocupla adicional que se situó al interior de la vivienda a una altura media donde no reciba radiación solar directa para no afectar los resultados, esta termocupla se conecta a un datalogger adicional de modelo Kimo AMI 310



HOBO UX120

Kimo AMI 310

Termocupla tipo T

Figura 4.51: Artefactos de medición utilizados en el cubículo de prueba

Temperatura del aire exterior:

Las mediciones se llevaron a cabo en la ciudad de Quebec, Canadá entre los días 24 y 27 de agosto de 2017 dónde las temperaturas exteriores fluctuaron entre 20,4°C y 3,5°C aproximadamente. La temperatura exterior exacta al momento de cada medición se midió con los registros climáticos de la estación meteorológica “Météo-LAVAL” de la universidad LAVAL que está ubicada en el mismo edificio en el cual se emplazó el cubículo de prueba. Los datos fueron obtenidos en planillas Excel sin embargo también se revisaron los registros en la página web: <http://meteo-laval.gel.ulaval.ca/> como se ve en la Figura 4.52

<i>Valeurs moyennes</i>				<i>Valeurs extrêmes mesurées par la station météo</i>									
Donnée	Journée			Mois		Année		Journée		Mois		Année	
	Moy.	Moy.	Moy.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Température (°C)	12.85	13.38	8.57	11.83	15.89	7.72	21.56	-21	33.28				
Humidité (%)	95.74	75.73	75.7	79	100	44	100	22	100				
Vitesse du vent (km/hr)	7.55	10.58	11.38	—	18.3	—	23.2	—	40.1				
Potentiel éolien (W/m ²)	107.58	168.19	232.51	11.8	—	4.5	—	-31.1	—				
Pression barométrique (hPa)	1001.57	1011.6	1009.36	—	40.7	—	48.1	—	83.25				
Radiation solaire (W/m ²)	90.07	159.3	166.31	11.5	13.2	5.3	13.3	-24.2	22.1				
				—	5	—	5.6	—	9.2				

Fig. 4.52 Imagen ejemplo de página web Météo-Laval (Estación meteorológica universidad Laval, Quebec)

4.2.4 Resultados

Como el estudio es llevado a cabo en el exterior las temperaturas interiores y exteriores registradas del aire variaron bastante según la hora y el día. Para obtener resultados que sean claros y concisos se debe tener un diferencial relativamente alto entre las temperaturas del aire interior y exterior, por lo que se busca el mayor diferencial registrado durante los días que se llevaron a cabo las mediciones.

El mayor diferencial identificado en los registros ocurrió el día 27 de agosto a las 20:35 hrs dónde la temperatura interior fue 17,113 °C y la exterior fue de 3,982°C con un 75,6% de humedad relativa. En la Figura 4.53 se pueden ver las mediciones realizadas por las termocuplas en el momento mencionado.

Las temperaturas entregadas por los sensores difieren tanto para la sección estructural como para la sección de aislación, indicando que existe un puente térmico. El hecho de que la temperatura superficial exterior de la sección estructural (4,19°C) sea más alta que la de la sección aislada (4,06°C) indica que el puente térmico es producido en la sección estructural.

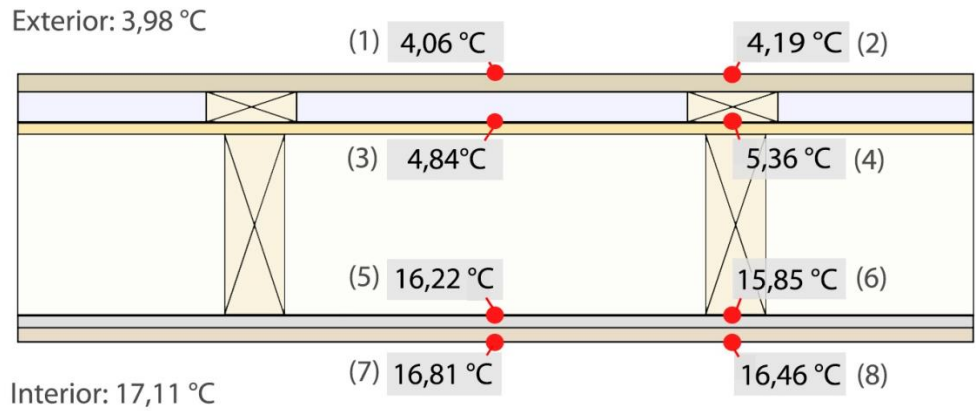


Figura 4.53: Resultados de estudio de flujo térmico aplicado a la realidad

El gráfico 4.1 muestra con una línea roja las mediciones registradas en las termocupas que se ubicaron en la sección estructural del muro (2-4-6-8) y con una azul las que se ubicaron en la sección aislada del muro (1-3-5-7). Al observar ambas líneas se puede notar que los diferenciales de temperatura varían desde los 0,13°C en la temperatura superficial exterior hasta 0,35°C en la temperatura superficial interior, lo que demuestra la presencia de un puente térmico estructural, sin embargo la magnitud de este no es elevada.

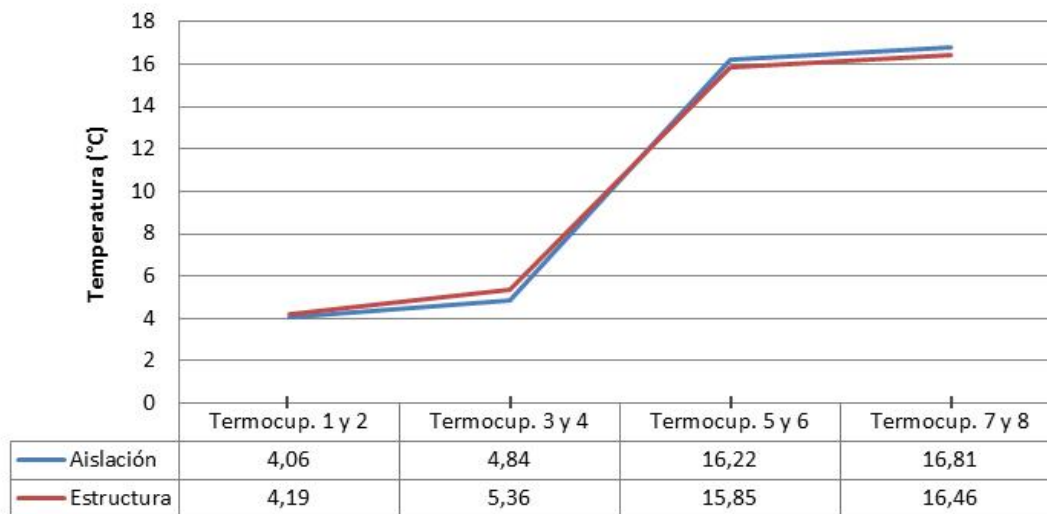


Gráfico 4.1: Comparación temperaturas registradas para sección estructural y sección aislada del muro de prueba

Una vez que se revisaron los resultados entregados por las termocupas, estos se deben comparar con los que se obtuvieron en los análisis de simulación de flujo térmico con Therm utilizando la misma solución constructiva (tabiquería de 2"x6" con cámara de aire medianamente ventilada), sin embargo, ambos estudios poseen condiciones de borde diferentes ya que, como se mencionó anteriormente, en los estudios de simulación de Therm se utilizaron las condiciones de borde planteadas en el Código técnico español (0 - 20°C) y en el estudio aplicado de flujo térmico realizado en el cubículo de prueba las condiciones de borde fueron dadas por las condiciones reales (3,98 – 17,11°C). Por lo tanto para que ambos estudios sean comparables se realiza nuevamente la simulación en Therm, esta vez utilizando las condiciones de borde del estudio aplicado, es decir 3,98°C al exterior y 17,11°C al interior (otras variables como el coeficiente de film se mantienen iguales ya que son las planteadas en la Nch853)

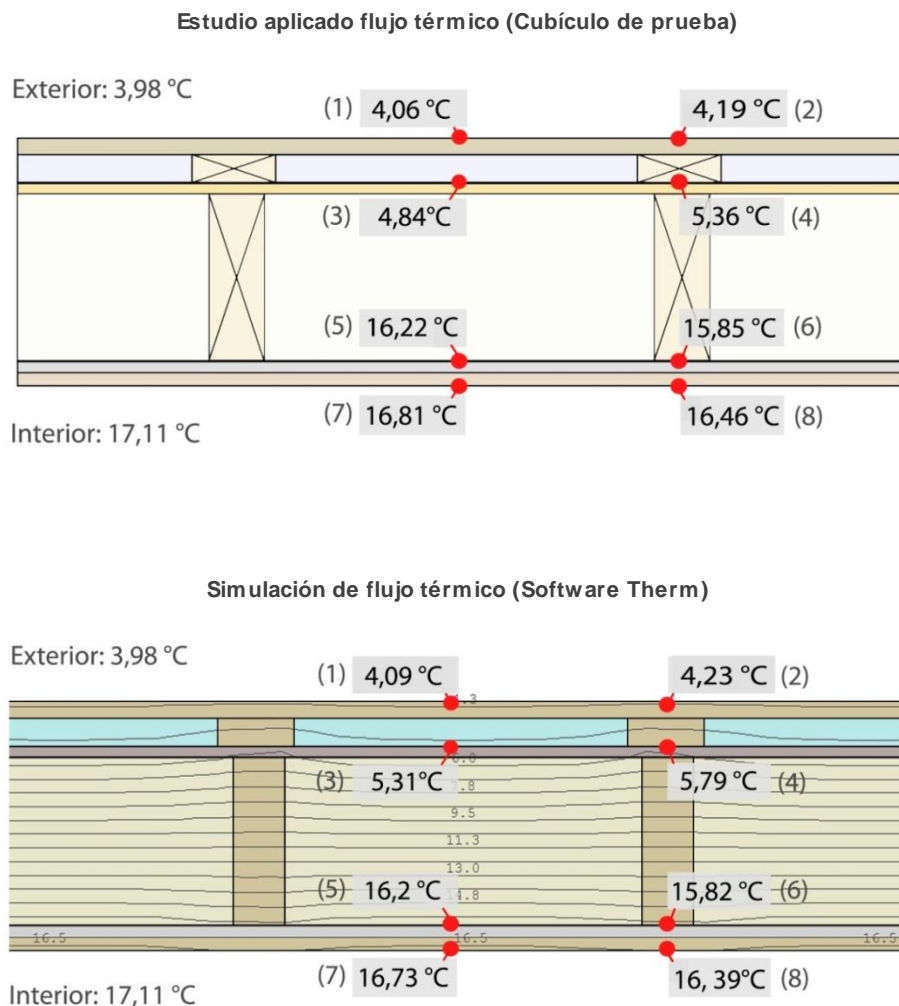


Figura 4.54: Comparación de resultados de estudios de flujo térmico simulados y aplicados, solución de tabiquería de 2"x6"

Al comparar ambos resultados de la figura 4.54 se logra ver que existe bastante similitud entre ambos, no se notan diferencias de temperatura de más de $0,07^{\circ}\text{C}$ a excepción de los puntos 3 y 4 que poseen una diferencia mayor, $0,47^{\circ}\text{C}$ y $0,43^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Esto puede ser explicado con el hecho de que, en los puntos mencionados, las termocuplas están ubicadas en una cámara de aire medianamente ventilada (por definición de la Nch853), donde el aire puede fluir de manera algo irregular influyendo en el valor registrado.

A pesar de las diferencias que pueden existir en las mediciones de temperatura al interior de la cámara de aire medianamente ventilada, los valores de temperatura superficial exterior (puntos 1-2) e interior (puntos 7-8) son bastante similares tanto en el estudio aplicado al cubículo de prueba como en la simulación de flujo térmico realizada en therm, indicando que el flujo de calor hacia el exterior es bastante similar en ambos casos y varía en cantidades que pueden considerarse mínimas ($0,08^{\circ}\text{C}$ como máximo). Además se debe tener cuenta que los diferenciales de temperatura en relación a la sección estructural y la sección aislada son bastante similares en el estudio aplicado y el simulado, por lo que se deduce que la magnitud del puente térmico generado por la estructura es prácticamente la misma en ambos casos.

4.3 Simulación energética

A continuación se presentan los estudios de demanda energética realizados a un pabellón de aulas ubicado en la zona Austral de Chile incorporando como muros de envolvente cada uno de los diferentes muros mencionados en este estudio. La simulación térmico-dinámica se realiza en el software DesignBuilder 5.0.3.007 utilizando como motor de cálculo EnergyPlus y archivos climáticos de extensión EPW.

El objetivo del estudio de simulación energética es obtener valores de demanda total anual de un establecimiento para así poder medir el ahorro energético generado por la incorporación de cada una de las soluciones constructivas de envolvente vertical analizadas.

4.3.1: Modelo tridimensional en DesignBuilder (Pabellón de aulas)

4.3.1.a Geometría del modelo:

Para los estudios de simulación energética se utiliza un pabellón de aulas del establecimiento “Liceo Austral Lord Cochrane” emplazado en el área urbana de la ciudad de Cochrane en la región de Aysén (Figura 4.55). Este liceo es un establecimiento de carácter municipal de 2805 m² que fue construido el año 2012. En él se imparten clases científico humanistas para niños, jóvenes y adultos, y todos los programas están habilitados para personas con discapacidad intelectual leve.

Una de las razones por las que se decide utilizar este establecimiento para los estudios de demanda energética es que el MINEDUC lo presenta en su documento “Nuevos espacios educativos 2010-2013” como un ejemplo de establecimiento educacional nuevo que incorpora eficiencia energética, además está emplazado en la zona Austral de Chile por lo que su diseño volumétrico está pensado para las condiciones climáticas de dicha zona. (MINEDUC, 2013)



Figura 4.55: Liceo Austral Lord Cochrane, Cochrane, Chile

Otra razón por la que se seleccionó este establecimiento es que posee una serie de características comunes con gran cantidad de los colegios y liceos que se pueden encontrar contruidos y en fase de diseño en la zona austral:

- Distribución volumétrica en torno a un centro que generalmente conforma un patio o cancha exterior.
- Grandes pabellones rectangulares con aulas de aproximadamente 54m² dispuestas de manera lateral a lo largo de todo el volumen del pabellón, por ambos lados.
- Ventanales dispuestos en la cara lateral del aula con una superficie que ocupa entre el 20% y 23% de la base del aula (ya que es el máximo permitido y en la zona austral las ganancias solares son importantes)
- Techumbres con pendientes pronunciadas y estructura de cerchas de madera.

Al compartir estas características los resultados obtenidos no solo serán aplicables a este liceo si no que podrían ser útiles para otros establecimientos que posean características similares. Para información más detallada acerca de las características comunes entre los establecimientos revisar **Anexo 3** “Análisis tipológico de establecimientos educacionales de la zona austral de Chile”

En la Figura 4.56 se puede observar la planimetría del establecimiento mencionado y en la zona resaltada con color azul se puede observar el pabellón de aulas que se utilizará para los estudios de demanda. Este pabellón posee dos niveles en los que se disponen 9 aulas, 4 baños, 2 talleres, áreas de circulación y un patio interior (en el primer nivel), todo distribuido en una superficie de 555 m².

La Figura 4.57 muestra imágenes del modelo tridimensional del pabellón de aulas modelado en DesignBuilder en el cual todo lo que tiene color adquiere el carácter de “edificio” o “building” lo que significa que es considerado en los análisis térmicos (el entretecho se considera en las transferencias de calor pero no se climatiza) y a los lados del pabellón se encuentran modelados como componente de color gris (solo volumetría sin espacios interiores ni elementos de construcción) aquellos elementos del establecimiento que podrían influir en la iluminación natural de las aulas.

