**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

# EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MEJORAS SUSTENTABLES DE CONSTRUCCIÓN, CON ENFOQUE EN ENERGÍA, Y CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS SOCIALES

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**CECILIA ANDREA CAMPOS MARÍN**

**PROFESOR GUÍA : FRANCISCO DALL'ORSO LEÓN**

**PROFESOR CORREFERENTE : MARÍA PILAR GARATE CHATEAU**

**SANTIAGO DE CHILE, OCTUBRE 2019**

## AGRADECIMIENTOS

"No temas ir lento, sólo teme no avanzar" se ha quedado grabado en mí y me ha acompañado todos estos años de vida estudiantil.

Agradezco especialmente a mi mamá por aguantarme y simplemente amarme, por enseñarme todo lo que sabe, por nunca presionar, por darme mi espacio, dejarme soñar y expresarme libremente. Agradezco mi tata y a mi papá por ser la familia perfectamente imperfecta, por acompañarme, darme ánimos, siempre estar orgullosos y creer contra viento y marea que lograré todo lo que me he propuesto. Gracias a mi lela por estar preocupada de mi salud y de cuidarme durante los primeros años aquí en Santiago, por abrazarme y contenerme en los peores momentos. Gracias a todos ellos por los enormes sacrificios que han hecho para darme todo lo que necesito para ser feliz en esta vida.

Quisiera agradecer a aquellos que me acompañaron y que por diferentes motivos ya no están Juan Pablo y Yanina, sin ellos no sería la persona que soy, sé que nos entregamos lo mejor de cada uno, agradezco a la amiga que me acompañó por 20 años y que me entregó su confianza y cariño infantil. Gracias a Cariz por ser una figura paterna y complementar todos mis aprendizajes en aquellas habilidades que no tienen que ver con la formación en las aulas. Gracias a Freddy porque, aunque no lo sepa, me dio su carácter fuerte y tiene una hija que ha logrado grandes cosas.

También quisiera agradecer a quienes supieron hacerme sentir en casa durante el primer año de universidad, me llenaron de apañe, risas y cariño, y que además creo, serán personas para toda la vida, Andrés quien tuvo toda la paciencia del mundo para enseñarme todas las cosas que no sabía o no entendía en clases, por acompañarme en silencio y nunca dejarme sola, Pablo, Bárbara y Sofía. A los que se fueron sumando a mi circulo durante el

camino José Ignacio, Carlos, Gabriel, Betania, Bastián, Cui e Ignacio, que también me han distraído, comprendido y escuchado, se han aguantado todas mis odiosidades y aun así aquí están siendo mis amigos.

De manera especial quisiera agradecer a mis amigas Francisca y Andrea, quienes han sido mucho más de lo que creí posible encontrar. Cuando las conocí en mate uno pensé inmediatamente que quería ser su amiga. Son mujeres fuertes, súper jugadas por sus familias, alegres y resilientes, me inspiran a ser mejor, a compartir y ver las cosas buenas de la vida.

Gracias a Nabil y José Francisco, quienes fueron mis primeros ayudados, que con el paso de los años me han escuchado y alegrado los días. Han sido involuntariamente un reconocimiento a mi primer intento de dar clases. Gracias a Fabián por leerme en la distancia y siempre tener palabras de aliento, entregarme todo su cariño y comprensión.

También quisiera agradecer a mis profesores que me han acompañado en la vida universitaria y han dado oportunidades de tomar ayudantías y formarme en las áreas que me gustan, me han dado contactos para empezar a trabajar incluso antes de salir de la universidad y para construir mi memoria de la mejor manera posible. En este sentido debo agradecer especialmente a Monserrat quien me dio las primeras directrices sobre el contexto del tema en el que me quiero dedicar y, por supuesto, a mi profesor guía Francisco por el apoyo, la paciencia y la motivación para trabajar en lo que me gusta.

# RESUMEN EJECUTIVO

A partir de las cada vez más profundas necesidades que tiene la población mundial por tomar un rumbo diferente respecto del cambio climático que está afectando al planeta, es que es necesario replantearse todo tipo de acciones que se tomen desde los gobiernos y las Naciones para hacer todo lo que esté a su alcance por revertir este camino, por ello es que se plantea la pregunta de si a Chile le conviene invertir en mejorar los estándares de eficiencia energética y térmica con los que actualmente se construyen las viviendas sociales.

Para lograr vislumbrar esto es que se hace una evaluación económica de algunas medidas de eficiencia energética y térmica que afectan principalmente la envolvente de una vivienda promedio en Chile. Debido a que en específico el cambio climático, como se ha dicho actualmente alrededor del mundo, afecta principalmente a los más pobres, es que el foco en que se concentra este estudio es en las viviendas sociales, allí es donde más necesidades de llegar al confort térmico enfrenta la población, del mismo modo es el sector de la población que está expuesto a las más bajas calidades en vivienda y en sistemas de calefacción. Al mismo tiempo, este sector es el que más recurre a los beneficios del Estado para subsistir.

Para determinar las medidas a aplicar se realiza un estudio del contexto climático, socio económico chileno, además de la caracterización del desempeño energético de las viviendas. Se trabaja con las zonas centro sur, donde se identifican ciertos factores de mayor necesidad térmica y se estudian las medidas de eficiencia térmica y energéticas para aplicar en cuatro elementos de la envolvente de tres viviendas sociales tipo. Luego se propone una situación base, llamada línea base, la cual es comparada con la situación esperada que se obtendría de aplicar estas medidas a las tres viviendas tipo. Se obtienen las demandas

energéticas de cada una, luego se obtienen los contaminantes emitidos por tipo de energético componente de la demanda examinada. A través de la evaluación económica de estos contaminantes emitidos se puede hacer una evaluación económica del proyecto completo, puesto que se aplican precios sociales a dichos contaminantes. En la evaluación económica del proyecto completo se compararán ahorros por concepto de contaminantes consecuencia de la demanda energética por falta de eficiencia térmica y energética, respecto del costo de las medidas de eficiencia. Además, se intentará aludir aspectos que normalmente quedan fuera de las evaluaciones económicas de este estilo y que tienen real impacto en el funcionamiento cotidiano de una vivienda, por ejemplo, la generación de enfermedades producto de un mal desempeño energético y térmico de una vivienda.