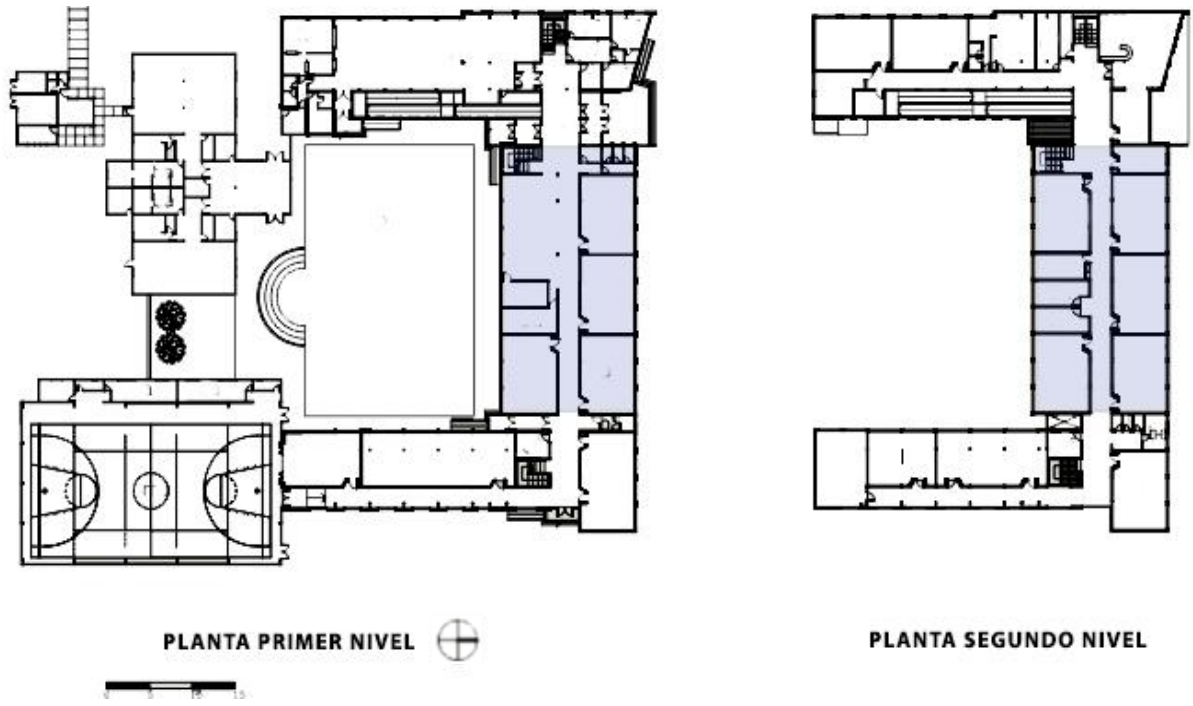


Figura 4.56: Planos de planta de Liceo Austral Lord Cochrane

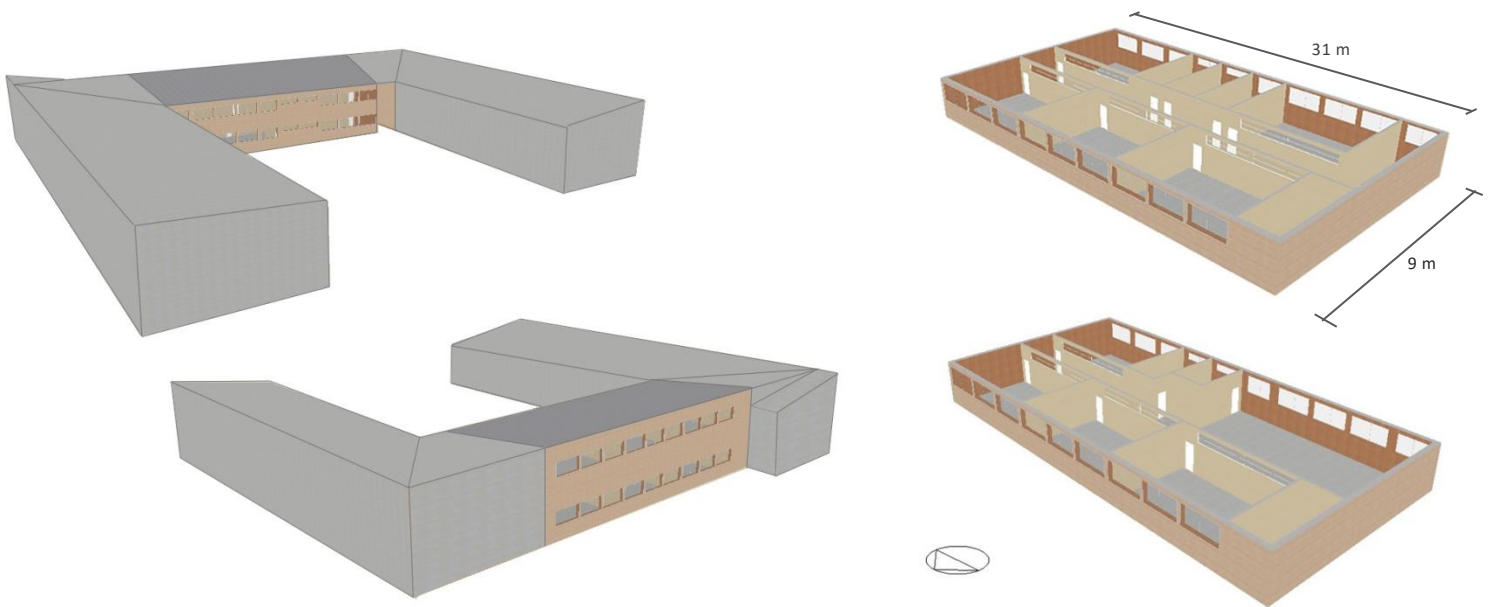


Figura 4.57: Imágenes de modelo 3D utilizado en estudio de simulación energética

4.3.1.b Parámetros de entrada en el modelo:

Ubicación: Para la simulación térmico-dinámica se utiliza el clima de la ciudad de Punta Arenas ya que al ser la capital de la región de Magallanes y la ciudad con mayor población de la zona Austral, es la ciudad más representativa para dicha zona. Como se mencionó anteriormente el archivo climático utilizado tiene formato .EPW (Energy Plus Weather) y fue extraído directamente de la biblioteca de climas de EnergyPlus.

Orientación: El pabellón de aulas utilizado para las simulaciones posee aulas con grandes ventanales en sus dos caras más largas por lo se ve influenciado por dos orientaciones, sin embargo para la cara principal (aquella que posee más aulas) se decide utilizar la disposición sur ya que, según los resultados que muestra la guía GEEEduc para la zona Sur Extremo de la zonificación climática chilena, es en las orientaciones más desfavorables cuando la influencia de la envolvente se puede observar de manera más evidente.

Hermeticidad: El “Manual de hermeticidad al aire de edificaciones” plantea como hermeticidad aceptable para toda la zona entre Coyhaique y Puerto Williams un valor n_{50} de 4,0 renovaciones de aire por hora (ach) por lo que se utiliza dicho valor en todas las simulaciones realizadas. (Bobadilla et al, 2014)

Rango de Confort: En Chile la única legislación que dicta rangos de temperatura de confort al interior de un establecimiento educacional es el Decreto Supremo 580 modificado del año 2010, que establece una temperatura mínima al interior de un aula de 12°C, sin embargo, como se menciona en la guía GEEEDuc, esta exigencia solo es aplicable a ciertas zonas del país y los estándares planteados son bajos por lo que se puede considerar que es un tema poco normado en el país (CITEC UBB, 2012)

Al identificar los estándares existentes a nivel internacional, como se ve en la Tabla 4.1, no son muchos los países que han definido parámetros obligatorios mínimos de confort en establecimientos educacionales, sin embargo se puede notar que las normativas respectivas de países como Perú (18°C – 25°C), Inglaterra (18°C - 24°C) y EE.UU (17°C - 24°C) coinciden bastante y no difieren en más de 1°C.

Los valores de confort planteados en el documento “Building Bulletin 87” versión 2 (2003) conforman uno de los estándares más completos ya que no solo establece parámetros de confort térmico estables para espacios educacionales (desde 18°C en invierno hasta 24°C en verano) sino que además establece valores adicionales como, por ejemplo, que el establecimiento no debe alcanzar más de 28°C por más de 80 hrs. Es por esto que se decide utilizar este estándar para el estudio de demanda.

Tabla 4.1: Exigencias de confort térmico en aulas a nivel internacional

	CHILE	PERÚ	EE.UU	INGLATERRA
	DS 580 mod. 2010	Ministerio de educación 2006	ASHRAE 55 - 2010	Building bulletin 87 version 2 2003
T° Operativa recomendada	Aulas mín 12°C	18°-25°	Según PMV	Invierno Aulas mín 18°C – Verano Aulas 24°C (sin superar 28°C por más de 80 hrs.)

Iluminación: Para la iluminación artificial del pabellón de aulas se utiliza un sistema general de luminaria suspendida con un valor de eficiencia límite de 5 W/m² por cada 100 lux que funciona con los mismos horarios de ocupación planteados para el establecimiento. Este sistema no incluye control de iluminación ni luminaria externa.

HVAC: Para climatizar se utiliza un sistema de calefacción y refrigeración tipo “Fan Coil Unit” (Figura 4.58) con un coeficiente de rendimiento (Heating and cooling system seasonal CoP) igual a 1,0 para que los resultados que se obtengan puedan ser asociados con la demanda energética y no el con el consumo (este último varía según el rendimiento del equipo utilizado). Este sistema posee el mismo horario de funcionamiento que el que se mostrará en los diagramas de ocupación del edificio. La ventilación natural se deja activada con un rango estándar de 5 ac/h.

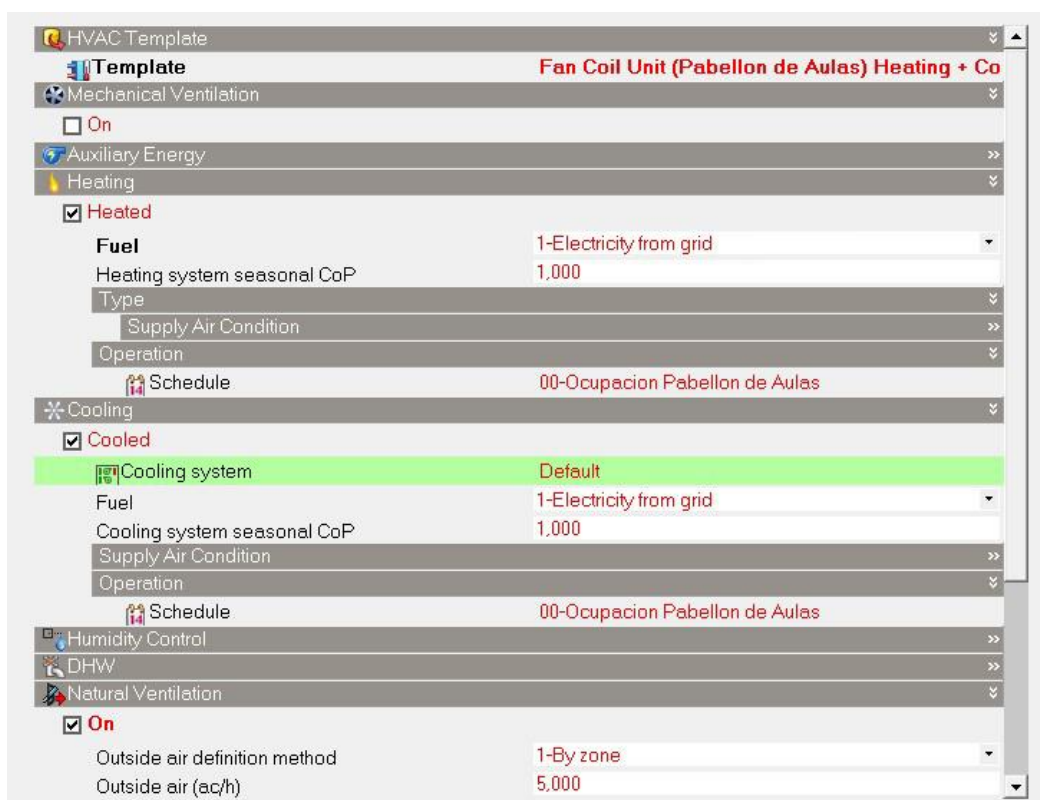


Figura 4.58: HVAC del modelo simulado en Design Builder

Ocupación: Como se puede observar en la Tabla 4.2 la ocupación del pabellón de aulas se dividió en 4 categorías “Aula/Taller”, “Hall/Patio interior”, “Baños” y “Circulación” a las cuales se les incorporó los valores de densidad de ocupación (persona/m²) planteados en el documento “Criterios de diseño para los nuevos espacios educativos” del MINEDUC, un factor metabólico recomendado por el software DesignBuilder de 0,9 y diferentes porcentajes de ocupación según la función de cada recinto. Los 4 tipos de espacios del establecimiento funcionan desde febrero a diciembre (ya que en enero hay receso académico), de lunes a viernes, de 7:00 a 18:00 hrs, alcanzando su porcentaje máximo de ocupación a las 8:00 hrs. Las 2 primeras semanas de agosto la ocupación del establecimiento disminuye en un 85% ya que por motivos de vacaciones de invierno solo se desarrollan algunas actividad al interior de este

Tabla 4.2: Ocupación por recintos del modelo simulado

		RECINTO			
		AULAS/TALLER	HALL / PATIO INTERIOR	BAÑOS	CIRCULACIÓN
OCUPACIÓN	persona/m ²	0,67	0,8	0,9	0,9
	Factor metabólico	0,9	0,9	0,9	0,9
	7:00	15%	15%	85%	85%
	8:00	100%	15%	10%	10%
	9:00	100%	5%	10%	10%
	10:00	100%	5%	10%	10%
	11:00	100%	5%	10%	10%
	12:00	100%	5%	10%	10%
	13:00	5%	100%	85%	85%
	14:00	100%	5%	10%	10%
	15:00	100%	5%	10%	10%
	16:00	100%	5%	10%	10%
	17:00	100%	15%	10%	10%
	18:00	75%	50%	10%	10%

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Enero	Vacío	Vacío	Vacío	Vacío	Vacío	Vacío	Vacío
Febrero	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Marzo	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Abril	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Mayo	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Junio	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Julio	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Agosto	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Septiembre	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Octubre	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Noviembre	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío
Diciembre	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	7:00 - 18:00	Vacío	Vacío

4.3.1.c Construcción:

Muros: El modelo tridimensional posee un total de 397m² de muro exterior en su envolvente, para obtener los resultados necesarios se deben incorporar de manera individual todos las soluciones constructivas de muro mencionadas desde inicios del capítulo 03 a dicha envolvente, los muros que integran aislación adicional a la de las cavidades interiores estructurales (Estructura de 2"x4" con aislación rígida exterior y Doble tabiquería con aislación rígida interior) se probarán con 2 espesores de aislación rígida diferentes (2" y 4") formando en total 7 combinaciones diferentes que se pueden ver en la Figura 4.59. Los materiales utilizados y sus respectivas propiedades son las mismas que se presentaron en los estudios anteriores, la Figura 4.60 muestra los valores.

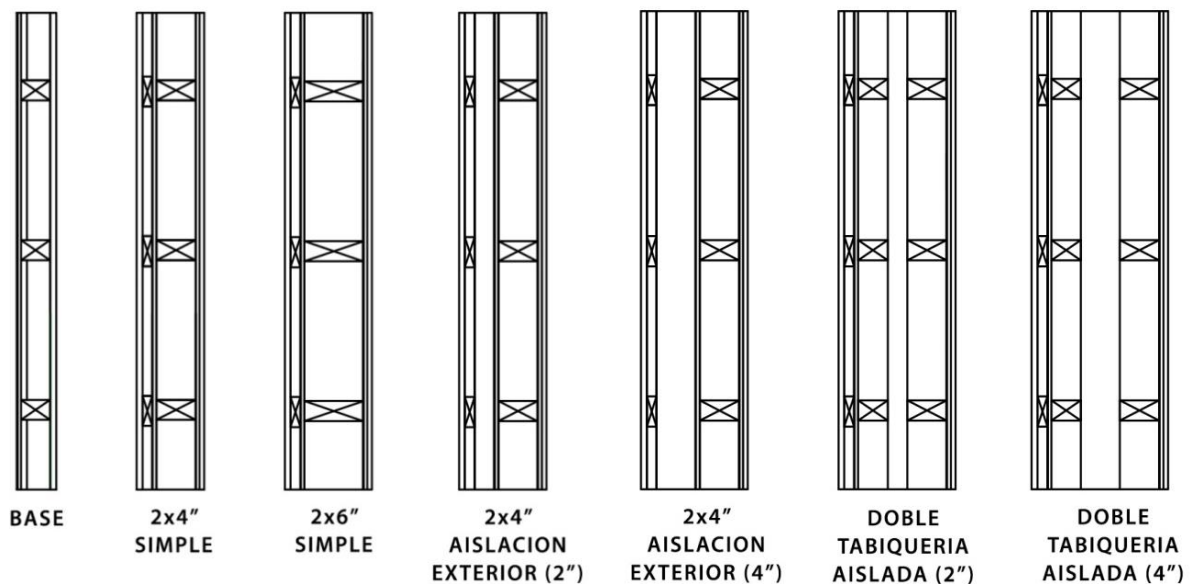
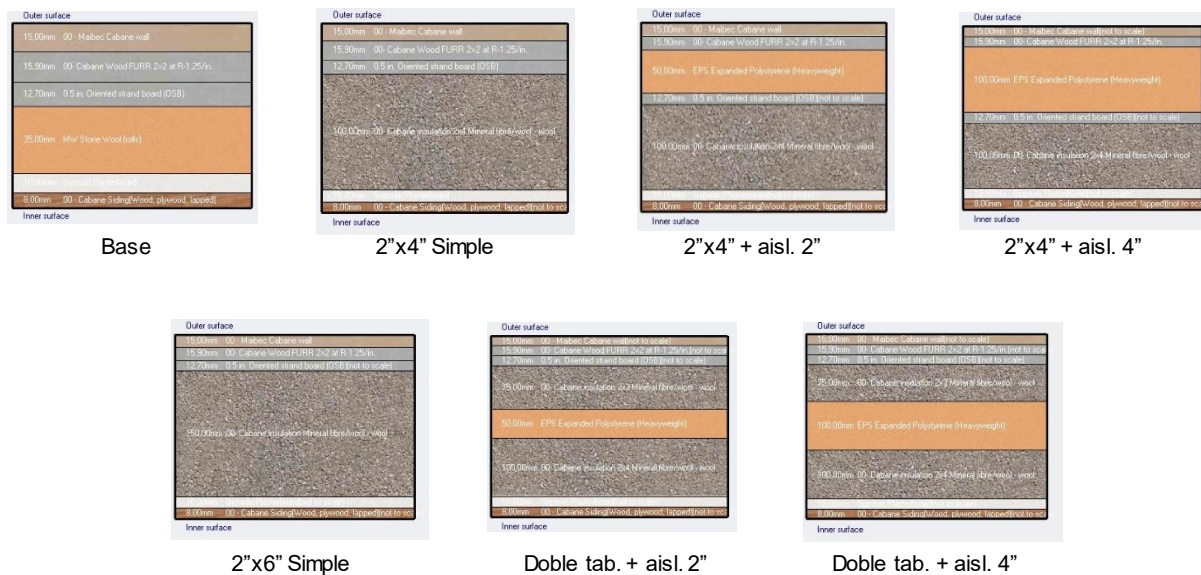


Figura 4.59: Todas las soluciones constructivas utilizadas en las simulaciones energéticas (En vista de planta)

Techo: Al igual que en los detalles del estudio con el software Therm y que la planimetría del establecimiento seleccionado para la simulación se utilizará una techumbre de estructura de cerchas de madera de pino impregnado cuyo valor U alcanzará los 0,25 W/m² K requeridos por normativa.

Piso: Al igual que en los detalles utilizados con Therm se utiliza piso de radier de hormigón de 70 mm de espesor sobre una cama de arena de 50 mm y una cama de ripio de 100 mm.

Ventanas: Al igual que en los detalles de Therm se utilizan ventanas de vidrio doble con cámara interior de aire estanco en todas las simulaciones. Ya que el enfoque de este estudio se centra en las pérdidas de calor producidas por los muros las ventanas utilizadas deben poseer una buena resistencia térmica, similares a las de los detalles en los estudios de simulación de flujo térmico en Therm.



Tabiquería simple 2"x4"		
Material homologado	λ	Espesor (m)
MSD pino de uso exterior	0,104	0,0140
Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,0254
Listón de sujeción de pino	0,104	
Membrana hidrófuga	0,05	0,0010
Placa OSB estructural de pino	0,095	0,0095
Tabiquería interior 2x6"	0,104	0,1000
Lana de vidrio	0,041	
Polietileno PR (Ibérica)	0,5	0,0010
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,24	0,0100
Terciado ranurado de pino	0,095	0,0120
Valor U (W/m2 K)	0,348	

Tabiquería 2"x4" + Aislación rígida exterior (2")		
Materiales	λ	Espesor (m)
MSD pino de uso exterior	0,104	0,0140
Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,0254
Listón de sujeción de pino	0,104	
Placa OSB estructural de pino	0,095	0,0095
Tabiquería interior 2x3"	0,104	0,7500
Poliestireno expandido (30 kg/m2)	0,0361	0,0500
Membrana hidrófuga	0,05	0,0010
Tabiquería interior 2x6"	0,104	0,1000
Lana de vidrio	0,041	
Polietileno PR (Ibérica)	0,5	0,1000
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,24	0,0100
Terciado ranurado de pino	0,095	0,0120
Valor U (W/m2 K)	0,232	

Doble tabiquería con aislación rígida interior (2")		
Material homologado	λ	Espesor (m)
MSD pino de uso exterior	0,104	0,0140
Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,0254
Listón de sujeción de pino	0,104	
Placa OSB estructural de pino	0,095	0,0095
Tabiquería interior 2x3"	0,104	0,0750
Lana mineral densidad (50 kg/m3)	0,041	0,0750
Poliestireno expandido (30 kg/m2)	0,0361	0,0500
Membrana hidrófuga	0,05	0,0010
Tabiquería interior 2x6"	0,104	0,1000
Lana de vidrio	0,041	
Polietileno PR (Ibérica)	0,5	0,0010
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,24	0,0100
Terciado ranurado de pino	0,095	0,0120
Valor U (W/m2 K)	0,17	

Tabiquería simple 2"x6"		
Material homologado	λ	Espesor (m)
MSD pino de uso exterior	0,104	0,0140
Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,0254
Listón de sujeción de pino	0,104	
Membrana hidrófuga	0,05	0,0010
Placa OSB estructural de pino	0,095	0,0095
Tabiquería interior 2x6"	0,104	0,1500
Lana de vidrio	0,041	
Polietileno PR (Ibérica)	0,5	0,1000
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,24	0,0100
Terciado ranurado de pino	0,095	0,0120
Valor U (W/m2 K)	0,255	

Tabiquería 2"x4" + Aislación rígida exterior (4")		
Materiales	λ	Espesor (m)
MSD pino de uso exterior	0,104	0,0140
Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,0254
Listón de sujeción de pino	0,104	
Placa OSB estructural de pino	0,095	0,0095
Tabiquería interior 2x3"	0,104	0,7500
Poliestireno expandido (30 kg/m2)	0,0361	0,1000
Membrana hidrófuga	0,05	0,0010
Tabiquería interior 2x6"	0,104	0,1000
Lana de vidrio	0,041	
Polietileno PR (Ibérica)	0,5	0,1000
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,24	0,0100
Terciado ranurado de pino	0,095	0,0120
Valor U (W/m2 K)	0,175	

Doble tabiquería con aislación rígida interior (4")		
Material homologado	λ	Espesor (m)
MSD pino de uso exterior	0,104	0,0140
Cámara de aire (semi-ventilado)	N/A	0,0254
Listón de sujeción de pino	0,104	
Placa OSB estructural de pino	0,095	0,0095
Tabiquería interior 2x3"	0,104	0,0750
Lana mineral densidad (50 kg/m3)	0,041	0,0750
Poliestireno expandido (30 kg/m2)	0,0361	0,1000
Membrana hidrófuga	0,05	0,0010
Tabiquería interior 2x6"	0,104	0,1000
Lana de vidrio	0,041	
Polietileno PR (Ibérica)	0,5	0,0010
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,24	0,0100
Terciado ranurado de pino	0,095	0,0120
Valor U (W/m2 K)	0,135	

Figura 4.60: Listado de materiales y propiedades utilizadas en las simulaciones

Puentes térmicos: Design Builder permite incorporar 2 tipos de puente térmico, el primero se incorpora a modo de porcentaje en la composición interior del tramo lineal del muro donde se ingresan todos los valores de puente térmico conformados por la estructura y otros elementos de madera. En este punto se incorporaron los mismos porcentajes utilizados para el cálculo de valor U ponderado de cada tipo de muro (14% de tramo estructural y 86% de tramo aislado).

El segundo valor que se puede incorporar a los puentes térmicos del modelo es el de “transmitancias térmicas lineales (Ψ)”, función que fue añadida a Design Builder desde su versión 5.0. Es en este punto donde existe la posibilidad de ingresar todos los valores de transmitancia lineal Ψ obtenidos en los estudios realizados con THERM en el punto 3.1 de este estudio para cada uno de los diferentes tipos de uniones en cada uno de los tipos de muro analizados. La Tabla 4.3 muestra el resumen de valores (Ψ) incorporados en Design Builder para cada tipo de muro. En el caso de los dos tipos de muro que se prueban con 2 cantidades diferentes de aislación rígida (2” y 4”) se utilizarán los valores de transmitancia lineal del muro con 2” de aislación rígida.

Tabla 4.3: Valores de transmitancia térmica lineal incorporados al modelo simulado según cada solución constructiva

Tipo de muro	Transmitancia térmica lineal del puente térmico (Ψ)				
	(W/m K)				
	Muro-techo	Muro-muro	Muro-marco	Muro-entrepiso	Muro-piso
Base	0,46	0,167	0,039	0,094	0,696
2x4" Simple	0,218	0,084	0,013	0,09	0,588
2x6" Simple	0,159	0,062	0,011	0,083	0,537
2x4" Aislado (2")	0,088	0,032	0,015	0,033	0,382
2x4" Aislado (4")	0,088	0,032	0,015	0,033	0,382
Doble tabique (2")	0,022	0,074	0,013	0,068	0,041
Doble tabique (4")	0,022	0,074	0,013	0,068	0,041

4.3.2 Resultados de simulación

4.3.2.a Simulación con muro base

En el Gráfico 4.2 se puede observar el gráfico de demanda anual (dividida en meses) del pabellón de aulas analizado utilizando como envolvente vertical el Muro Base de madera cuyo valor U ponderado es $0,59 \text{ w/m}^2 \text{ K}$.

La demanda que se presenta de manera más notoria en un clima como el de punta arenas es la de calefacción (Heating), la cual presenta su punto más alto el mes de junio con (12150 kwh) manteniéndose dentro del rango de los 12150 y 12000 kwh hasta el mes de agosto donde la demanda baja notoriamente por las vacaciones de invierno. Como es de suponer los meses con menos demanda son enero y diciembre con 1809 kwh y 3280 kwh respectivamente. El total de demanda de calefacción anual es de 73036 kwh.

La demanda de refrigeración (Cooling) es visible durante el mes de enero con 334 Kwh, sin embargo, el resto del año es prácticamente nula ya que la temperatura del aire interior de los recintos no supera el rango de confort establecido por lo que no alcanza a influir considerablemente en la demanda total del edificio.

La demanda de iluminación se mantiene dentro del rango de los 1000 Kwh a 2000 Kwh a lo largo de todo el año alcanzando su punto mayor los meses de mayo y noviembre. La suma de todas las demandas mencionadas genera una demanda total de energía (por m^2) de $131,13 \text{ Kwh/m}^2 \text{ Año}$.

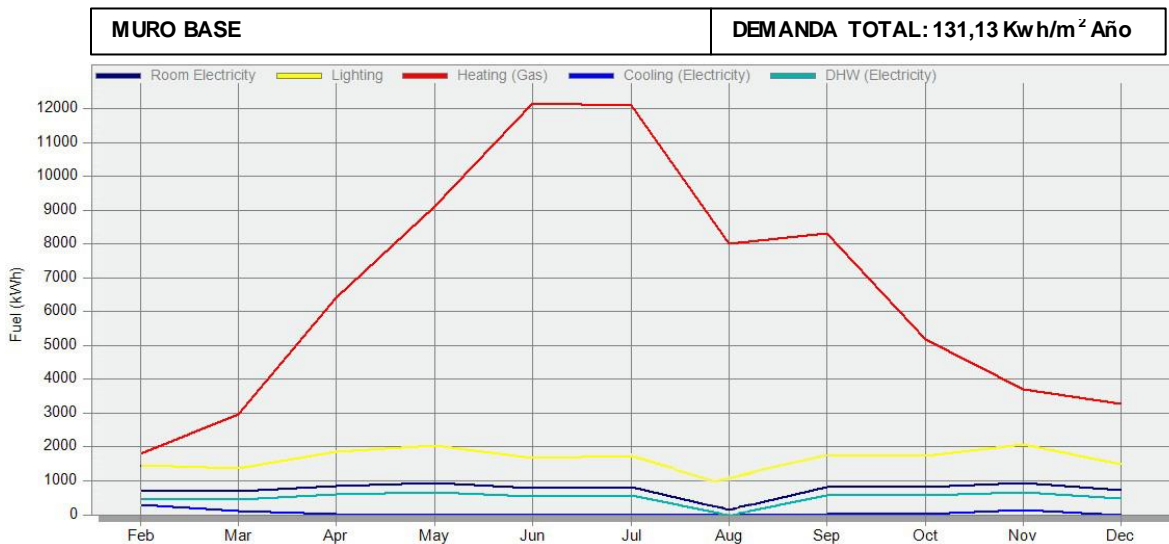


Gráfico 4.2: Demanda energética con Muro Base en envolvente vertical del modelo

4.3.2.b Simulación con muros eficientes de tabiquería.

En el Gráfico 4.3 se puede observar que la demanda de calefacción del pabellón de aulas incorporando tabiquería con estructura de 2x4" y cámara de aire exterior se ve disminuida, alcanzando un máximo de 7847 Kwh en Junio, 7711 Kwh en Julio y un mínimo de 816 Kwh en febrero lo que genera un total de 43836 kwh. La demanda de iluminación se mantiene prácticamente igual que en el caso anterior pero la demanda de refrigeración es levemente más alta ya que alcanza 499 kWh y en el mes de marzo 293 Kwh, esto se puede explicar por el aumento del Valor U de los muros de envolvente.

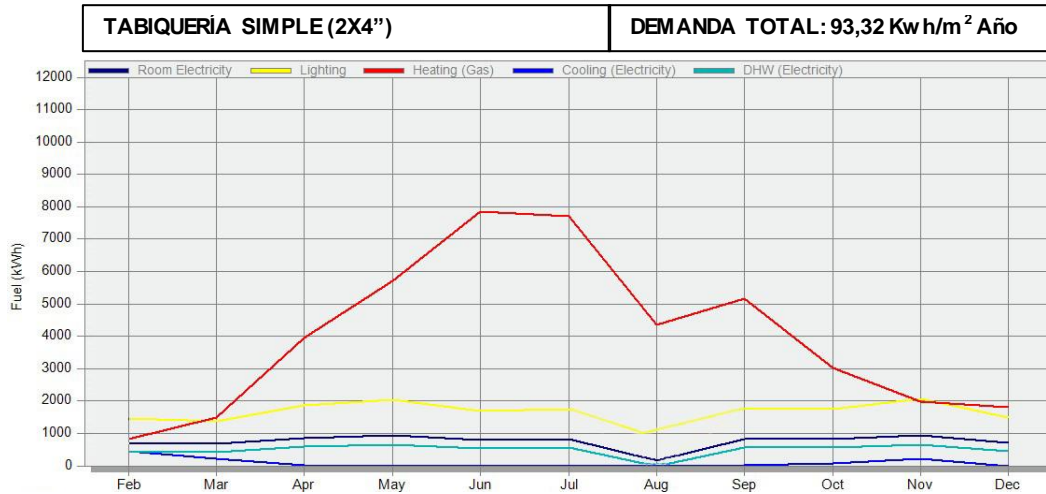


Gráfico 4.3: Demanda energética con tabiquería simple de 2"x4" en envolvente vertical del modelo

Al utilizar el muro de tabiquería de 2x6" como envolvente (Gráfico 4.4) la demanda de calefacción alcanza un valor máximo de 7294 kwh en junio y un mínimo de 690 en febrero, con un total de 40093 Kwh por año. Las demandas de iluminación y refrigeración no sufren grandes modificaciones en relación con el muro de estructura de 2x4" mencionado.

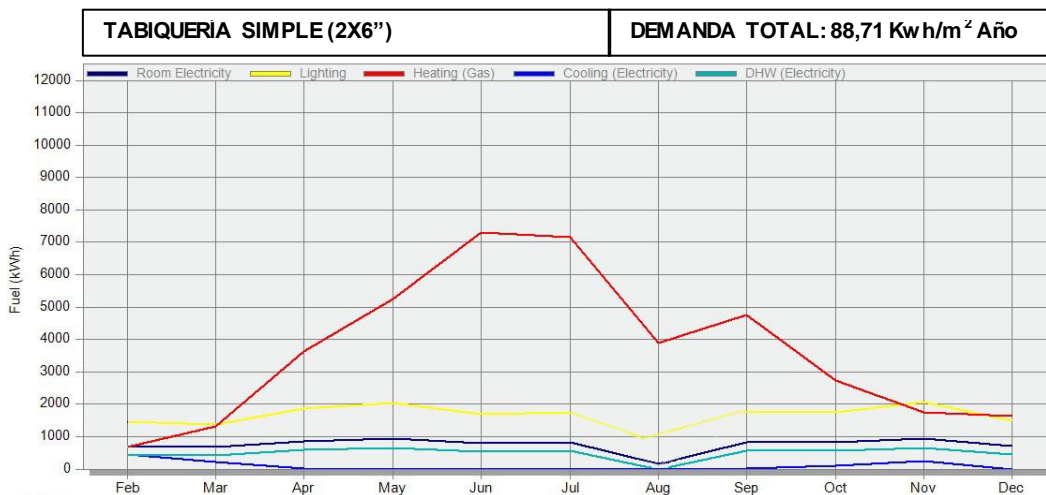


Gráfico 4.4: Demanda energética con tabiquería simple de 2"x6" en envolvente vertical del modelo

Cuando se incorporan muros de tabiquería de 2"x4" con 2" de aislación continua en la envolvente (Gráfico 4.5) la demanda total disminuye a 88,71 Kwh/m² Año. La demanda de calefacción alcanza su máximo en los meses de Junio y Julio con 7236 Kwh y 7091 Kwh respectivamente y su mínimo con 677 Kwh en febrero generando un total de 39683 Kwh

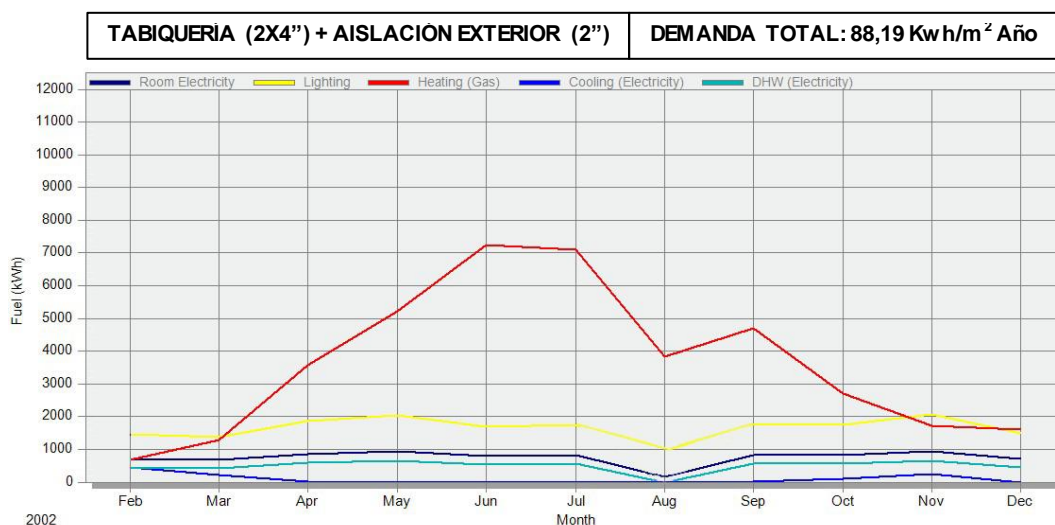


Gráfico 4.5: Demanda energética con tabiquería de 2"x4" con aislación rígida exterior (2")

Si al mismo tipo de muro (estructura de pino 2x4") se le incorporan 4" de aislación rígida exterior (Gráfico 4.6) los resultados de demanda anual de calefacción disminuyen a 38583 Kwh con un valor máximo mensual de 7063 Kwh en junio y un mínimo de 677 Kwh en enero. Nuevamente las demandas de refrigeración y electricidad se mantienen estables en comparación con los otros gráficos presentados anteriormente, sin embargo, en este caso la demanda total por m² del establecimiento disminuye a 86,85 Kwh/m² Año.