Se espera poder hacer una invitación a tocar estos temas con mayor frecuencia entre las grandes necesidades y posibles acciones frente al compromiso contra el cambio climático en Chile y el mundo.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS ..... 2

1. INTRODUCCIÓN ..... 13
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN ..... 15
3. OBJETIVOS ..... 19
   3.1 Objetivo General ..... 19
   3.2 Objetivos Específicos ..... 19
4. MARCO TEÓRICO ..... 20
   4.1 Antecedentes generales de cambio climático y problemáticas de eficiencia energética ..... 20
   4.2 Antecedentes internacionales de gestión sustentable de energía en el sector construcción ..... 22
      4.2.1 Soluciones propuestas a nivel internacional ..... 25
   4.3 Antecedentes nacionales del manejo sustentable de energía en Chile ..... 28
      4.3.1 Normativa y estándares utilizados para la gestión sustentable de energía a nivel nacional ..... 30
      4.3.2 Reglamentación térmica aplicada actualmente a proyectos habitacionales 32
         4.3.2.1 Confort térmico en viviendas sociales ..... 39
      4.3.3 Evaluación social de proyectos con eficiencia energética ..... 41
5. METODOLOGÍA ..... 45
   5.1 Recopilación de la información ..... 45
      5.1.1 Contexto nacional e internacional ..... 45
      5.1.2 Base de datos de viviendas CEV ..... 48
      5.1.3 Contaminación del aire, enfermedades relacionadas y costos sociales ..... 49
   5.2 Selección de regiones ..... 51

5.2.1 Factores climatológicos y socioeconómicos ..... 51

5.3 Tipología de las viviendas estudiadas ..... 54

5.3.1 Valores materiales utilizados ..... 55

5.3.2 Valores materiales propuestos ..... 55

5.4 Evaluación económica y caracterización del proyecto habitacional ..... 56

5.4.1 Cálculo de la línea base ..... 56

5.4.2 Identificación de las mejoras y situación esperada ..... 59

5.4.3 Ahorros y precios sociales ..... 60

5.4.4 Flujo de caja ..... 61

6. RESULTADOS ..... 62

6.1 Análisis de los Contextos de Estándares Energéticos ..... 62

6.1.1 Calificación Energética de Vivienda (CEV) ..... 62

6.2 Selección de regiones ..... 67

6.3 Caracterización de las viviendas evaluadas y demanda energética ..... 70

6.3.1 Línea base: demanda energética ..... 70

6.4 Situación esperada ..... 72

6.4.1 Medidas de reducción de demanda energética ..... 72

6.4.2 Caracterización económica de las medidas ..... 74

6.4.2.1 Medida 1 ..... 74

6.4.2.2 Medida 2 ..... 74

6.4.2.3 Medida 3 ..... 75

6.4.2.4 Medida 4 ..... 76

6.4.3 Reducción de la demanda energética ..... 76

6.5 Ahorro económico ..... 77
6.6 Flujo de caja ..... 78
6.7 Consecuencias no cuantificables ..... 80
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 82
8. REFERENCIAS ..... 86
9. ANEXOS ..... 91
9.1 Anexo A: Tablas ..... 91

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1**: Trasnmitancias y resistencias térmicas totales exigidas por la reglamentación térmica vigente. ..... 34

**Tabla 2**: Muestra la superficie máxima de ventanas que podrá contemplar un proyecto de arquitectura, respecto de la superficie, zona y el tipo de vidriado..... 35

**Tabla 3**: Extracto de la Tabla 1 "Resumen de políticas de eficiencia energética en los países miembros de IEA" en el sector "Aplicaciones y Edificaciones". ..... 45

**Tabla 4**: Comparación entre la norma térmica chilena y española para vidrios. ..... 47

**Tabla 5**: Comparación entre la norma térmica chilena y española para la envolvente de las viviendas. ..... 48

**Tabla 6**: Mortalidad y morbilidad asociada a la exposición a material particulado fino (MP2,5) para el año 2017. ..... 50

**Tabla 7**: Extracto de la planilla resumen para la selección de las regiones por factores socioeconómicos. ..... 52

**Tabla 8**: Extracto de la planilla resumen para la selección de las regiones por factores climatológicos. ..... 53

**Tabla 9**: Caracterización de las viviendas tipo utilizadas en el análisis energético..... 54

**Tabla 10**: Consumo anual de energéticos (combustibles y electricidad) en calefacción para un hogar promedio. ..... 58

**Tabla 11**: Resumen de precios sociales para contaminantes emitidos. ..... 60

**Tabla 12**: Cantidad de viviendas sociales calificadas en el país por letra. ..... 65

**Tabla 13**: Diferencias de temperaturas promedio extremas para las regiones de la zona sur del país. ..... 67

**Tabla 14**: Ratio de densidad, población total de la región sobre cantidad de viviendas en la región. ..... 68

**Tabla 15**: Número de defunciones por enfermedades relacionadas con contaminación del aire. ..... 69

**Tabla 16**: Resumen de la suma de puntajes para selección de región. ..... 69

**Tabla 17**: Resumen de demandas energéticas de una vivienda promedio en línea base para cada tipo de vivienda. ..... 71

**Tabla 18**: Resumen de Factores de Emisión por contaminantes para cada tipo de energético utilizado. ..... 71

**Tabla 19**: Resumen de las medidas de eficiencia energética comparadas entre documentos. ..... 73

**Tabla 20**: Resumen de demandas energéticas de una vivienda promedio en la situación esperada para cada tipo de vivienda. ..... 77

**Tabla 21**: Resumen de la diferencia entre línea base y situación esperada para cada contaminante al año por tipo de vivienda. ..... 78