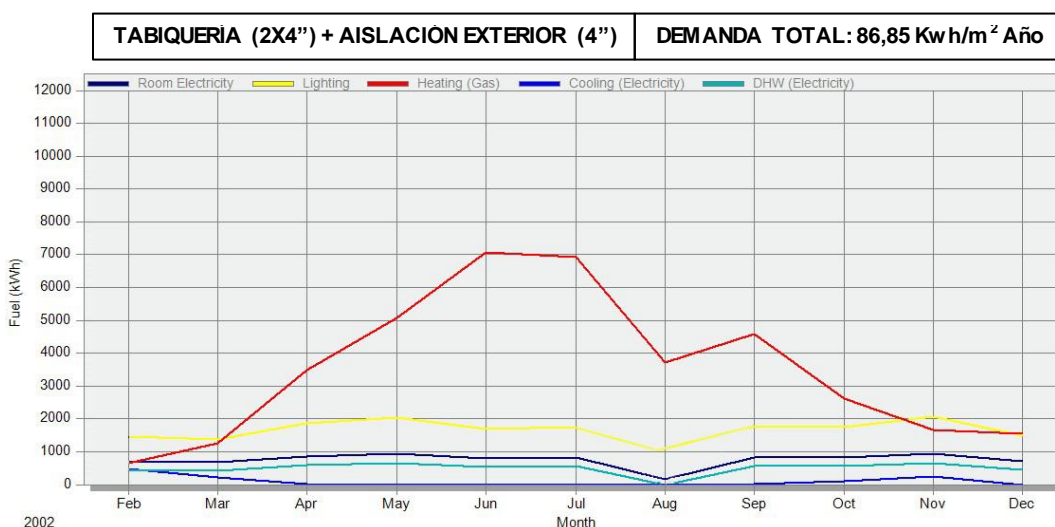


Gráfico 4.6: Demanda energética con tabiquería de 2"x4" con aislación rígida exterior (4")

En el Gráfico 4.7 se pueden observar los diferentes tipos de demanda que posee el pabellón de aulas incorporando muros de doble tabiquería aislada con aislación rígida interior (2") como envolvente. La demanda de calefacción anual es de 35794 Kwh para todo el pabellón, alcanzando en junio un máximo de 6670 Kwh y en febrero un mínimo de 486 Kwh.

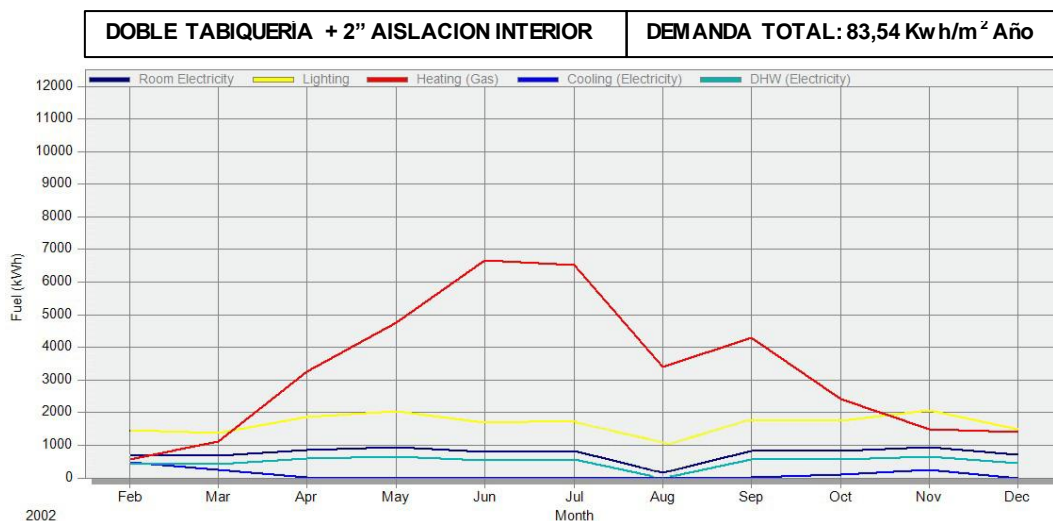


Gráfico 4.7: Demanda energética con doble tabiquería con aislación rígida interior (2'')

El Gráfico 4.8 muestra lo que ocurre al incorporar más aislación rígida (4'') al mismo tipo de muro (Doble tabiquería aislada). La demanda de calefacción alcanza un máximo de 6528 Kwh en junio y un mínimo de 430 Kwh en febrero generando un total anual de 34849 Kwh. Como era de esperarse las demandas de refrigeración e iluminación no sufrieron grandes modificaciones ya que a pesar de aumentar el Valor U y espesor de los muros no disminuye considerablemente el acceso de luz natural.

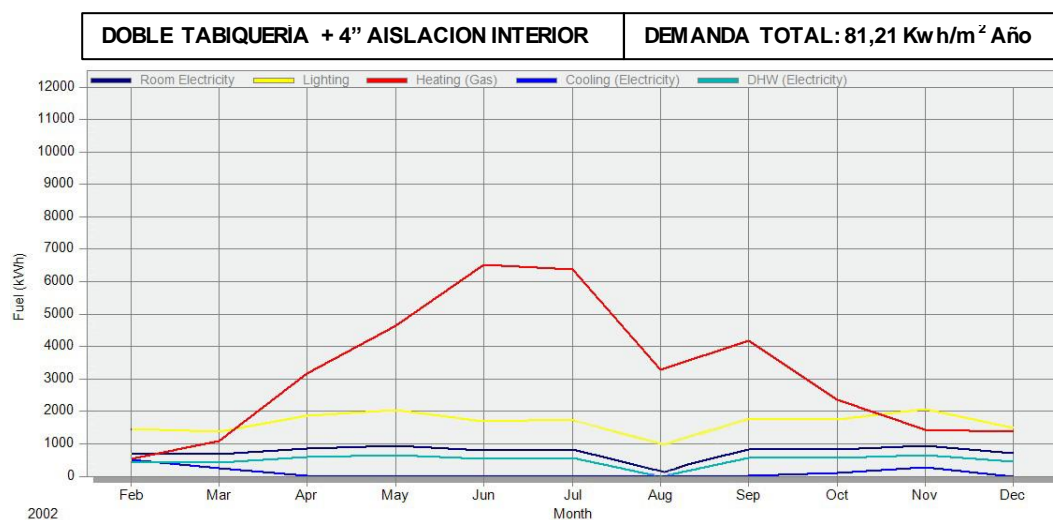


Gráfico 4.8: Demanda energética con doble tabiquería con aislación rígida interior (4'')

4.3.3 Comparación de resultados

Al hacer un análisis comparativo detallado de la demanda de calefacción en todos los casos (Gráfico 4.9) lo primero que se puede observar es la gran diferencia que existe entre la demanda generada por el muro base y los todos muros eficientes analizados. En los meses más críticos (junio y julio) la diferencia entre la demanda base y la generada por el muro de tabiquería simple de 2x4" es de aproximadamente 35%. Con el muro de doble tabiquería (con 4" de aislación interior) esta diferencia es de 50%, siendo aquel que genera la mayor disminución. Además, se puede observar en el gráfico que la disminución producida por la tabiquería de 2"x4" (con 2" de aislación exterior) y el muro de tabiquería simple de 2x6" es prácticamente idéntica.

Si se comparan los resultados de demanda energética generada por la tabiquería simple de 2"x4" y la tabiquería de 2"x4" con 2" de aislación continua, se puede ver que la diferencia es notoria, por lo que se infiere que la incorporación de aislación continua de 2" genera beneficios energéticos considerables. Sin embargo, en los resultados de demanda generada por los muros de doble tabiquería y los de tabiquería de 2"x4" (con aislación exterior) se puede observar que el aumento de la aislación continua de 2" a 4" de espesor no produce grandes diferencias en la demanda (3% para los meses críticos).

En los meses de enero a marzo así como también entre octubre y diciembre las demandas mensuales del pabellón de aulas no varían mucho incorporando los diferentes muros eficientes analizados, sin embargo nuevamente la demanda que genera el muro base es la que muestra diferencias notorias.

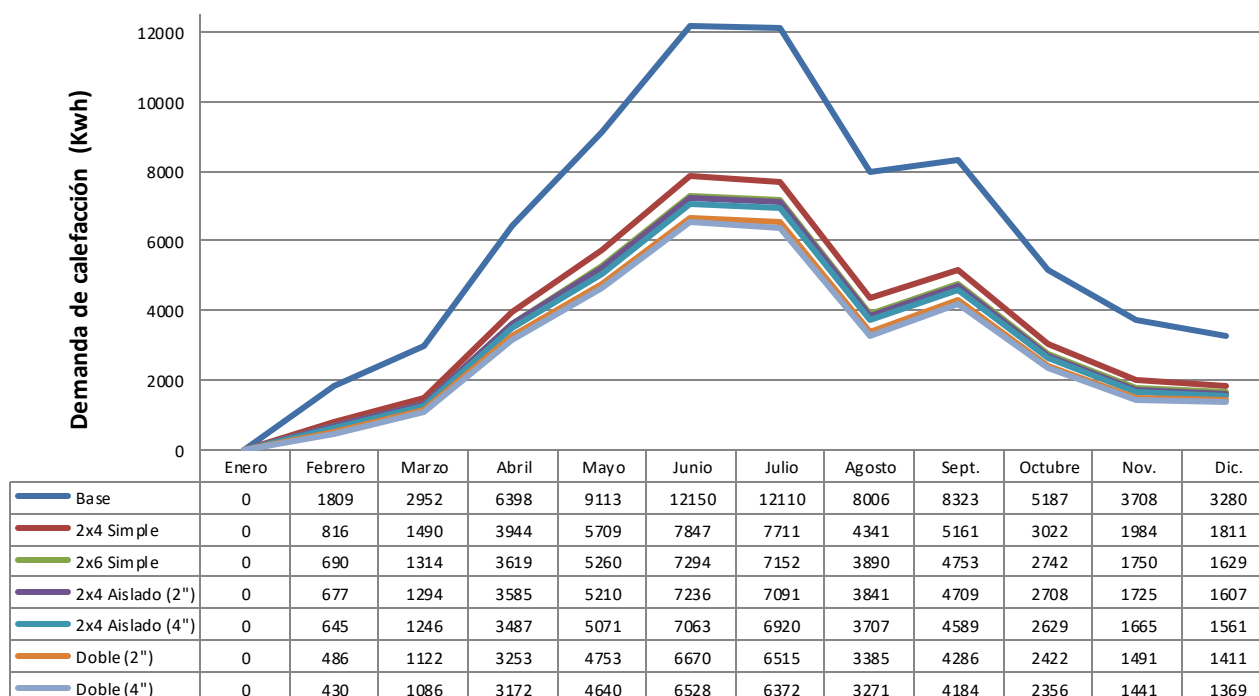


Gráfico 4.9: Comparación demandas de calefacción mensual de todos los muros estudiados

Al comparar el valor U de los muros analizados con la demanda total anual del establecimiento incorporando dichos muros como envolvente (Gráfico 4.10) lo primero que se puede notar es que la demanda energética es proporcional al Valor U del muro que se utiliza, sin embargo, a medida que el valor U disminuye esta no disminuye de manera lineal si no que disminuye de manera exponencial, lo que significa que a medida que aumente la resistencia del muro la disminución generada en la demanda será cada vez más leve hasta llegar a un momento en el que la disminución no será notoria. Se puede deducir que además de la eficiencia que un tipo de envolvente pueda aportar a un establecimiento es importante tener en cuenta que hay un punto en el que el aumento de la resistencia térmica no justificará el ahorro energético generado y es por eso que estos estudios de demanda deben estar acompañados de estudios de costos de construcción y energía para así poder evaluar la relación entre el costo y el beneficio generado.

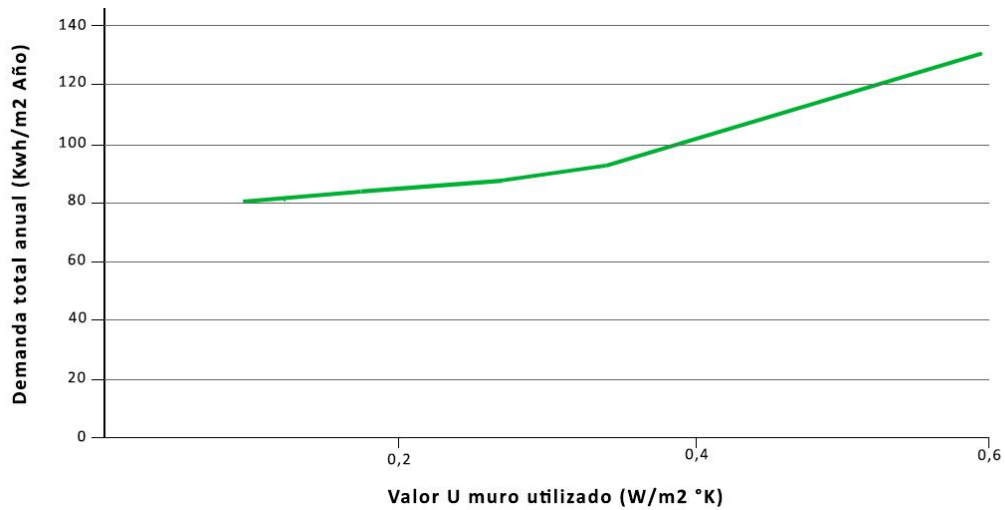


Gráfico 4.10: Comparación de demanda anual con Valor U de los muros utilizados como envolvente

5. COSTOS ASOCIADOS

En este capítulo, a propósito de lo ya hablado en el capítulo anterior referente a los ahorros energéticos generados por cada tipo de muro, se considerará el factor económico como medida complementaria, es decir, se calcularán los costos asociados a la inversión inicial requerida para incorporar dichos muros en un establecimiento nuevo y también el ahorro monetario anual producido por la disminución de la demanda energética de dicho establecimiento. A continuación se mostrarán los procesos que se llevaron a cabo para obtener dichos valores.

5.1 Costo de incorporación de muros en envolvente

Para calcular los costos de incorporación de cada tipo de muro se utilizan los documentos "Tabla referencial de precios unitarios" del Servicio de Vivienda y Urbanización (SERVIU) para la región de Magallanes y para el caso de la madera de pino de 2"x6" que no está en dicho documento, se utilizó el precio referencial del "Catálogo de maderas Sodimac, Magallanes". A continuación se presenta el listado de materiales utilizados junto con toda la información referente a costos de material, mano de obra, porcentaje de pérdida y leyes sociales (**precios en UF**).

Estructura:

Estructura tabique Pino IPV 2" x 3"	m2			0,1966
Pino IPV 2" x 3"	n°	1,10	0,1081	0,1189
Clavos corrientes 4"	kg	0,05	0,0333	0,0017
Pérdidas	%	0,05	0,1206	0,0060
Carpintero	HD	0,05	0,7656	0,0383
Ayudante	HD	0,05	0,3190	0,0159
Leyes Sociales	%	0,29	0,0542	0,0157
Estructura tabique Pino IPV 2" x 4"	m2			0,2061
Pino IPV 2" x 4"	n°	1,30	0,0985	0,1280
Clavos corrientes 4"	kg	0,05	0,0333	0,0017
Pérdidas	%	0,05	0,1297	0,0065
Carpintero	HD	0,05	0,7656	0,0383
Ayudante	HD	0,05	0,3190	0,0159
Leyes Sociales	%	0,29	0,0542	0,0157
Estructura tabique Pino IPV 2" x 6"	m2			0,4003
Pino IPV 2" x 6"	n°	1,10	0,2931	0,3224
Clavos corrientes 4"	kg	0,06	0,0333	0,0020
Pérdidas	%	0,05	0,1206	0,0060
Carpintero	HD	0,05	0,7656	0,0383
Ayudante	HD	0,05	0,3190	0,0159
Leyes Sociales	%	0,29	0,0542	0,0157
Listoneado 1" x 3"	m2			0,1492
Listón bto.seco 1" x 3"	n°	1,20	0,0633	0,0760
Clavos corrientes 4"	kg	0,03	0,0333	0,0010
Pérdidas	%	0,03	0,0768	0,0023
Carpintero	HD	0,05	0,7656	0,0383
Ayudante	HD	0,05	0,3190	0,0160
Leyes Sociales	%	0,29	0,0542	0,0157

Aislantes:

Lana de vidrio 40 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2			0,0868
Lana de vidrio 40 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2	1,05	0,0726	0,0762
Pérdidas	%	0,03	0,0762	0,0023
Jornal	HD	0,02	0,3190	0,0064
Leyes Sociales	%	0,29	0,0064	0,0019

Lana de vidrio 50 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2			0,1111
Lana de vidrio 50 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2	1,05	0,0951	0,0999
Pérdidas	%	0,03	0,0999	0,0030
Jornal	HD	0,02	0,3190	0,0064
Leyes Sociales	%	0,29	0,0064	0,0019

Lana de vidrio 60 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2			0,1267
Lana de vidrio 60 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2	1,05	0,1100	0,1155
Pérdidas	%	0,03	0,0999	0,0030
Jornal	HD	0,02	0,3190	0,0064
Leyes Sociales	%	0,29	0,0064	0,0019

Lana de vidrio 100 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2			0,1698
Lana de vidrio 100 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2	1,05	0,1510	0,1586
Pérdidas	%	0,03	0,0999	0,0030
Jornal	HD	0,02	0,3190	0,0064
Leyes Sociales	%	0,29	0,0064	0,0019

Lana de vidrio 150 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2			0,2233
Lana de vidrio 150 mm (22 kg/m3) rollo libre 0,6 x 10m	m2	1,05	0,2020	0,2121
Pérdidas	%	0,03	0,0999	0,0030
Jornal	HD	0,02	0,3190	0,0064
Leyes Sociales	%	0,29	0,0064	0,0019

Poliestireno expandido 50 mm	m2			0,1091
Poliestireno expandido 50 mm	m2	1,05	0,0818	0,0859
Pérdidas	%	0,03	0,0858	0,0026
Jornal	HD	0,05	0,3190	0,0160
Leyes Sociales	%	0,29	0,0160	0,0046

Poliestireno expandido 100 mm	m2			0,1864
Poliestireno expandido 100 mm	m2	1,05	0,1533	0,1610
Pérdidas	%	0,03	0,1610	0,0048
Jornal	HD	0,05	0,3190	0,0160
Leyes Sociales	%	0,29	0,0160	0,0046

Barreras:

Lámina de polietileno 0,10 mm.	m2			0,0750
Polietileno 0,10 mm	m2	1,05	0,0598	0,0628
Pérdidas	%	0,03	0,0628	0,0019
Ayudante	HD	0,03	0,3190	0,0080
Leyes sociales	%	0,29	0,0080	0,0023

Membrana hidrófuga Tyvek	m2			0,0743
Membrana hidrófuga Tyvek (rollo 28 m2)	m2	1,21	0,0429	0,0519
Subcontrato de mano de obra	n°	0,50	0,0448	0,0224