**Tabla 22**: Descomposición de los [kg] de contaminante por año para cada energético componente de la demanda energética de una Vivienda Tipo 1. ..... 91

**Tabla 23**: Descomposición de los [kg] de contaminante por año para cada energético componente de la demanda energética de una Vivienda Tipo 2. ..... 91

**Tabla 24**: Descomposición de los [kg] de contaminante por año para cada energético componente de la demanda energética de una Vivienda Tipo 3. ..... 92

**Tabla 25**: Flujo de caja para las tres viviendas tipo con aplicación de medidas de eficiencia térmica. ..... 93

**Tabla 26**: Flujo de caja para las tres viviendas tipo con aplicación de las medidas de eficiencia térmica y subsidio del Estado..... 94

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1**: Estimaciones de ingeniería de eficiencia de precios para evaluaciones de rondas de Estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS) en Estados Unidos. ..... 26

**Figura 2**: Requerimientos máximos de demanda en calefacción para vivienda por zona climática en Chile. ..... 37

**Figura 3**: Requerimientos máximos de demanda en enfriamiento para vivienda aislada por zona climática en Chile..... 38

**Figura 4**: Valores propuestos de transmitancia térmica "U" [W/m2K] y resistencia térmica (R100), para actualización de la reglamentación térmica, Art. 4.1.10 de la OGUC. ..... 39

**Figura 5**: Emisiones de impuesto verdes según contaminante local y combustible para el año 2017. ..... 44

**Figura 6**: Recaudación de impuesto verdes según contaminante local y combustible para el año 2017. ..... 44

**Figura 7**: Conducción unidimensional a través de paredes planas dispuestas en serie. ..... 57

**Figura 8**: Total de calificaciones hechas por región para las 15 regiones del país..... 62

**Figura 9**: Compilado del número de calificaciones por letra para las regiones de la zona norte. ..... 63

**Figura 10**: Compilado de número de calificaciones por letra para las regiones de la zona centro. ..... 64

**Figura 11**: Compilado de número de calificaciones por letra para las regiones de la zona sur. ..... 65

**Figura 12**: Calificaciones a nivel país para cada letra. ..... 66

# 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el mundo se ha dado cuenta de que el cambio climático es un hecho y que se acaba el tiempo de tomar parte en la solución a este problema, que más que al planeta, afecta directamente a la humanidad ya que esta corre el riesgo de perturbar irreversiblemente su subsistencia. En esta línea, las organizaciones mundiales como la ONU han determinado que el camino para hacer frente a esta y otras problemáticas es la sustentabilidad. A raíz de esto nacen los 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS), dentro de los cuales se puede destacar el Objetivo 7 Energía Asequible y No Contaminante y el Objetivo 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles. El objetivo 7 fija como una de sus metas "De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética" (Naciones Unidas, s.f.), luego el objetivo 11 destaca que

Desde 2016, el 90% de los habitantes de las ciudades respiraba aire que no cumplía las normas de seguridad establecidas por la Organización Mundial de la Salud, lo que provocó un total de 4,2 millones de muertes debido a la contaminación atmosférica. Más de la mitad de la población urbana mundial estuvo expuesta a niveles de contaminación del aire al menos 2,5 veces más altos que el estándar de seguridad (Naciones Unidas, s.f.).

El país actualmente es hogar de la COP25, por lo que trae a la palestra todas las temáticas medioambientales y sociales que se deben enfatizar en las políticas públicas y comportamientos privados. De esta manera Chile, que ha participado de otros eventos de las Naciones Unidas por ya varios años, ha creado divisiones gubernamentales exclusivas para el aplacamiento de las actividades que se relacionan con la producción del cambio climático como lo son la Agencia de Cambio Climático y los Ministerios de Medio Ambiente y Energía.

Se puede destacar que una de las grandes áreas productivas emisoras de gases efecto invernadero a nivel mundial es la de edificación y construcción.

La combustión directa de combustibles fósiles satisface el 36% de la demanda de energía en el sector de la construcción, lo que resulta en emisiones directas de CO2 de más de 2.9 $Gt$. Sin embargo, las emisiones directas representan solo el 35% de las emisiones totales del sector, mientras que la generación de electricidad y calor utilizada en los edificios generó más de 5,5 $Gt$ de emisiones de CO2 en 2016 (International Energy Agency OECD, 2018).

Esto da una gran oportunidad de integrar la eficiencia energética con iniciativas como el programa de Calificación Energética de Viviendas, la guía de Diseño para la Eficiencia Energética de Viviendas Sociales y Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile.

# 2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El contexto nacional e internacional ha puesto en tabla el gran problema del siglo XXI. Así lo muestran los diversos documentos que respaldan la generación de nuevas normativas y herramientas como reacción ante el cambio climático. Un planeta en riesgo requiere de la intervención y compromiso de todos sus habitantes.

Dado el imperativo mundial por reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GHG) y el consumo de combustibles fósiles, las expectativas están puestas en los gobiernos para innovar y desarrollar políticas efectivas para el clima urbano, energía y desafíos de resiliencia (Bulkeley, 2015).

Por ello, es que se busca incorporar la sustentabilidad en todas las actividades humanas que tienen un impacto en el entorno. Dentro de estas actividades pueden considerarse incluso las más cotidianas, como conectar a la corriente un aparato eléctrico, encender un quemador en la cocina o calefaccionar un lugar. Todo esto lleva a pensar que un aspecto común de estas actividades es que todas se desarrollan dentro de un lugar físico, el cual puede ser una oficina, colegios, el hogar, hospitales o un edificio público, siendo estos lugares donde se desarrolla la vida mayoritariamente. Es por esto que generar estándares y normativas que guíen la construcción de todo tipo de edificaciones de la manera más sustentable se vuelve fundamental, además se debe reconocer la importancia que tiene el estudio del uso de la energía y las consecuencias de ello.

El sector construcción continúa siendo el mayor receptor de las inversiones en eficiencia energética, componiendo más de la mitad del total y creciendo en un 12% en el año 2016. Mejora en revestimiento de edificios, incluyendo aislamiento, representaron casi la mitad de la inversión en eficiencia en el sector construcción, mientras que la otra mitad se

separó equivalentemente entre calefacción, ventilación y enfriamiento (HVAC), iluminación y aplicaciones (International Energy Agency OECD, 2018).

Por consiguiente, gran parte de países desarrollados y en vías de desarrollo han tomado cartas en el asunto y han decidido establecer políticas y normativas para la utilización de la energía de manera eficiente en todos los usos y formas para mitigar así las desastrosas consecuencias que se han visto hoy en día, “La coherencia en la política es esencial. Cuando hay elementos de políticas económicas y fiscales desalineadas con los objetivos del cambio global, incluso la política mejor diseñada para medir la reducción de mediciones de $CO_2$ pueden ser inefectivas” (OECD - IEA - NEA - ITF, 2015).

En un contexto nacional, el tema ha sido abordado con mucho ahínco. Una de las primeras medidas tomadas fue la creación de la Estrategia Nacional de Energía, la cual establece un Plan de Acción de Eficiencia Energética, como se destaca en la Estrategia de Construcción Sustentable (MINVU - MMA- MINENERGÍA - MOP, 2013) la meta es alcanzar una reducción del 12% en la demanda energética para el 2020, lo cual debe ir muy de la mano con que los usuarios finales (toda la comunidad) estén consciente de que a través de elementos de infraestructura como la calefacción de los hogares u oficinas, el aislamiento o la forma en que se utilizan los artefactos de enfriamiento, se pueden lograr en gran medida las diversas metas establecidas. Una vez aceptado el Acuerdo de Paris en la COP21, todos los trabajos por establecer métodos que hicieran más efectivo el compromiso de Chile en pertenecer a la red de países que está propiciando el cambio para mejorar las condiciones ambientales, se han vuelto tema central en todo tipo de instituciones estatales.

Debido a esto mismo, se vuelve imprescindible saber la calidad y la eficiencia con la que se trabaja en el sector construcción.

En cuanto a la calidad de las viviendas en Chile, si este factor se mira aisladamente "La calidad en la construcción de viviendas a nivel nacional e internacional ha adquirido gran relevancia debido al impacto que las fallas de calidad del inmueble tienen sobre el usuario final" (Ramírez & Serpell, 2011), sin ir más lejos, "En Chile, según estudios realizados por la Pontificia Universidad Católica, se estiman estos costos entre 15 y 25% del costo de cada vivienda" (Ramírez & Serpell, 2011).

Ahora si este mismo concepto es llevado al contexto energético se puede apreciar aún más como afecta en la calidad de vida de las personas el contar con normativas de mejor calidad y una mejor fiscalización al respecto. Por ejemplo, las enfermedades relacionadas con la combustión de combustibles fósiles altamente contaminantes son principalmente con el sistema respiratorio y cardiovascular, causando padecimientos graves como Neumonía, accidentes cardiovasculares, cardiopatía isquémica, neumopatía obstructiva crónica, cáncer de pulmón y otras consecuencias sanitarias. Es más, la OMS también destaca que:

Unos 3000 millones de personas siguen cocinando y calentando sus hogares con combustibles sólidos (es decir, madera, residuos agrícolas, carbón vegetal y mineral y excrementos de animales), en fuegos abiertos y en cocinas con fugas. En su mayoría son personas pobres que viven en países de ingresos bajos y medianos (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Esto da paso a tomar en consideración puntos tales como "En viviendas mal ventiladas el humo puede producir concentraciones de partículas finas 100 veces superiores a las aceptables. La exposición afecta particularmente a las mujeres y los niños, que pasan la mayor parte del tiempo cerca del hogar" (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Al analizar toda esta información, inevitablemente se llega a la conclusión que se necesita mejorar los estándares de calidad de las viviendas sobre todo al nivel más vulnerable

en la escala socioeconómica como lo son las viviendas sociales, para que estas alcancen el confort térmico, de esta manera se necesitaría utilizar menos combustibles para calefaccionar o refrigerar el hogar los cuales podrían resultar en emisiones de contaminantes.

# 3. OBJETIVOS

## 3.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad económica de mejorar los estándares de construcción de las viviendas sociales en Chile, a través de un análisis de costos por flujo de caja, para alcanzar el confort térmico en las viviendas mejorando la calidad de vida de la población.

## 3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los estándares actualmente utilizados para la construcción de las viviendas sociales en Chile.
- Hacer un catastro de las consecuencias de la baja eficiencia energética de las viviendas que afectan la calidad de vida de las personas.
- Determinar el desempeño energético de una vivienda social representativa del país.
- Definir medidas de eficiencia energética y térmica para los diferentes elementos de la envolvente de una vivienda.
- Identificar los costos sociales que se verían comprometidos en la mejora a las viviendas.
- Evaluar económicamente la aplicación de medidas que permitan alcanzar el confort térmico en las viviendas sociales estudiadas, incluyendo costos sociales

# 4. MARCO TEÓRICO

## 4.1 Antecedentes generales de cambio climático y problemáticas de eficiencia energética

El cambio climático se yergue como una problemática de honda relevancia y suma complejidad por su contexto global; así, en el comienzo del siglo XXI, la comunidad científica y la académica lo contemplan quizá como la mayor eventualidad que ha enfrentado la raza humana (Ponce-Cruz & Cantú-Martínez, 2012).

Se debe reconocer que el impacto que tiene el cambio climático en el mundo, afecta la dirección de todas las decisiones y lineamientos que siga cualquier país. Pero lo primero es entender que significa el cambio climático, científica y políticamente hablando:

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), en su artículo 1, define el cambio climático como un cabio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables (Díaz, 2012). Miller (2007) indica que otros factores que afectan al cambio climático son la contaminación del aire, los cambios en el hielo polar, el contenido de vapor de agua y la cantidad de cobertura de nubes y la cantidad de energía solar que alcanza la Tierra.