Placas y revestimientos:

Placa OSB estructural de pino 9,5 mm para entramado de madera				0,1947
OSB estructural 2440 x 1220 x 9,5 mm.	m2	1,00	0,1032	0,1032
Clavos corrientes 2"	kg	0,15	0,0350	0,0053
Pérdidas	%	0,15	0,1085	0,0163
Carpintero	HD	0,05	0,7656	0,0383
Ayudante	HD	0,05	0,3190	0,0160
Leyes sociales	%	0,29	0,0542	0,0157
Yeso cartón 10 mm	m2			0,1599
Yeso cartón 10 mm	m2	1,05	0,0869	0,0912
Clavos para volcanita	kg	0,05	0,0755	0,0038
Pérdidas	%	0,05	0,095	0,0048
Maestro 1ra	HD	0,04	0,8453	0,0338
Ayudante	HD	0,04	0,319	0,0128
Leyes Sociales	%	0,29	0,0466	0,0135
Yeso cartón 15 mm	m2			0,1700
Yeso cartón 15 mm	m2	1,05	0,0961	0,1009
Clavos para volcanita	kg	0,05	0,0755	0,0038
Pérdidas	%	0,05	0,1046	0,0052
Maestro 1ra	HD	0,04	0,8453	0,0338
Ayudante	HD	0,04	0,319	0,0128
Leyes Sociales	%	0,29	0,0466	0,0135
Terciado ranurado 12 mm	m2			0,3655
Terciado ranurado 12 mm	n°	0,37	0,6323	0,2337
Clavos corrientes 2"	kg	0,11	0,0350	0,0038
Pérdidas	%	0,15	0,2375	0,0356
Carpintero	HD	0,07	0,7656	0,0505
Ayudante	HD	0,07	0,319	0,0211
Leyes Sociales	%	0,29	0,0716	0,0208
Revestimiento Madera 1/2" x 4"	m2			0,2928
Pino machihembrado 1/2" x 4"	n°	3,40	0,0613	0,2085
Clavos corrientes 2"	kg	0,11	0,0350	0,0038
Pérdidas	%	0,05	0,2123	0,0106
Carpintero	HD	0,05	0,7656	0,0383
Ayudante	HD	0,05	0,319	0,0159
Leyes Sociales	%	0,29	0,0542	0,0157
Revestimiento fibrocemento 8 mm.	m2			0,2813
Fibrocemento 8 mm.	m2	1,05	0,2034	0,2136
Clavos corrientes 11/2"	kg	0,03	0,0394	0,0012
Pérdidas	%	0,03	0,2148	0,0064
Maestro 1ra	HD	0,04	0,8453	0,0338
Ayudante	HD	0,04	0,319	0,0128
Leyes Sociales	%	0,29	0,0466	0,0135
Esmalte al agua exterior para fibrocemento (2 manos)	m2			0,1019
Pintura esmalte al agua	galón	0,07	0,79	0,0553
Brocha 5 x 5/8"	n°	0,01	0,1298	0,001298
Lija	Pliego	0,15	0,0072	0,00108
Pérdidas	%	0,03	0,0353	0,001059
Pintor	HD	0,05	0,6699	0,033495
Leyes Sociales	%	0,29	0,0335	0,009715

5.1.1 Costo total de muros (por m²)

Luego de obtener los valores unitarios de cada material se calcula el costo por m² de muro (Figura 5.1) que es obtenido al sumar los valores de los materiales que requiere cada una de las soluciones constructivas de muro estudiadas, considerando costos de material, leyes sociales, mano de obra y un margen de utilidad de 15% recomendado por el documento del que se obtienen los costos de los materiales "Tabla referencial de precios unitarios" del SERVIU y el IVA de 19%.

MURO BASE (m²)			
Material	Precio (UF/m2)	Cantidad (m2)	Total UF
Yeso Cartón 15 mm	0,1700	1,00	0,1700
Lámina de Polietileno	0,0750	1,00	0,0750
Lana de vidrio 60 mm.	0,1267	0,86	0,1090
Tabiquería pino IPV 2"x3"	0,1966	1,00	0,1966
Fibrocemento	0,2813	1,00	0,2813
Pintura exterior fibrocemento	0,1019	1,00	0,1019
Precio (UF/m2)			0,9338
Subtotal considerando utilidad de 15% (UF/m2)			1,0739
Total considerando IVA de 19% (UF/m2)			1,2779

MURO TABIQUERÍA 2"x 4" (m²)			
Material	Precio (UF/m2)	Cantidad (m2)	Total UF
Terciado ranurado 12 mm	0,3655	1,00	0,3655
Yeso cartón 10 mm	0,1599	1,00	0,1599
Lámina de polietileno 0,1 mm	0,0750	1,00	0,0750
Lana de vidrio 100 mm	0,1698	0,86	0,1460
Tabiquería pino IPV 2"x4"	0,2061	1,00	0,2061
Placa OSB estructural 9,5 mm	0,1947	1,00	0,1947
Membrana hidrófuga Tyvek	0,0743	1,00	0,0743
Listones de sujeción de pino 1"x3"	0,1492	1,00	0,1492
Revestimiento Madera machiembrada 1/2" x 4"	0,2928	1,00	0,2928
Precio Total (UF/m2)			1,6635
Subtotal considerando utilidad de 15% (UF/m2)			1,9130
Total considerando IVA de 19% (UF/m2)			2,2765

MURO TABIQUERÍA 2"x 6" (m²)			
Material	Precio (UF/m2)	Cantidad (m2)	Total UF
Terciado ranurado 12 mm	0,3655	1,00	0,3655
Yeso cartón 10 mm	0,1599	1,00	0,1599
Lámina de polietileno 0,1 mm	0,0750	1,00	0,0750
Lana de vidrio 150 mm	0,2233	0,86	0,1921
Tabiquería pino IPV 2"x6"	0,4003	1,00	0,4003
Placa OSB estructural 9,5 mm	0,1947	1,00	0,1947
Membrana hidrófuga Tyvek	0,0743	1,00	0,0743
Listones de sujeción de pino 1"x3"	0,1492	1,00	0,1492
Revestimiento Madera machiembrada 1/2" x 4"	0,2928	1,00	0,2928
Precio Total (UF/m2)			1,9037
Subtotal considerando utilidad de 15% (UF/m2)			2,1893
Total considerando IVA de 19% (UF/m2)			2,6053

MURO TABIQUERÍA 2"x 4" + AISLACIÓN RÍGIDA 2" (m²)			
Material	Precio (UF/m2)	Cantidad (m2)	Total UF
Terciado ranurado 12 mm	0,3655	1,00	0,3655
Yeso cartón 10 mm	0,1599	1,00	0,1599
Lámina de polietileno 0,1 mm	0,0750	1,00	0,0750
Lana de vidrio 100 mm	0,1698	0,86	0,1460
Tabiquería pino IPV 2"x4"	0,2061	1,00	0,2061
Placa OSB estructural 9,5 mm	0,1947	1,00	0,1947
Membrana hidrófuga Tyvek	0,0743	1,00	0,0743
Listones de sujeción de pino 1"x3"	0,1492	1,00	0,1492
Poliestireno expandido 50 mm.	0,1091	1,00	0,1091
Revestimiento Madera machiembreda 1/2" x 4"	0,2928	1,00	0,2928
Precio Total (UF/m2)			1,7726
Subtotal considerando utilidad de 15% (UF/m2)			2,0384
Total considerando IVA de 19% (UF/m2)			2,4258

MURO TABIQUERÍA 2"x 4" + AISLACIÓN RÍGIDA 4" (m²)			
Material	Precio (UF/m2)	Cantidad (m2)	Total UF
Terciado ranurado 12 mm	0,3655	1,00	0,3655
Yeso cartón 10 mm	0,1599	1,00	0,1599
Lámina de polietileno 0,1 mm	0,0750	1,00	0,0750
Lana de vidrio 100 mm	0,1698	0,86	0,1460
Tabiquería pino IPV 2"x4"	0,2061	1,00	0,2061
Placa OSB estructural 9,5 mm	0,1947	1,00	0,1947
Membrana hidrófuga Tyvek	0,0743	1,00	0,0743
Listones de sujeción de pino 1"x3"	0,1492	1,00	0,1492
Poliestireno expandido 100 mm.	0,1864	1,00	0,1864
Revestimiento Madera machiembreda 1/2" x 4"	0,2928	1,00	0,2928
Precio Total (UF/m2)			1,8499
Subtotal considerando utilidad de 15% (UF/m2)			2,1274
Total considerando IVA de 19% (UF/m2)			2,5316

MURO DOBLE TABIQUERÍA CON AISLACIÓN RÍGIDA INTERIOR 2" (m²)			
Material	Precio (UF/m2)	Cantidad (m2)	Total UF
Terciado ranurado 12 mm	0,3655	1,00	0,3655
Yeso cartón 10 mm	0,1599	1,00	0,1599
Lámina de polietileno 0,1 mm	0,0750	1,00	0,0750
Lana de vidrio 100 mm	0,1698	0,86	0,1460
Tabiquería pino IPV 2"x4"	0,2061	1,00	0,2061
Poliestireno expandido 50 mm.	0,1091	1,00	0,1091
Tabiquería pino IPV 2"x3"	0,1966	1,00	0,1966
Lana de vidrio 60 mm	0,1267	0,86	0,1090
Placa OSB estructural 9,5 mm	0,1947	1,00	0,1947
Membrana hidrófuga Tyvek	0,0743	1,00	0,0743
Listones de sujeción de pino 1"x3"	0,1492	1,00	0,1492
Revestimiento Madera machiembreda 1/2" x 4"	0,2928	1,00	0,2928
Precio Total (UF/m2)			2,0782
Subtotal considerando utilidad de 15% (UF/m2)			2,3899
Total considerando IVA de 19% (UF/m2)			2,8440

MURO DOBLE TABIQUERÍA CON AISLACIÓN RÍGIDA INTERIOR 4" (m²)			
Material	Precio (UF/m ²)	Cantidad (m ²)	Total UF
Terciado ranurado 12 mm	0,3655	1,00	0,3655
Yeso cartón 10 mm	0,1599	1,00	0,1599
Lámina de polietileno 0,1 mm	0,0750	1,00	0,0750
Lana de vidrio 100 mm	0,1698	0,86	0,1460
Tabiquería pino IPV 2"x4"	0,2061	1,00	0,2061
Poliestireno expandido 100 mm.	0,1864	1,00	0,1864
Tabiquería pino IPV 2"x3"	0,1966	1,00	0,1966
Lana de vidrio 60 mm	0,1267	0,86	0,1090
Placa OSB estructural 9,5 mm	0,1947	1,00	0,1947
Membrana hidrófuga Tyvek	0,0743	1,00	0,0743
Listones de sujeción de pino 1"x3"	0,1492	1,00	0,1492
Revestimiento Madera machiembrada 1/2" x 4"	0,2928	1,00	0,2928
Precio Total (UF/m ²)			2,1555
Precio con margen utilidad de 15% (UF/m²)			2,4788
Total considerando IVA de 19% (UF/m²)			2,9498

Figura 5.1: Listado costos de soluciones constructivas de muro (por m²)

5.1.2 Costo total de muros (Pabellón de aulas analizado)

Una vez obtenidos los costos asociados a cada tipo de muro se debe obtener el valor de costo de incorporación de dichos muros en la envolvente del pabellón de aulas del Liceo Austral Lord Cochrane utilizado en los estudios de simulación energética. En la Tabla 5.1 se pueden observar los costos asociados a cada tipo de muro considerando los 397 m² de muro de envolvente que posee dicho pabellón. Los precios son calculados en UF considerando los valores de las tablas anteriores y varían entre 425 a 985 UF, además se calculan los precios en pesos chilenos (CLP) utilizando como referencia el valor de la UF el día 01 de agosto de 2017 (\$26.593) con valores desde aproximadamente \$13.500.000 hasta casi \$31.200.000.

Tabla 5.1: Costos de incorporación de soluciones constructivas en establecimiento seleccionado

Tipo de muro	(UF/m ²)	UF/Edificio (397 m ² muro)	Valor en CLP UF= \$26593
Base	1,2779	507,33	\$13.491.520
2x4 Simple	2,2765	903,78	\$24.033.969
2x6 Simple	2,6053	1034,29	\$27.504.904
2x4 + Aislacion ext. (2")	2,4258	963,02	\$25.609.700
2x4 + Aislacion ext. (4")	2,5316	1005,04	\$26.726.966
Doble tabique con aisl. (2")	2,8440	1129,05	\$30.024.818
Doble tabique con aisl. (4")	2,9498	1171,06	\$31.142.084

5.2 Costo de la energía

Para poder evaluar el gasto generado por el establecimiento es necesario tener en cuenta que en Chile los costos de la energía utilizada para satisfacer la demanda de calefacción son variables y en muchos casos difíciles de medir. La energía eléctrica es la única fuente de energía que mantiene un valor relativamente estable, además posee registros públicos de sus costos a lo largo del tiempo y puede suplir todas las demandas generadas por el establecimiento. Por lo que se decide utilizar este tipo de energía como referente para aplicar costos al consumo generado por el edificio en las simulaciones energéticas.

Ya que las simulaciones fueron realizadas utilizando archivos climáticos de Punta Arenas los precios utilizados para calcular el valor del Kwh serán los de la empresa EDELMAG la cual suministra la electricidad en dicha ciudad, a continuación se detalla un resumen de la planilla de tarifas mensuales de electricidad en EDELMAG para la región de Magallanes durante el mes de Julio de 2017 con IVA incluido (Tabla 5.2)

Tabla 5.2: Tarifas de suministro EDELMAG

Tarifas de suministro eléctrico EDELMAG			
Ciudad	Cargo fijo mensual (\$/mes)	Cargo por energía (\$/Kwh)	Cargo energía adicional (\$/Kwh)
Punta Arenas	1289,70	127	215
Porvenir	1083,79	107	181
Puerto Natales	1289,70	127	215
Puerto Williams	1083,79	107	181

Pabellón de aulas seleccionado:

En la Tabla 5.3 se puede observar la demanda energética por m² de superficie además de los valores de energía total consumida por el pabellón de aulas en un año, a los cuales se incorporan los costos asociados al Kwh presentados en la Tabla 5.3 de tarifa de suministro. Como era de esperarse, el establecimiento con el muro base en su envolvente es aquel que posee un gasto anual más alto con más de \$9.200.000, mientras que el establecimiento con el muro de doble tabiquería con aislación rígida exterior de 4" en su envolvente posee un gasto anual en energía menor que todos los otros tipos de muro. Los valores entregados están calculados para un establecimiento cuyo sistema de climatización posee un COP=1,0

Tabla 5.3: Costos de consumo energético para establecimiento seleccionado

Tipo de muro	Kwh/m ² Año	Kwh/Edificio Año (555 m ² superficie)	\$/Edificio Año (555 m ² superficie)
Base	131,13	72777,15	\$9.242.698
2x4 Simple	93,32	51792,6	\$6.577.660
2x6 Simple	88,71	49234,05	\$6.252.724
2x4 + Aislacion ext. (2")	88,19	48945,45	\$6.216.072
2x4 + Aislacion ext. (4")	86,85	48201,75	\$6.121.622
Doble tabique con aisl. (2")	83,54	46364,7	\$5.888.317
Doble tabique con aisl. (4")	81,21	45071,55	\$5.724.087

5.3 Relación costo de envolvente / Ahorro energético

Una vez que ya se han calculado los costos de incorporación de muros y los costos de la energía, ambos valores pueden relacionarse entre sí, sin embargo los valores de costo por m² de envolvente (397 m²) no se pueden comparar de manera directa con los de demanda por m² de superficie (555 m²) ya que se refieren a tipos de m² diferentes por lo tanto se utiliza el edificio de pabellón de aulas para relacionar los resultados.

En la Tabla 5.4 se pueden ver los costos (en UF y pesos chilenos) requeridos tanto para la incorporación de los muros en la envolvente como para el consumo energético anual, según los datos obtenidos en los puntos 5.1 y 5.2 de este estudio. Como se puede observar, a medida que el costo de construcción aumenta, el costo energético de demanda disminuye considerablemente, por ejemplo los tipos de muro de 2"x4" con aislación rígida exterior de 2" y 4" cuestan prácticamente el doble que el muro base, sin embargo logran disminuir el gasto energético en más de un 35% por año.

El muro base genera un gasto aproximado anual en energía equivalente al 70% de su costo inicial de incorporación lo que demuestra que su bajo costo inicial está relacionado a un bajo desempeño energético generando gastos importantes de nivel anual durante toda la vida útil del edificio. El efecto contrario ocurre con los muros de tabiquería doble con aislación rígida interior de 2" y 4" ya que, si bien, su costo de incorporación es bastante elevado genera una reducción del gasto monetario anual de aproximadamente 45%.

Tabla 5.4: Costos de construcción y consumo energético en establecimiento seleccionado

Tipo de muro	Construcción				Energía			
	Por m ² de envolvente		Por edificio		Por m ² de superficie		Por edificio	
	UF/m ²	\$/m ² envolvente	UF/Edificio (397 m ² muro)	COSTO TOTAL UF= \$26.593	Kwh/m ² Año	\$/m ² superficie Valor Kwh=\$127	Kwh/Edificio Año (555 m ²)	COSTO ANUAL
Base	1,28	\$33.983	507,33	\$13.491.520	131,13	16653,51	72777,15	\$9.242.698
2x4 Simple	2,28	\$60.538	903,77	\$24.033.969	93,32	11851,64	51792,60	\$6.577.660
2x6 Simple	2,61	\$69.282	1034,30	\$27.504.904	88,71	11266,17	49234,05	\$6.252.724
2x4 + Aislacion ext. (2")	2,43	\$64.509	963,04	\$25.609.700	88,19	11200,13	48945,45	\$6.216.072
2x4 + Aislacion ext. (4")	2,53	\$67.322	1005,05	\$26.726.966	86,85	11029,95	48201,75	\$6.121.622
Doble tabique con aisl. (2")	2,84	\$75.630	1129,07	\$30.024.818	83,54	10609,58	46364,70	\$5.888.317
Doble tabique con aisl. (4")	2,95	\$78.444	1171,07	\$31.142.084	81,21	10313,67	45071,55	\$5.724.087

Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos con el “Muro Base” son aquellos que se consideran como el valor mínimo requerido y fijan el piso sobre el cual calcular las diferencias en costos y ahorro energético, es por ese motivo que dicho valor será restado de los valores de costo de incorporación y demanda energética relacionados a los diferentes muros eficientes mencionados en este estudio. En la Tabla 5.5 se pueden ver los valores de costo adicional de incorporación y el ahorro anual generado en energía por la incorporación de cada tipo de muro analizado.