Lo anterior indica que principalmente los cambios de temperatura en el planeta traen consecuencias inevitables a causa de la intervención humana, estas consecuencias se pueden materializar en el consumo excesivo de electricidad y de otras formas de energía para mantener el nivel de vida que se lleva. Viene de la mano, la exigencia excesiva que se hace a las industrias de producir todo y más de lo que realmente se utiliza, de ahí que se plantee el nuevo paradigma de tener un consumo eficiente y sustentable (en todo tipo de productos y servicios, incluso energéticos y térmicos). “Determinar la meta de reducción de

contaminación, con la consecuente disminución de gases de efecto invernadero, requiere mecanismos de política, finanzas públicas, inversiones y transferencias de tecnología tanto a nivel internacional como local" (Herrán, 2012). Sin el apoyo de las entidades regulatorias gubernamentales, cumplir con esta necesidad mundial se haría mucho más difíciles, ya que las inversiones en eficiencia energética requieren primeramente de un apoyo e impulso de dichas entidades, promoviendo así el cambio en las empresas privadas. "Entender dónde los gobiernos pueden hacer más para estimular la inversión necesaria y para guiar más rápidamente la transformación del sector energético es importante, tanto para el cambio climático como para alcanzar los objetivos sostenibles" (International Energy Agency OECD, 2018).

En 2016, el 31,5% del consumo mundial de energía estaba regulado por estándares de eficiencia, lo cual representa un alza del 11% desde el 2000. La inversión en eficiencia energética está creciendo mucho más rápido que en otros sectores de energía: en 2016, alcanzó aproximadamente $230 billones de dólares, un aumento del 9% respecto del año anterior, y equivalente al 15% del total de la inversión en el sector energía que fue de cerca de 1,7 trillones de dólares (International Energy Agency OECD, 2018).

Al declinar la inversión en petróleo y gas, particularmente, el sector de electricidad ha sido el más favorecido, por primera vez, por la inversión mundial en 2016. Como indica la Agencia Internacional de Energía, la caída de inversión en la generación de energías hizo posible bajar los costos de las energías renovables, notablemente de los paneles fotovoltaicos.

De cualquier manera, menores costos de capital implican que las cifras de inversión total aumenten en cuanto a las energías renovables. Por ejemplo, la adición en capacidad solar fotovoltaica alcanzó más de 74 gigawatts en 2016, lo que implicó un crecimiento del 50% respecto del año anterior (International Energy Agency OECD, 2018).

Se debe tener una correcta gestión de toda la capacidad de inversión que está recibiendo el sector de eficiencia energética, debido a que uno de los tres más grandes generadores de gases efecto invernadero es el sector construcción, se puede aplicar una gestión sustentable de estos nuevos recursos a su haber.

## 4.2 Antecedentes internacionales de gestión sustentable de energía en el sector construcción

Hoy en día cerca de dos tercios de la energía consumida por equipamientos de edificios residenciales no son cubiertos por estándares de eficiencia energética. Similarmente, cerca de la mitad de las áreas de construcción para el periodo al 2050 (cerca de cien mil millones de metros cuadrados), están en países que normalmente no tienen políticas relacionadas con la energía en la construcción (International Energy Agency OECD, 2018).

Para contextualizar estos antecedentes internacionales de gestión sustentable se presentan tres casos internacionales de países miembros de la OCDE, todos con diferentes contextos ambientales y sociales.

En Inglaterra y Gales, existe una guía para la aplicación de los requerimientos de eficiencia energética en sus edificios. La guía ayuda a revisar dos instrumentos: Energy Certificates Performance ECP (Certificado de Desempeño Energético) y Display Energy Certificates DEC (Presentación de Certificados Energéticos) que son entregados por Autoridades de Pesos y Mediciones designados por el Parlamento Británico.

Es el deber de toda Autoridad local de Pesos y Mediciones (LWMA) hacer que se cumpla en su área:

- Tener a disposición Certificados de Desempeño Energético

- La adecuada puesta en marcha y obtención de Certificados de Desempeño Energético
- La presentación de Certificados de Desempeño Energético
- La inclusión de avisos de indicadores de desempeño energético
- Velar por el cumplimiento de los requisitos relativos a las inspecciones de aire acondicionado
- Asegurar que los documento requeridos sean producidos dentro de los siete días

Las Autoridades Locales de Pesos y Medidas tienen a su disposición una serie de datos, desde la educación y el estímulo, hasta la emisión de avisos de penalización. Es deber de ellos determinar el curso de acción que es apropiado para las circunstancias (Department of Communities and Local Government, 2016).

En Dinamarca se realizó un estudio para el diseño de casas con bajas emisiones de $CO_2$, acompañado de una influencia legislativa.

Desde 1961 los códigos de construcción daneses han pasado por varias etapas de especificación de las demandas de requisitos de energía en los edificios. El desarrollo legislativo se puede dividir en los siguientes tipos de regulación energética (www.ebst.dk/bygningsreglementer/0/91/0, 2007):

- Aislamiento exterior del edificio
- Restricción del área de la ventana
- Cálculo del requerimiento de energía con relación a una estructura energética (Knudstrup, Hansen, & Brunsgaard, 2009).

El desarrollo legislativo de estos códigos de construcción energéticos ha tenido impacto en las expresiones arquitecturales.

Los marcos de energía en 2006 y en los nuevos códigos de construcción 2008 para edificios residenciales se dividen en dos niveles diferentes de consumo de energía: un marco de energía de clase 1 de baja energía de 35 kWh/m$^2$ + 1100/A por año y marco de energía de clase dos de baja energía de 50 kWh/m$^2$ +1600/A por año (Knudstrup, Hansen, & Brunsgaard, 2009).

En los Países Bajos se realizó un análisis respecto del impacto de la eficiencia energética en los edificios, incluyendo la influencia de las políticas que se determinan “En la mayoría de los países europeos, los requerimientos energéticos para nuevos edificios están incluidos en códigos nacionales de construcción” (Noailly, 2012). Este estudio considera el análisis y comparación de las políticas y prácticas energéticamente eficientes de otros países de Europa.

Las normas de aislamiento térmico se basan en un "enfoque unitario" que divide el armazón del edificio en sus componentes individuales (por ejemplo, paredes, ventanas, techos, pisos) y establece un valor máximo de transmisión de calor, el denominado "valor U", para cada uno de estos componentes por separado (Noailly, 2012).

Así mismo, según Noailly, para bajos valores de U se aplican estándares más rigurosos. También realizó un cálculo sobre un valor U general:

$$U_{general} = U_{paredes} + U_{pisos} + U_{techos} + 0{,}2 * U_{ventanas}$$

Como una medida alternativa a los valores U, también se usó data de la demanda energética de una casa modelo construida bajo la regulación tradicional. Una casa modelo

tiene la misma geometría en todos los países y es armada bajo las regulaciones de construcción tradicional de cada país (Noailly, 2012).

Cada uno de estos estudios sirven de ejemplo para la construcción formal de estándares que apunten todos a un mismo objetivo, es por esto que los organismos internacionales, con el transcurso de los años y más conscientes de las consecuencias e impactos que tienen las construcciones y el consumo energético de las mismas, han desarrollado recomendaciones, soluciones y estándares a los cuales todos los países interesados pueden adscribirse y comprometerse.

### 4.2.1 Soluciones propuestas a nivel internacional

La Agencia Internacional de Energía, cuenta con tres escenarios para identificar el tratamiento a futuro de la eficiencia energética en el contexto de cambio climático. El primero de ellos se presenta como la implementación de Nuevas Políticas, el cual hace referencia a como se enfrentaría el problema a nivel mundial si sólo se guiaran con nuevas políticas más estrictas para las áreas de mayor impacto en la generación de gases de efecto invernadero: generación de energía, sector construcción y sector transporte. Por otro lado, el segundo escenario, llamado 66% 2°C, presenta un esquema de transición propiciada por las bajas emisiones de $CO_2$. Finalmente, el tercer escenario, se refiere al Desarrollo Sustentable el cual representa un intermedio entre los dos presentados anteriormente.

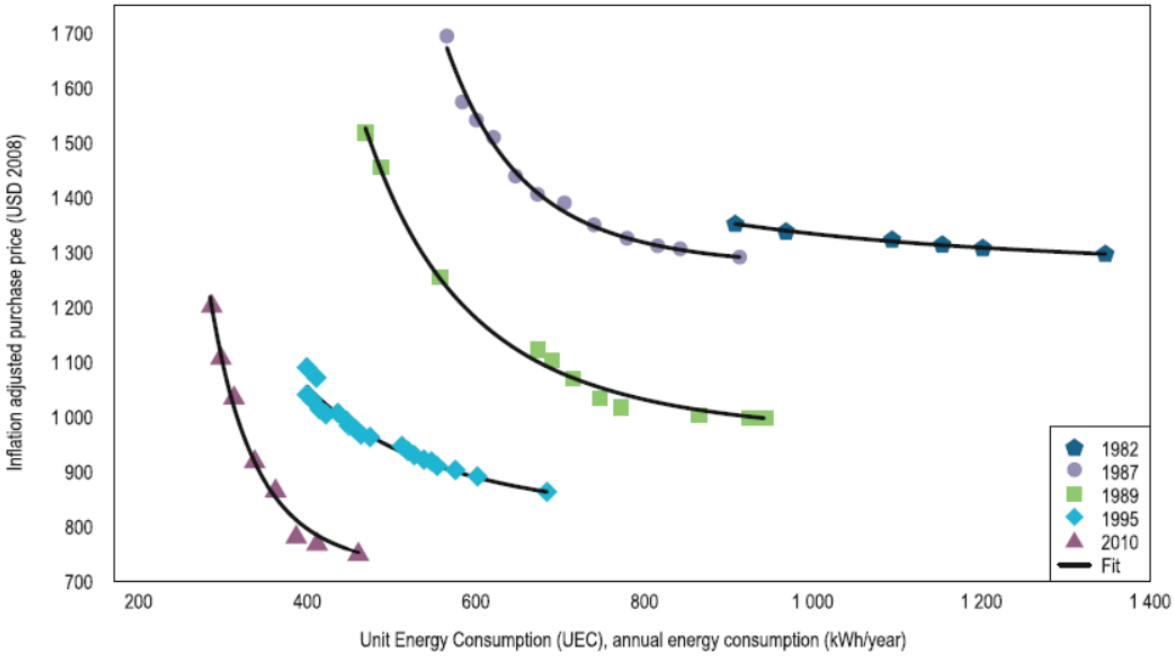


**Figura 1**: *Estimaciones de ingeniería de eficiencia de precios para evaluaciones de rondas de Estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS) en Estados Unidos.*

*Fuente: A retrospective investigation of energy efficiency standards: policies may have accelerated long-term declines in appliance costs. (Van Buskirk, Kantner , Gerke, & Chu, 2014).*

Ramírez & Serpell (2011), realizan un resumen en una tabla comparativa sobre los modelos de certificación de calidad en las viviendas a nivel internacional basado en datos obtenidos en 2002:

- Francia: tiene un modelo de certificación que incluye calidad técnica de la obra, habitabilidad, medioambientales y eficiencia energética, para cumplir el objetivo de promover la calidad de las viviendas y la sostenibilidad.
- Reino Unido: tiene un modelo de certificación que incluye sólo la calidad técnica de la obra, pero busca cumplir objetivos como ofrecer una garantía al

consumidor – confianza y tranquilidad, y elevar estándares de calidad de las viviendas.