Tabla 5.5: Costos de construcción y consumo energético en establecimiento seleccionado, descontando valores Base

Tipo de muro	INCORPORACIÓN DE MUROS		ENERGÍA	
	COSTO TOTAL	ADICIONAL (sin muro base)	COSTO ANUAL	AHORRO ANUAL
Base	\$13.491.520	\$0	\$9.242.698	\$0
2x4 Simple	\$24.033.969	\$10.542.449	\$6.577.660	\$2.665.038
2x6 Simple	\$27.504.904	\$14.013.384	\$6.252.724	\$2.989.974
2x4 + Aislacion ext. (2")	\$25.609.700	\$12.118.180	\$6.216.072	\$3.026.626
2x4 + Aislacion ext. (4")	\$26.726.966	\$13.235.446	\$6.121.622	\$3.121.076
Doble tabique con aisl. (2")	\$30.024.818	\$16.533.298	\$5.888.317	\$3.354.381
Doble tabique con aisl. (4")	\$31.142.084	\$17.650.564	\$5.724.087	\$3.518.611

Como se mencionó anteriormente, se puede observar que a medida que aumenta el costo de construcción aumenta el ahorro energético, sin embargo esto ocurre en diferentes proporciones según el tipo de muro utilizado y es por eso que esta información se debe visualizar a modo de gráfico lineal.

El Gráfico 5.1 muestra la relación entre el costo inicial adicional de construcción y el ahorro mensual generado en el pabellón de aulas analizado. En dicho gráfico se observa que, gracias a que la separación entre el costo (punto rojo) y el ahorro (punto azul) posee la menor longitud, el muro de tabiquería de 2"x4" es aquel que posee el mayor beneficio en relación a la proporción entre la mejora y el costo asociado, aun así es aquel que disminuye el gasto energético en menor magnitud si se compara con los otros tipo de muro.

El muro de tabiquería simple de 2"x6" posee la peor relación costo / beneficio ya que su costo inicial de construcción es más elevado que otros tipos de muro que generan una disminución similar en la demanda, como por ejemplo, ambos muros de tabiquería de 2"x4" con aislación continua exterior (2" y 4"). De esto también se infiere que la incorporación de aislación continua exterior es útil porque genera un beneficio notorio en el ahorro energético. Sin embargo también se debe considerar el hecho de que tener 2" o 4" de espesor de aislación rígida en la envolvente genera aumentos considerables en el costo inicial sin demostrar grandes diferencias a nivel de ahorro energético.

Los muros de tabiquería doble con aislación rígida interior de 2" y 4" son aquellos cuya incorporación significa un costo mayor, sin embargo también son los que disminuyen en mayor proporción el gasto energético del edificio por lo tanto le atribuyen mayor eficiencia energética a este. Nuevamente se observa que el aumento en el espesor de la aislación rígida (de 2" a 4") genera gastos adicionales notorios sin generar un aumento significativo en el ahorro energético por lo que se puede deducir que, cuando el objetivo es aumentar la eficiencia considerablemente y obtener beneficios que se condigan, es recomendable optar por la opción de doble tabiquería con 2" de aislación rígida interior.

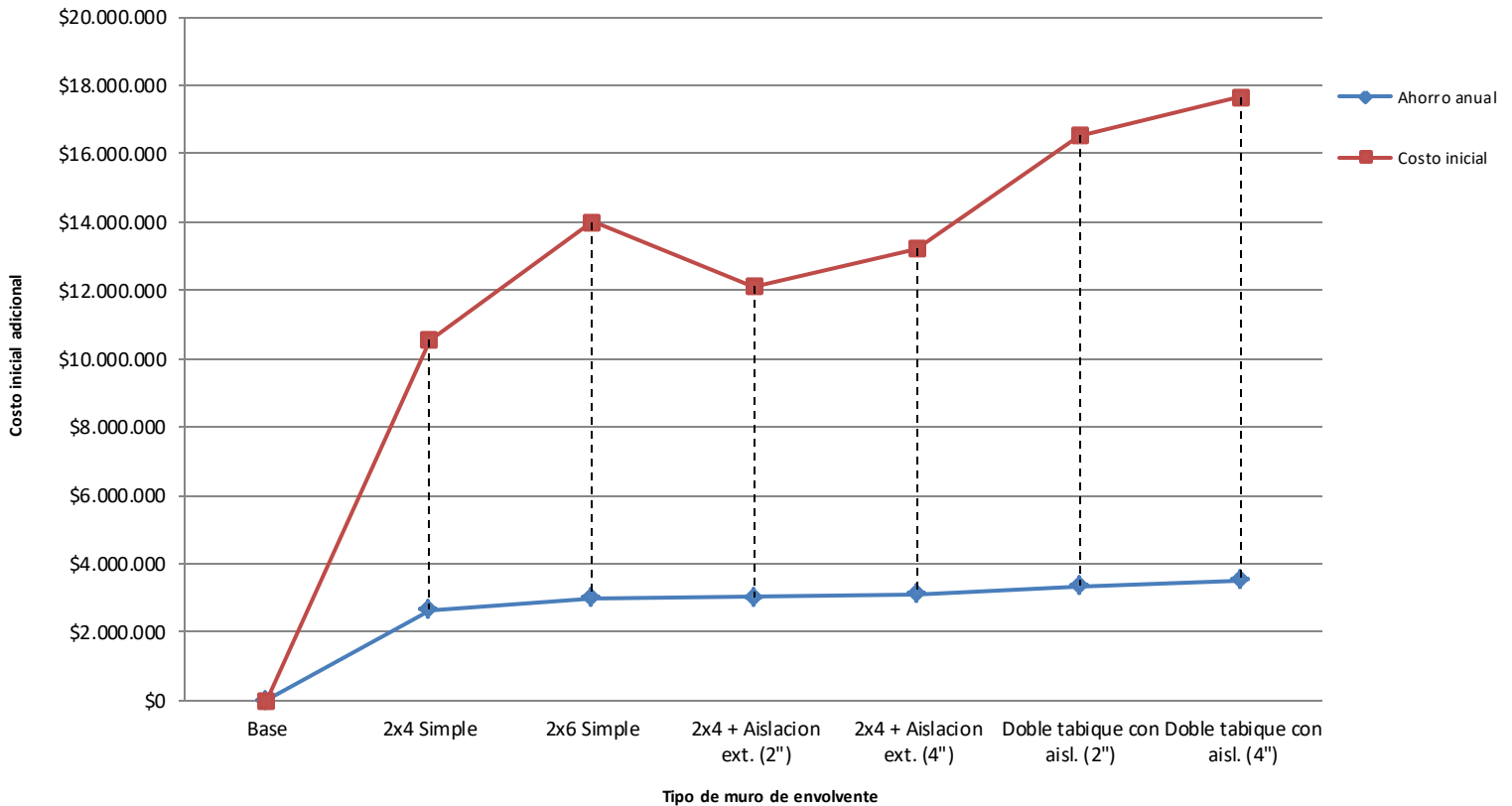


Gráfico 5.1: Relación entre costo y beneficio generado por cada solución constructiva

Conociendo los valores monetarios de la incorporación de cada tipo de muro y el ahorro energético anual generado se puede calcular un valor aproximado de años en los que se recuperaría el gasto inicial. Como se puede observar en la Tabla 5.6 el tipo de muro con el que se recuperaría más rápido la inversión es el de tabiquería simple de 2"x4" sin embargo, como la cantidad de tiempo de recuperación del dinero es muy parecida para los tres tipos de muro que poseen tabiquería de 2"x4" se puede deducir que, si un establecimiento nuevo está interesado en invertir más fondos para optimizar su fachada, conviene invertir más dinero en aislación rígida exterior de 2" y de esa manera aumentar el ahorro energético anual.

En general la diferencia en la recuperación del dinero invertido para cada uno de los tipos de muro presentados en este estudio no varía en más de un año por lo que la opción a elegir estará más relacionada con el presupuesto inicial que se posee para generar mejoras en la envolvente.

Tabla 5.6: Tiempo aproximado de recuperación del gasto inicial

Tipo de muro	Ahorro anual	Costo inicial	Años para recuperar
Base	--	--	--
2x4 Simple	\$2.665.038	\$10.542.449	3,96
2x6 Simple	\$2.989.974	\$14.013.384	4,69
2x4 + Aislación ext. (2")	\$3.026.626	\$12.118.180	4,00
2x4 + Aislación ext. (4")	\$3.121.076	\$13.235.446	4,24
Doble tabique con aisl. (2")	\$3.354.381	\$16.533.298	4,93
Doble tabique con aisl. (4")	\$3.518.611	\$17.650.564	5,02

Es importante tomar en cuenta que este es un método de referencia utilizado para entender los efectos directos que hay en la relación entre el ahorro monetario y los costos asociados. Como se mencionó anteriormente estos resultados permiten obtener un valor aproximado de los efectos económicos que genera la incorporación de cada tipo de envolvente vertical de madera en los establecimientos que posean características similares a las del que se seleccionó para este estudio, sin embargo para obtener resultados definitivos relacionados a la recuperación de la inversión se deberá realizar un estudio de análisis financiero considerando todos los factores que influyen en la rentabilidad de una inversión como, por ejemplo, la devaluación del dinero en el tiempo por efectos de la inflación y las tasas de interés.

6. CONCLUSIONES:

De este estudio se puede concluir que los estándares térmicos incluidos en la normativa térmica Chilena están muy por debajo de las exigencias planteadas en el National Building Code of Canadá para zonas con condiciones climáticas similares, existe una brecha considerable, especialmente en los espacios educacionales donde no existe una normativa térmica. Los TDRé poseen bastantes similitudes con las exigencias térmicas canadienses, sin embargo no conforman exigencias y quedan solo en la categoría de recomendación.

En relación a los estudios de flujo térmico realizados se puede concluir que cada una de las soluciones constructivas analizadas posee diferentes niveles de influencia de los puentes térmicos generados, tanto a nivel de muro lineal como en sus respectivas uniones entre elementos constructivos (muro-muro, muro-marco, muro-techo, muro-entrepiso y muro-piso), además los resultados demuestran que el mínimo planteado por la normativa no posee un buen desempeño térmico ya que la solución constructiva de Muro Base muestra pérdidas de calor notorias producidas por la estructura en su tramo lineal y todas las uniones entre elementos analizadas.

Del estudio de flujo térmico también se concluye que todas las soluciones constructivas canadienses analizadas demostraron mejoras notorias en relación al muro base. Los estudios realizados en las soluciones de tabiquería simple de 2"x4" y 2"x6" demostraron que no es necesario recurrir a complejos sistemas constructivos para poder lograr el cumplimiento de estándares estrictos como lo son el National Building code of Canada y los TDRé. Por otro lado los estudios realizados a las soluciones de doble tabiquería y tabiquería de 2"x4" con aislación continua muestran que los puentes térmicos generados en las uniones entre elementos constructivos se logran disminuir prácticamente en su totalidad, demostrando que una envolvente vertical de madera puede poseer un desempeño óptimo a nivel de flujo térmico. Sin embargo para lograr un desempeño óptimo la cantidad de material utilizado y su disposición es clave, especialmente el caso de la aislación rígida continua que tuvo diferente desempeño cuando se colocó al interior o al exterior del muro.

Los resultados entregados por el estudio aplicado de flujo térmico en el cubículo de prueba demuestran que los diferenciales de temperatura superficial y la magnitud de los puentes térmicos generados por los pie derechos en la sección lineal del muro son prácticamente idénticos a los resultados de los estudios de simulación de flujo térmico con la solución de tabiquería simple de 2"x6", por lo que se puede concluir que los estudios de simulación de flujo térmico realizados entregan resultados válidos apegados a la realidad.

En los estudios de demanda energética, que además incorporan los valores de influencia de puentes térmicos en las uniones (muro-muro, muro-marco, muro-techo, muro-entrepiso y muro-piso) obtenidos previamente en los estudios de flujo térmico realizados, se puede observar que todas las soluciones constructivas canadienses presentadas producen mejoras beneficiosas a nivel de demanda energética total cuando son incorporadas a la envolvente vertical de un establecimiento educacional de la zona austral de Chile desde la fase de diseño, sin embargo cada una de ellas lo hace en proporciones diferentes.

El estudio de demanda energética realizado a la solución de tabiquería simple de 2"x4" demuestra que alcanzando las exigencias térmicas mínimas establecidas por los TDRé y el NBC of Canada se puede generar beneficios notorios a nivel energético. Por otro lado en los estudios de demanda energética realizados a las soluciones constructivas de tabiquería de 2"x4" con aislación rígida continua de 2" y 4" de espesor se demuestra que la incorporación de aislación continua genera beneficios adicionales en la disminución de la demanda de aproximadamente un 5% gracias a la disminución del valor U ponderado de los muros y de la influencia de los puentes térmicos que esta produce. Las soluciones constructivas más eficientes a nivel energético, presentadas en este estudio, son las de doble tabiquería con aislación rígida adicional de 2" y 4" ya que logran disminuir la demanda base total en un 40% aproximadamente.

Debido a que las dos soluciones más eficientes a nivel energético son aquellas que poseen el valor U y los valores de influencia de puentes térmicos más bajos se concluye que estos son los dos factores de una envolvente vertical que más influyen en la demanda energética de un establecimiento educacional de madera emplazado en la zona austral de Chile.

Al analizar la relación entre el costo y beneficio se puede concluir que, de las soluciones constructivas evaluadas existen algunas que son convenientes según el presupuesto inicial que se posee y otras cuya incorporación no es recomendable. La solución de tabiquería simple de 2"x6" en envolventes verticales de establecimientos educacionales de la zona austral de Chile no es recomendable ya que genera beneficios energéticos similares a los de la tabiquería de 2"x4" con aislación rígida adicional pero a un costo mayor. También se concluye que para generar mejoras energéticas con un presupuesto relativamente bajo, basado en estándares exigentes como National Building Code of Canada o Términos de Referencia estandarizados TDRé, se recomienda incorporar en la envolvente vertical del establecimiento la solución de tabiquería simple de 2"x4".

Al analizar la relación entre el costo inicial y el beneficio generado por las soluciones de tabiquería de 2"x4" con aislación rígida (de 2" y 4" de espesor) y las soluciones de doble tabiquería con aislación rígida (de 2" y 4" de espesor) se concluye que la incorporación de aislación rígida continua en la envolvente genera grandes beneficios energéticos a un costo razonable pero el aumento en el espesor de esta (de 2" a 4") aumenta los costos iniciales sin generar diferencias considerables a nivel energético por lo que dicho aumento no es recomendable. Considerando esto, si el presupuesto inicial es mayor que el mencionado en el párrafo anterior, se recomienda incorporar en la envolvente vertical la solución de tabiquería de 2"x4" con aislación rígida continua de 2" ya que disminuye fuertemente la influencia de los puentes térmicos y por ende la demanda energética a un costo razonable. Finalmente para lograr un desempeño óptimo de la envolvente vertical, realizando una inversión inicial más alta, se recomienda la solución de tabiquería doble con aislación rígida interior de 2" ya que esta genera el mayor beneficio energético versus el costo asociado.

	SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS ANALIZADAS	
	Recomendadas (Viable)	No recomendadas
Bajo presupuesto	Tabiquería simple de 2"x4"	Tabiquería simple de 2"x6"
Presupuesto medio	Tabiquería de 2"x4" con aislación rígida continua de 2"	Tabiquería de 2"x4" con aislación rígida continua de 4"
Presupuesto alto	Doble tabiquería con aislación rígida continua de 2"	Doble tabiquería con aislación rígida continua de 4"

En relación a la metodología empleada para este estudio se puede concluir que existen varias ventajas en su utilización:

- I. Realizar visitas a los establecimientos estudiados permite identificar detalles que no están especificados en las referencias bibliográficas.
- II. Realizar estudios aplicados en la realidad permite obtener resultados que se pueden comparar con la información de los estudios de simulación, corroborando si las variables utilizadas en dichos estudios son las correctas.
- III. Realizar diferentes estudios de manera previa a los estudios de demanda energética permite incorporar todos los resultados en el modelo de simulación energética (resultados de magnitud en la influencia de los puentes térmicos obtenidos en estudios de flujo térmico, análisis tipológico de establecimientos, etc) los que enriquecen los resultados finales.
- IV. El cálculo de los costos asociados permite comparar la relación entre el costo y el beneficio generado con el fin de entender que soluciones son recomendables para su incorporación.

6.1 Propuestas de trabajos futuros:

Como trabajo futuro, existe la necesidad de ampliar el campo de aplicación de los resultados obtenidos a otros parámetros de la envolvente, con el fin de enriquecer el conocimiento entregado por este estudio:

- I. Incorporando otras soluciones constructivas de envolvente vertical de madera con soluciones que incorporen CLT como estructura principal u otro sistema constructivo de madera.
- II. Incorporando otras soluciones constructivas canadienses de envolvente de madera como techos planos y pisos ventilados compuestos de estructura de vigas I de madera.

También se propone levantar una base de datos con soluciones constructivas de envolventes verticales en madera para el diseño de Establecimientos Educativos, que incorpore los estudios de flujo térmico, permitiendo conocer de manera instantánea la influencia de los puentes térmicos en las uniones entre elementos constructivos.

Además es necesario ampliar el estudio de costo y beneficio a través de un análisis financiero que considere otros factores: el valor residual de las mejoras incorporadas, los cambios en el valor adquisitivo del dinero en el tiempo por efecto de las tasas de interés y la inflación; para así identificar de manera más precisa la rentabilidad en la inversión de las soluciones constructivas evaluadas.