- España: tiene tres modelos de certificación los cuales consideran los aspectos de calidad técnica de la obra, medioambientales, eficiencia energética, administrativos y contractuales y un informe jurídico de respaldo. Para esto busca concretar el objetivo de ofrecer una garantía al consumidor – confianza y tranquilidad.
- Malasia: en su modelo de certificación busca calidad técnica de la obra y un informe jurídico de respaldo para ello se propone el objetivo de asegurar el cumplimiento de estándares.
- Nueva Zelandia: en su modelo de certificación supone aspectos como la calidad técnica de la obra y eficiencia energética, cumpliendo con el objetivo de asegurar el cumplimiento de estándares.
- Canadá: considera en su modelo de certificación la calidad técnica de la obra y se propone objetivos como ofrecer una garantía al consumidor – confianza y tranquilidad, mejorar la calidad de las viviendas y la protección al consumidor.
- Estados Unidos: presenta dos modelos de certificación los cuales consideran la calidad técnica de la obra, la certificación de materiales y certificación de proveedores, para ello los objetivos que se contemplan son mejorar la calidad de las viviendas, satisfacción de los clientes, protección al consumidor y al constructor.

- México: considera los aspectos como calidad técnica de la obra y habitabilidad, para ello se propone los objetivos de mejorar la calidad de las viviendas y asegurar calidad de los procesos constructivos.
- Brasil: en su modelo incluye la calidad técnica de la obra, bajo la cual requiere cumplir el objetivo de mejorar la calidad de las viviendas.
- Chile: cuenta con cuatro modelos de certificación con los cuales considera aspectos como calidad técnica de la obra, habitabilidad, medioambientales y eficiencia energética. Con ellos cumple los objetivos de ofrecer una garantía al consumidor – confianza y tranquilidad, mejorar control de gestión de calidad, disminuir el consumo de energías, reducir costos de mantención y mejorar calidad de las viviendas.

En la mayoría de estos países la implementación de estándares y políticas que aseguren estas metas presentadas anteriormente, se ha vuelto un proceso lento, ya que depende de las autoridades gubernamentales las cuales tienen una amplia gama de preocupaciones, dentro de las cuales (hasta los últimos dos años) no se ha considerado el tema energético. "En Chile, en los últimos años se ha impulsado fuertemente la ejecución de programas y planes orientados a garantizar un mejor nivel de calidad y productividad, que además mejoren los procesos constructivos y de diseño" (Ramírez & Serpell, 2011).

### 4.3 Antecedentes nacionales del manejo sustentable de energía en Chile

La región Metropolitana de Santiago con más de seis millones de habitantes es el centro político, administrativo y económico del país. Debido a la concentración de poder económico y sistemas funcionales, en la actualidad existe una alta demanda de recursos que

seguirá aumentando en el futuro. Pero eso, Santiago requiere, de forma especial, la introducción de medidas de adaptación al cambio climático (Krellenberg et al., 2012).

Estas medidas de adaptación al cambio climático deben descender e implementarse gracias al compromiso de las autoridades designadas para esto. La mejor manera de ser proactivos en esta temática es la creación y puesta en marcha de estándares respecto de una construcción sustentable, así como de otros aspectos que hasta ahora se han manejado como lo es la diversificación de la matriz energética y la búsqueda de un sistema de transporte que tenga el menor impacto posible.

El sector energía es uno de los mencionados con más frecuencia en relación al cambio climático. Esto se debe a que el sector energía es uno de los principales generadores de GEI con su consecuente contribución al cambio climático, pero también a que dicho sector se ve afectado por este fenómeno. Para la RMS se espera que el riesgo de una falla en el sistema de electricidad aumente en el futuro (Krellengber et al. 2012).

Como se ha mencionado anteriormente por la Agencia Internacional de Energía, uno de los tres sectores con mayor impacto energético tiene a nivel mundial es la construcción, así como el mayor sector al cual se ha invertido en eficiencia energética "Por ende, la reducción del consumo energético en edificios juega un papel clave y conlleva la introducción de nuevas normas y leyes sobre el consumo máximo de energía en edificios y construcciones" (Krellengber et al. 2012). Esto puede relacionarse con lo que se ha dicho anteriormente, en edificaciones es donde se pasa la mayor parte del tiempo, estas deben tener ciertas características al momento de construirse para entregar confort a quienes las habiten y además una vez funcionando tienen un gran impacto en el consumo de energía (sobre todo si al momento de construirlo no se han tomado las medidas correctas para garantiza eficiencia energética).

Como parte del contexto nacional de las medidas tomadas por las entidades gubernamentales se ha dispuesto adherir al programa de etiquetado de eficiencia energética el cual sirve como un primer estándar en esta materia.

De acuerdo a diversos expertos, estudios y recomendaciones internacionales (Recomendaciones APEC – Revisión de Expertos 2009; Informe Comisión Ciudadana Técnico-Parlamentaria; Informe Comisión Asesora Desarrollo Eléctrico; Especialistas Lawrence Berkeley Lab Universidad de California), el etiquetado de eficiencia energética y los estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS por su sigla en inglés), son las políticas más costo-efectivas para mejorar el parque tecnológico disponible en un país y de esta manera avanzar en el desarrollo de un apolítica publica que incremente la eficiencia energética a nivel residencial (Ministerio de Energía, División de Eficiencia Energética, 2017).

Por ejemplo, el uso de aire acondicionado en las viviendas representó aproximadamente el 20% de la demanda energética residencial de 150 países en desarrollo y emergentes (Ministerio de Energía, División de Eficiencia Energética, 2017). Esto se podría solucionar al utilizar una política que implique la creación de una normativa para la implementación optima de un sistema de calefacción (aire acondicionado) central.

### 4.3.1 Normativa y estándares utilizados para la gestión sustentable de energía a nivel nacional

Hoy en día, el esfuerzo del Gobierno por alcanzar las metas propuestas internacionalmente por los acuerdos de Kioto en 2012 y Paris en el 2015, respecto del cambio climático, ha llevado a este a crear distintas divisiones que traten estos temas. Por ejemplo, la creación del Ministerio de Energía y su separación con el Ministerio de Medio Ambiente,

la creación de una Agencia de Eficiencia Energética actualmente gestionada por una entidad privada que trabaja para el Ministerio de Energía y la Comisión Nacional de Energía. Todos estos han logrado proponer el estudio y generación de nuevas leyes a través de su Agenda Energética, la cual traza un camino a seguir respecto de la Estrategia Energética 2050.