7. BIBLIOGRAFÍA

A.S.H.R.A.E. (2007). Standard 90.1-2007. *Energy Conservation in Existing Building*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA.

Awad, H., Gül, M., Zaman, H., Yu, H., & Al-Hussein, M. (2014). Evaluation of the thermal and structural performance of potential energy efficient wall systems for mid-rise wood-frame buildings. *Energy and Buildings*, 82, 416-427.

Bobadilla, A., Arriagada, R., Figueroa, R., Muñoz, C., Espinoza, R., Díaz, M., & Fookes, J. (2014). Manual de hermeticidad al aire de edificaciones.

Burrows, J. (2006). *Canadian wood-frame house construction*. Central Mortgage and Housing Corporation.

CITECUBB, D. (2012). TDRé Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obras de la Dirección de Arquitectura. *Según Zonas Geográficas del País y Según Tipologías de Edificaciones*, 10.

CITECUBB. (2012). Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos. *Santiago, ACHEE*.

Finch, G., Wang, J., & Ricketts, D. (2013). Guide for designing energy-efficient building enclosures for wood-frame multi-unit residential buildings in marine to cold climate zones in North America. *British Columbia, Canada*.

ISO, E. (1995). 10211-1: 1995. Thermal bridges in building construction—Heat flows and surface temperatures—Part 1: General calculation methods. *International Organization for Standardization, Brussels*.

Kosny, J., Asiz, A., Smith, I., Shrestha, S., & Fallahi, A. (2014). A review of high R-value wood framed and composite wood wall technologies using advanced insulation techniques. *Energy and Buildings*, 72, 441-456.

Ministerio de educación. (2013). Nuevos Espacios Educativos 2010-2013. *Santiago*.

Ministerio de educación. (2014). Criterios de diseño para los nuevos espacios educativos: En el marco del fortalecimiento de la educación pública. *Santiago*.

Muñoz, C., & Bobadilla, A. (2012). Simulación y evaluación de puentes térmicos: Soluciones constructivas típicas aprobadas por la Norma Térmica para elementos verticales en estructura de madera y metálicos en la Zona 4 Simulaciones con Therm y Usai y evaluación con Método de Cámara Térmica. *Revista de la Construcción*, 11(2), 92-111.

Mustafa, F. A. (2017). Performance assessment of buildings via post-occupancy evaluation: A case study of the building of the architecture and software engineering departments in Salahaddin University-Erbil, Iraq. *Frontiers of Architectural Research*.

National Research Council of Canada., & National Research Council Canada. (2012). National building code of Canada. Ottawa: Associate Committee on the National Building Code, National Research Council.

Nawawi, A. H., & Khalil, N. (2008). Post-occupancy evaluation correlated with building occupants' satisfaction: An approach to performance evaluation of government and public buildings. *Journal of Building Appraisal*, 4(2), 59-69.

Okolie, K. C. (2011). *Performance evaluation of buildings in Educational Institutions: A case of Universities in South-East Nigeria* (Tesis doctoral).

Strobel, K., Nyrud, A. Q., & Bysheim, K. (2017). Interior wood use: linking user perceptions to physical properties. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1-9.

Tadeu, A., Simões, I., Simões, N., & Prata, J. (2011). Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. *Energy and Buildings*, 43(12), 3685-3695.

Tookaloo, A., & Smith, R. (2015). Post Occupancy Evaluation in Higher Education. *Procedia Engineering*, 118, 515-521.

ANEXO 1

Planillas de cálculo de transmitancia térmica

Calculo Valor U a través de planillas Excel utilizando fórmulas de uso manual (Nch853)

MURO 2x4" tabiquería aislada con camara de aire semiventilada					
Capa exterior (Rse=0,12)	Espesor (m)	λ	Rg (camara aire)	(a) Coeficiente	Espesor/ λ (Rn)
MSD pino de uso exterior	0,0140	0,104	N/A	N/A	0,135
Camara de aire (semi-ventilado)	0,0254	N/A	0,105	0,25	N/A
Listón de sujeción de pino	0,0254	0,104	N/A	N/A	0,244
Membrana de fieltro asfáltico 15 lb	0,0010	0,05	N/A	N/A	0,020
Terciado de pino (AraucoPly)	0,0095	0,095	N/A	N/A	0,100
Tabiquería interior 2x4"	0,1000	0,104	N/A	N/A	0,962
Lana mineral densidad (50 kg/m3)	0,1000	0,041	N/A	N/A	2,439
Polietileno PR (Ibérica)	0,0010	0,5	N/A	N/A	0,002
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,0100	0,24	N/A	N/A	0,042
Terciado ranurado de pino	0,0120	0,095	N/A	N/A	0,126
Capa interior (Rsi=0,12)					

FORMULAS UTILIZADAS	
U	$U = \frac{1}{R_T} = U_1 + \alpha(U_2 - U_1)$
U1	$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + R_i + R_g + R_e + R_{se}$
U2	$R_T = \frac{1}{U} = 2R_{si} + R_i$

ESTRUCTURA		AISLACIÓN			
Ri	Re	Ri	Re	Rsi	Rse
1,496	0,135	2,729	0,135	0,12	0,12
					2 Rsi
					0,24

SECCIÓN ESTRUCTURAL		14%	0,14		
U1	U2	U1 -U2	U estruc.	R total	
0,506	0,576119273	0,070	0,523706087	1,909467971	

SECCIÓN AISLADA		86%	0,86		
U1	U2	U1 -U2	U aislac.	R total	
0,312	0,336812965	0,025	0,317948427	3,145164166	

TOTAL		100%			
U1	U2	U2 -U1	U total	R total	
0,338900717	0,370315848	0,031415132	0,3467545	2,883884711	

TOTAL (Ponderado)	0,3467545
CUMPLE	SI

MURO 2x6" Tabiquería aislada con cámara de aire semiventilada					
Capa exterior (Rse= 0,12)	Espesor (m)	λ	Rg (camara aire)	(a) Coeficiente	Espesor/ λ (Rn)
MSD pino de uso exterior	0,0140	0,104	N/A	N/A	0,135
Camara de aire (semi-ventilado)	0,0254	N/A	0,105	0,25	N/A
Listón de sujeción de pino	0,0254	0,104	N/A	N/A	0,244
Membrana de fieltro asfáltico 15 lb	0,0010	0,05	N/A	N/A	0,020
Terciado de pino (AraucoPly)	0,0095	0,095	N/A	N/A	0,100
Tabiquería interior 2x6"	0,1500	0,104	N/A	N/A	1,442
Lana mineral densidad (50 kg/m3)	0,1500	0,041	N/A	N/A	3,659
Polietileno PR (Ibérica)	0,0010	0,5	N/A	N/A	0,002
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,0100	0,24	N/A	N/A	0,042
Terciado ranurado de pino	0,0120	0,095	N/A	N/A	0,126
Capa interior (Rsi=0,12)					

FORMULAS UTILIZADAS	
U Total	$U = \frac{1}{R_T} = U_1 + \alpha(U_2 - U_1)$
U1	$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + R_i + R_g + R_e + R_{se}$
U2	$R_T = \frac{1}{U} = 2R_{si} + R_i$

ESTRUCTURA		AISLACIÓN		Resistencia superficial	
Ri	Re	Ri	Re	Rsi	Rse
1,977	0,135	3,949	0,135	0,12	0,12
				2 Rsi	0,24

SECCIÓN ESTRUCTURAL		14%		0,14	
U1	U2	U2 - U1	U estruc.	R total	
0,407	0,451157484	0,044	0,418147017	2,391503368	

SECCIÓN AISLADA		86%		0,86	
U1	U2	U2 - U1	U aislac.	R total	
0,226	0,23874787	0,013	0,229058519	4,365696601	

TOTAL		100%			
U1	U2	U2 - U1	U total	R total	
0,251212807	0,268485216	0,017272409	0,255530909	3,913420898	

TOTAL (Ponderado)	0,255530909
CUMPLE	SI

MURO 2x4" Tabiquería doblemente aislada con cámara de aire semiventilada					
Capa exterior (Rse= 0,12)	Espesor (m)	λ	Rg (camara aire)	(a) Coeficiente	Espesor/ λ (Rn)
MSD pino de uso exterior	0,0140	0,104	N/A	N/A	0,135
Camara de aire (semi-ventilado)	0,0254	N/A	0,105	0,25	N/A
Poliestireno expandido (30 kg/m3)	0,0500	0,0361	N/A	N/A	1,385
Listón de sujeción de pino	0,0254	0,104	N/A	N/A	0,244
Membrana de fieltro asfáltico 15 lb	0,0010	0,05	N/A	N/A	0,020
Terciado de pino (AraucoPly)	0,0095	0,095	N/A	N/A	0,100
Tabiquería interior 2x4"	0,1000	0,104	N/A	N/A	0,962
Lana mineral densidad (50 kg/m3)	0,1000	0,041	N/A	N/A	2,439
Polietileno PR (Ibérica)	0,0010	0,5	N/A	N/A	0,002
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,0100	0,24	N/A	N/A	0,042
Terciado ranurado de pino	0,0120	0,095	N/A	N/A	0,126
Capa interior (Rsi=0,12)					

FORMULAS UTILIZADAS	
U Total	$U = \frac{1}{R_T} = U_1 + \alpha(U_2 - U_1)$
U1	$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + R_i + R_g + R_e + R_{se}$
U2	$R_T = \frac{1}{U} = 2R_{si} + R_i$

SECCION ESTRUCTURAL		AISLACIÓN		Resistencia superficial	
Ri	Re	Ri	Re	Rsi	Rse
2,881	0,135	4,114	0,135	0,12	0,12
					2 Rsi
					0,24

SECCIÓN ESTRUCTURAL	14%	0,14		
U1	U2	U1 -U2	U estruc.	R estruc.
0,298	0,320431353	0,023	0,303294981	3,297120169

SECCIÓN AISLADA	86%	0,86		
U1	U2	U1 -U2	U aislac.	R aislac.
0,218	0,22967131	0,012	0,220686198	4,531320985

TOTAL	100%			
U1	U2	U2 -U1	U total	R total
0,228875998	0,242377716	0,013501718	0,232251428	4,305678592

TOTAL (Ponderado)	0,232251428
CUMPLE	SI

MURO Tabiquería Doble con cámara de aire semiventilada					
Capa exterior (Rse= 0,12)	Espesor (m)	λ	Rg (camara aire)	(a) Coeficiente	Espesor/ λ (Rn)
MSD pino de uso exterior	0,0140	0,104	N/A	N/A	0,135
Camara de aire (semi-ventilado)	0,0254	N/A	0,105	0,25	N/A
Listón de sujeción de pino	0,0254	0,104	N/A	N/A	0,244
Terciado de pino (AraucoPly)	0,0095	0,095	N/A	N/A	0,100
Tabiquería interior 2x3"	0,0750	0,104	N/A	N/A	0,721
Lana mineral densidad (50 kg/m3)	0,0750	0,041	N/A	N/A	1,829
Poliestireno expandido (30 kg/m2)	0,0500	0,0361	N/A	N/A	1,385
Membrana de fieltro asfáltico 15 lb	0,0010	0,05	N/A	N/A	0,020
Tabiquería interior 2x6"	0,1000	0,104	N/A	N/A	0,962
Lana mineral densidad (50 kg/m3)	0,1000	0,041	N/A	N/A	2,439
Polietileno PR (Ibérica)	0,0010	0,5	N/A	N/A	0,002
Yeso cartón estándar (650 kg/m3)	0,0100	0,24	N/A	N/A	0,042
Terciado ranurado de pino	0,0120	0,095	N/A	N/A	0,126
Capa interior (Rsi=0,12)					

FÓRMULAS UTILIZADAS	
U Total	$U = \frac{1}{R_T} = U_1 + \alpha(U_2 - U_1)$
U1	$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + R_i + R_g + R_e + R_{se}$
U2	$R_T = \frac{1}{U} = 2R_{si} + R_i$

SECCIÓN ESTRUCTURAL		AISLACIÓN		Resistencia superficial	
Ri	Re	Ri	Re	Rsi	Rse
3,602	0,135	5,943	0,135	0,12	0,12
				2 Rsi	0,24

SECCIÓN ESTRUCTURAL	14%	0,14		
U1	U2	U1 - U2	U estruc.	R estruc.
0,245	0,2603	0,015	0,248824332	4,01889957

SECCIÓN AISLADA	86%	0,86		
U1	U2	U1 - U2	U aislac.	R aislac.
0,156	0,1617	0,006	0,157200476	6,361303892

TOTAL	100%			
U1	U2	U2 - U1	U total	R total
0,168195825	0,1755	0,007327964	0,170027816	5,881390613

TOTAL (Ponderado)	0,1700
CUMPLE	SI

Calculo Transmitancia lineal a través de planillas Excel utilizando fórmulas ISO EN 10211-1

TIPO MURO	UNIÓN	l _j (m)	U factor (PT) (W/m ² K)	Umuro (W/m ² K)	U factor (PT) - Umuro	Ψ (W/m K)
Base	muro-muro	1,76	0,68	0,585	0,095	0,167
Base	muro-entrepiso	1,10	0,67	0,585	0,085	0,094
Base	muro-marco	1,10	0,62	0,585	0,035	0,039
2x4 simple	muro-muro	1,76	0,396	0,348	0,048	0,084
2x4 simple	muro-entrepiso	1,10	0,43	0,348	0,082	0,090
2x4 simple	muro-marco	1,10	0,36	0,348	0,012	0,013
2x6 simple	muro-muro	1,76	0,29	0,255	0,035	0,062
2x6 simple	muro-entrepiso	1,10	0,33	0,255	0,075	0,083
2x6 simple	muro-marco	1,10	0,265	0,255	0,01	0,011
2x4 Double aisl.	muro-muro	1,76	0,25	0,232	0,018	0,032
2x4 Double aisl.	muro-entrepiso	1,10	0,262	0,232	0,03	0,033
2x4 Double aisl.	muro-marco	1,10	0,246	0,232	0,014	0,015
Double tabique	muro-muro	1,76	0,21	0,168	0,042	0,074
Double tabique	muro-entrepiso	1,10	0,23	0,168	0,062	0,068
Double tabique	muro-marco	1,10	0,18	0,168	0,012	0,013
$\psi = l_j \cdot (U_{factor (PT)} - U_{muro})$						

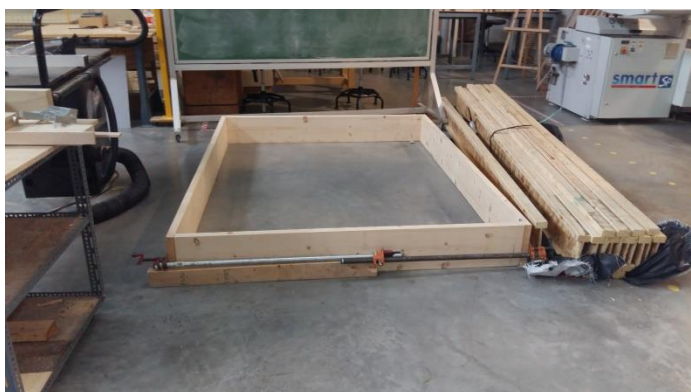
TIPO MURO	UNIÓN	l _(PT) (m)	U factor (PT) (W/m ² K)	L ^{2d} (U _{factor} x l _{PT}) (W/m K)	U _{j(1)} Piso o techo (W/m ² K)	l _{j(1)} (m)	U _{j(2)} muro (W/m ² K)	l _{j(2)} (m)	U _{j(1)} x l _{j(1)} (W/m ² K)	U _{j(2)} x l _{j(2)} (W/m ² K)	Σ(U _j x l _j) (W/m ² K)	Ψ (W/m K)
Base	muro-piso	2,4	0,991	2,3784	0,78	1,4	0,59	1,0	1,092	0,59	1,682	0,696
Base	muro-techo	2,0	0,65	1,3	0,25	1,0	0,59	1,0	0,25	0,59	0,84	0,460
2x4 simple	muro-piso	2,4	0,845	2,028	0,78	1,4	0,348	1,0	1,092	0,348	1,44	0,588
2x4 simple	muro-techo	2,0	0,408	0,816	0,25	1,0	0,348	1,0	0,25	0,348	0,598	0,218
2x6 simple	muro-piso	2,4	0,785	1,884	0,78	1,4	0,255	1,0	1,092	0,255	1,347	0,537
2x6 simple	muro-techo	2,0	0,332	0,664	0,25	1,0	0,255	1,0	0,25	0,255	0,505	0,159
2x4 Double aisl.	muro-piso	2,4	0,711	1,7064	0,78	1,4	0,232	1,0	1,092	0,232	1,324	0,382
2x4 Double aisl.	muro-techo	2,0	0,285	0,57	0,25	1,0	0,232	1,0	0,25	0,232	0,482	0,088
Double tabique	muro-piso	2,4	0,542	1,3008	0,78	1,4	0,168	1,0	1,092	0,168	1,26	0,041
Double tabique	muro-techo	2,0	0,22	0,44	0,25	1,0	0,168	1,0	0,25	0,168	0,418	0,022
$\psi = L^{2D} - \sum U_j \cdot l_j$												

ANEXO 2

Registro fotográfico de construcción de cubículo de prueba de transferencia de calor en la realidad

A continuación se presentará una secuencia fotográfica en la que se pueden observar todos los pasos llevados a cabo en la construcción del cubículo de prueba (que simula ser una pequeña vivienda), en el cual se tomaron mediciones de las temperaturas interiores y superficiales del muro de Tabiquería de madera de pino IPV 2"x 6" y cámara de aire medianamente ventilada exterior, para luego comparar los resultados con aquellos obtenidos en las simulaciones de transferencia de calor realizadas con el Software THERM. Este módulo fue construido en el laboratorio de estudios de la madera de la Universidad Laval en Quebec, Canadá dentro del marco del "Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois" (Desarrollo de nuevos materiales de alta inercia térmica a base de madera) del estudiante de doctorado Damien Mathis, bajo la tutela del director de postgrado de Universidad Laval, Pierre Blanchet.

Construcción de piso del cubículo de prueba



Construcción de muros

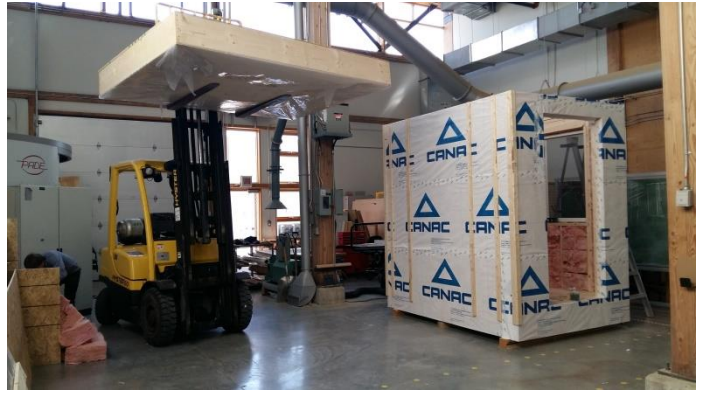






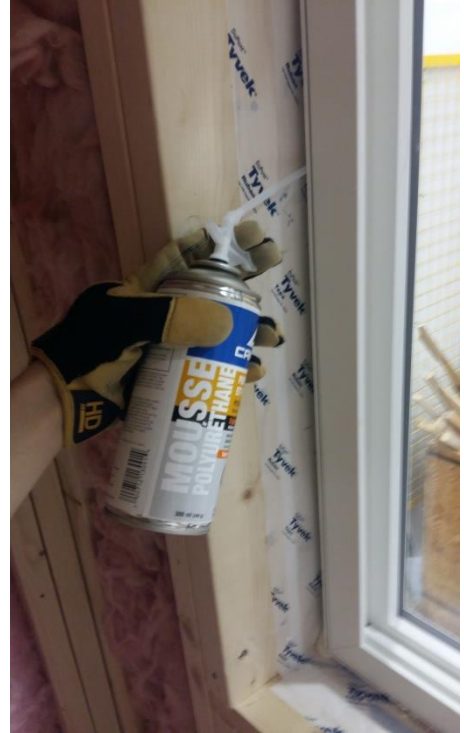
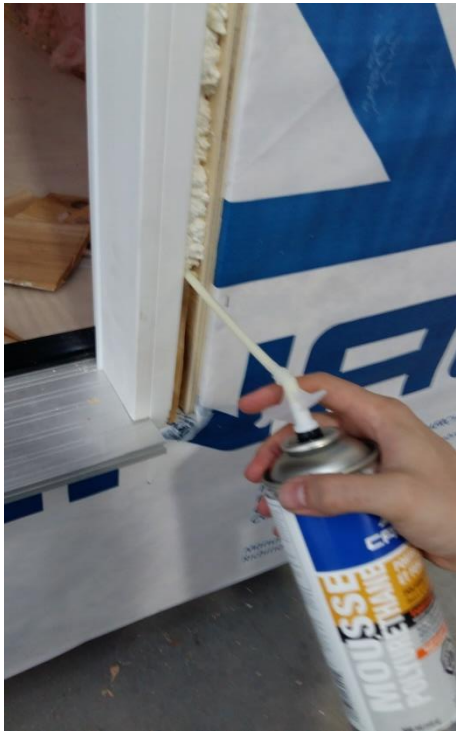
Construcción techumbre (plana)





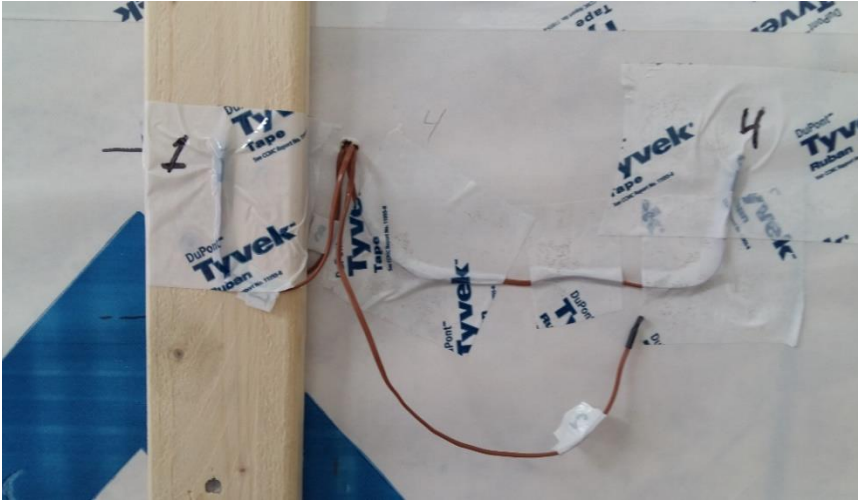
Puerta y ventana



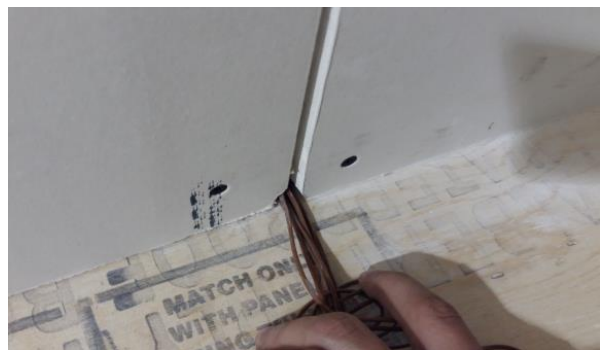
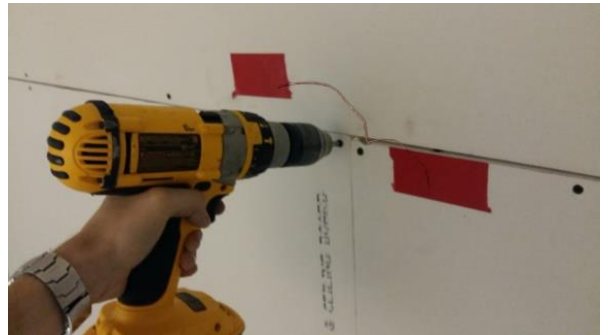


Termocuplas





Interior

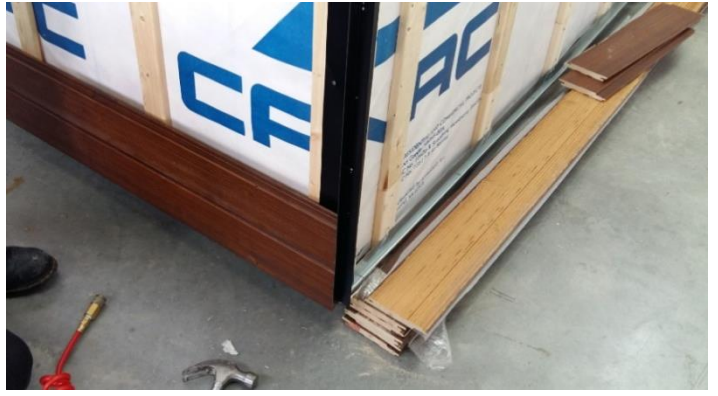




Exterior













ANEXO 3




Análisis tipológico de establecimientos educacionales en la zona Austral de Chile




A continuación se realizará un análisis tipológico de diferentes establecimientos educacionales emplazados en la zona Austral de Chile, mayormente en las ciudades de Coyhaique y Punta Arenas con el fin de identificar aquellos elementos que caracterizan ese tipo de establecimientos. Se hará un enfoque especial en los elementos que se aprecian de manera repetitiva en gran parte de los establecimientos analizados.



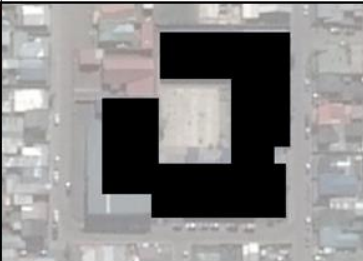
Distribución volumétrica:



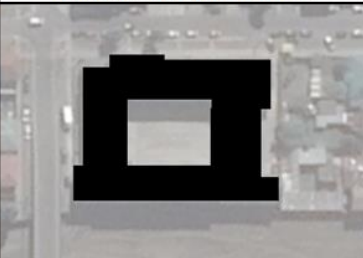
NOMBRE COLEGIO	Región: Magallanes	Incorpora Eficiencia energética: Sí	
Patagonia	Punta Arenas	IMAGEN SATELITAL	DISTRIBUCION VOLUMETRICA
			

NOMBRE COLEGIO	Región: Aysen	Incorpora Eficiencia energética: Sí	
Lord Cochrane	Cochrane	IMAGEN SATELITAL	DISTRIBUCION VOLUMETRICA
			

NOMBRE LICEO	MAGALLANES	Incorpora Eficiencia energética: Sí	
Hernando de Magallanes	Tierra del fuego	IMAGEN SATELITAL	DISTRIBUCION VOLUMETRICA
			

NOMBRE COLEGIO	Región: Aysen	Incorpora Eficiencia energética: Sí	
Guido Gomez Muñoz	Puerto Cisnes	IMAGEN SATELITAL	DISTRIBUCION VOLUMETRICA
			

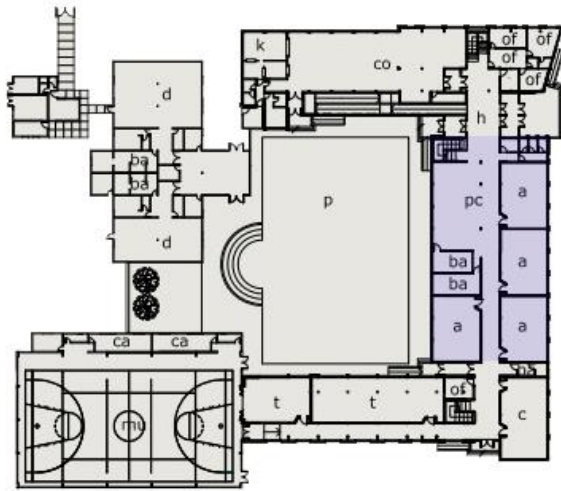
NOMBRE LICEO	Región: Magallanes	Incorpora Eficiencia energética: No	
Juan Bautista	Punta Arenas	IMAGEN SATELITAL	DISTRIBUCION VOLUMETRICA
			

NOMBRE COLEGIO	Región: Magallanes	Incorpora Eficiencia energética: No	
República de Croacia	Punta Arenas	IMAGEN SATELITAL	DISTRIBUCION VOLUMETRICA
			

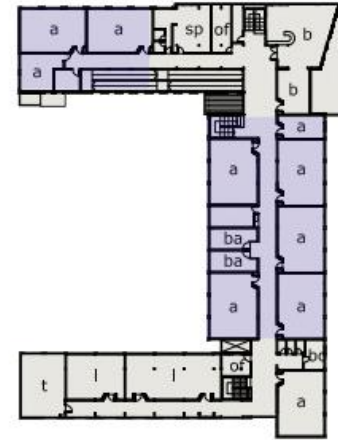
NOMBRE LICEO	Región: Magallanes	Incorpora Eficiencia energética: No	
Luis Alberto Barrera	Punta Arenas	IMAGEN SATELITAL	DISTRIBUCION VOLUMETRICA
			

NOMBRE LICEO	Región: Magallanes	Incorpora Eficiencia energética: No	
José Menendez	Punta Arenas	IMAGEN SATELITAL	DISTRIBUCION VOLUMETRICA
			

Al observar el esquema de organización volumétrica de todos los establecimientos identificados para este análisis se puede apreciar una clara tendencia a generar **volumetrías que se organizan en torno a un centro** expuesto que generalmente es un patio exterior con canchas deportivas. Además en varias de las imágenes exteriores se pueden observar grandes que evidencian la presencia de aulas continuas pero para corroborar eso se debe hacer un estudio más detallado a nivel de planimetría. Al observar varias de las fotografías se puede notar que se tiende a generar grandes pendientes en la zona de la techumbre, esto con el fin de prevenir el acumulamiento de la nieve.

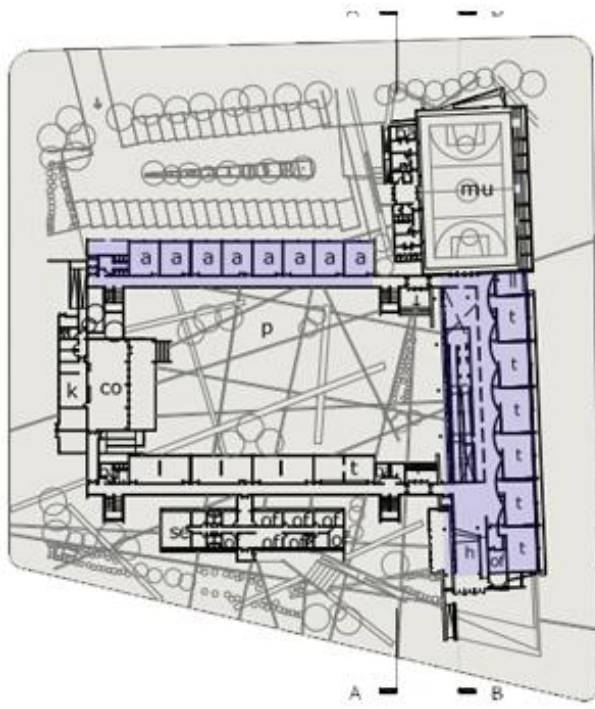


PLANTA NIVEL 1

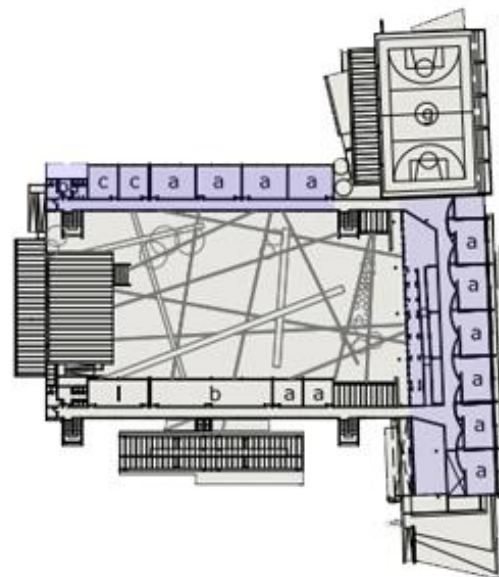


PLANTA NIVEL 2

Plantas Liceo Austral Lord Cochrane, Cochrane, Chile

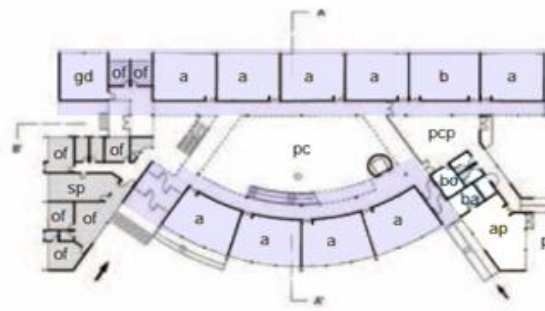


PLANTA NIVEL 1

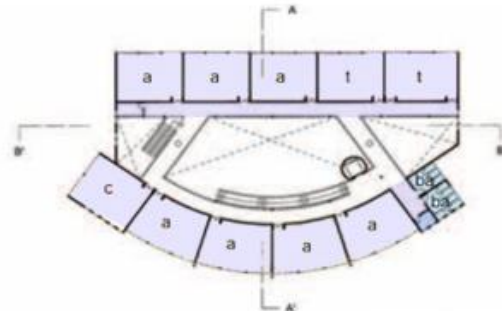


PLANTA NIVEL 2

Plantas Liceo Hernando de Magallanes, Tierra del fuego, Chile

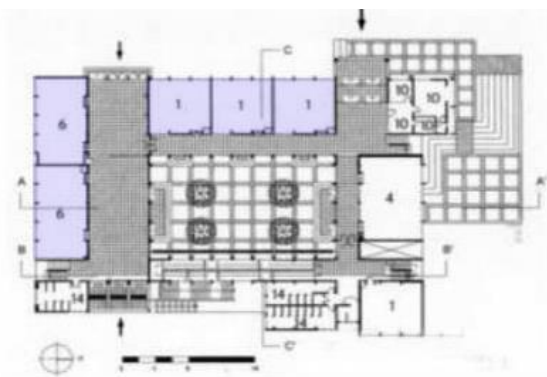


PLANTA NIVEL 1

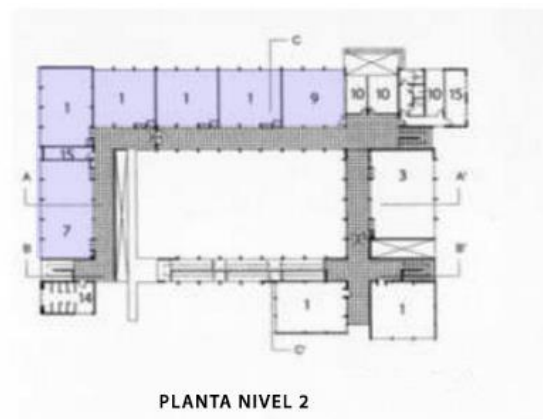


PLANTA NIVEL 2

Plantas Escuela Patagonia, Punta Arenas, Chile



PLANTA NIVEL 1



PLANTA NIVEL 2

Plantas Colegio Guido Gomez Muñoz, Puerto Cisnes, Chile

Al observar los planos de planta de diferentes establecimientos educacionales de la zona Austral de Chile se puede notar que todos los establecimientos poseen **pabellones de aulas alargados y rectangulares** los cuales han sido destacados con color azul, también se puede notar que las aulas poseen grandes ventanales ubicados en el espacio lateral de las aulas ocupando casi en su totalidad una de las caras más largas.

Al observar la distribución de las plantas también se puede notar que todas las aulas tienden a mirar hacia los alrededores del establecimiento mientras que los pasillos poseen ventanales que entablan relaciones visuales directas con el centro que conforman los volúmenes.