Las principales leyes desarrolladas respecto del manejo sustentable de la energía son (Biblioteca del Congreso Nacional, s.f.):

- Ley 20698: propicia la ampliación de la matriz energética mediante fuente renovables no convencionales
- Ley 20571: regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales
- Ley 20365: establece franquicia tributarios respecto de sistemas solares térmicos
- Ley 20257: introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales

Respecto de los certificados reconocidos por el gobierno que provienen de sistemas reconocidos internacionalmente, se puede reconocer dos desarrollados por el Green Building Council:

- Certificación LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Medioambiental): Es un Programa de Certificación voluntario y consensuado para Edificación Sustentable, que reconoce las mejores estrategias y prácticas de construcción.

- Certificación CES (Certificación Edificio Sustentable): es un sistema nacional, que permite evaluar, calificar y certificar el grado de sustentabilidad de edificios de uso público en Chile.

Desde el Ministerio de Vivienda y Urbanismo se está promoviendo la herramienta CEV (Certificación Energética de Viviendas) donde se desarrolla una calificación del desempeño energético de la edificación, pueden ser departamentos o casas, el cual es de carácter voluntario.

Una vez más, el desarrollo de todas estas leyes, la utilización de herramientas gubernamentales y privadas, están enmarcadas en la necesidad de introducir al contexto chileno el nuevo paradigma que se vive a nivel mundial, que es utilizar los recursos de la manera más eficiente posible, ya que así se logra disminuir el impacto de todas las actividades humanas. Como este es un trabajo exhaustivo y meticuloso, es trabajo de cada nación comprometerse a delegar estas tareas y metas a quienes puedan gestionar de la mejor manera, siendo esto un trabajo conjunto de ministerios, municipalidades y entes externos.

### 4.3.2 Reglamentación térmica aplicada actualmente a proyectos habitacionales

La última modificación a la reglamentación térmica actual de Chile entró en vigencia en 2007. Esta contempla exigencias de acondicionamiento térmico de “Complejos de techumbre, muros perimetrales y pisos ventilados” y una sección de “Exigencias para ventanas” (MINVU - Instituto de la construcción, 2007).

Para establecer parámetros concretos a las exigencias de la reglamentación se tiene el respaldo de las explicaciones científicas para el comportamiento de los materiales utilizados en los diferentes materiales de construcción. Una de las principales características que se debe tener en cuenta a la hora de seleccionar un material para una edificación es, entre otras

cosas, la capacidad de trasferencia del calor, para esto la termodinámica explica muy bien el fenómeno en cuestión. Debido a que una de las funciones del hogar es proporcionar abrigo y resguardo es que los elementos envolventes de la construcción se ven expuestos a diferencias de temperatura, he aquí donde entran en juego los diferentes modos de transferencia de calor: la conducción, convección y radiación.

En general, las reglamentaciones térmicas utilizan parámetros de la *conducción* para definir sus estándares. Así, Cengel & Ghajar (2011), definen:

$$Razón\ de\ conducción\ del\ calor\ \propto \frac{(Área)(Diferencia\ de\ temperatura)}{Espesor}$$

Más conocida como la Ley de Fourier de la conducción del calor:

$$\dot{Q} = kA\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x}\ [W] \qquad (1)$$

De la *Fórmula 1* se desprende la constante de proporcionalidad $k$ que es la conductividad térmica, la cual sirve para definir la transmitancia térmica $U$, inverso de la resistencia térmica $Rt$.

$$U = \frac{1}{Rt} = \frac{k}{e}\ \ ;\ \ \frac{W}{K * m} * \frac{1}{m} = \frac{W}{K * m^2} \qquad (2)$$

$e$: Espesor de la superficie.

A continuación, se presentan alguno de los aspectos más importantes de la reglamentación térmica vigente.

Los complejos de techumbres, muros perimetrales y pisos inferiores ventilados, entendidos como elementos que constituyen la envolvente de la vivienda, deberán tener una transmitancia térmica $U$ igual o menor, o una resistencia térmica total $Rt$ igual o superior, a la señalada para la zona que le corresponda al proyecto de arquitectura, de acuerdo con los

planos de zonificación térmica aprobados por resoluciones del Ministro de Vivienda y Urbanismo a la siguiente tabla:

**Tabla 1***: Trasmitancias y resistencias térmicas totales exigidas por la reglamentación térmica vigente.*

| **Zona** | **Techumbre** | | **Muros** | | **Pisos Ventilados** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $U$ $[W/m^2K]$ | $Rt$ $[m^2K/W]$ | $U$ $[W/m^2K]$ | $Rt$ $[m^2K/W]$ | $U$ $[W/m^2K]$ | $Rt$ $[m^2K/W]$ |
| 1 | 0,84 | 1,19 | 4,0 | 0,25 | 3,60 | 0,28 |
| 2 | 0,60 | 1,67 | 3,0 | 0,33 | 0,87 | 1,15 |
| 3 | 0,47 | 2,13 | 1,9 | 0,53 | 0,70 | 1,43 |
| 4 | 0,38 | 2,63 | 1,7 | 0,59 | 0,60 | 1,67 |
| 5 | 0,33 | 3,03 | 1,6 | 0,63 | 0,50 | 2,00 |
| 6 | 0,28 | 3,57 | 1,1 | 0,91 | 0,39 | 2,56 |
| 7 | 0,25 | 4,00 | 0,6 | 1,67 | 0,32 | 3,13 |

*Fuente: Manual de aplicación Reglamentación Térmica: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Artículo 4.1.10. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Instituto de la Construcción (2007).*

Se considerará complejo de ventana a los elementos constructivos que constituyen los vanos vidriados de la envolvente de la vivienda.

**Tabla 2**: *Muestra la superficie máxima de ventanas que podrá contemplar un proyecto de arquitectura, respecto de la superficie, zona y el tipo de vidriado.*

| **Ventanas** | | | |
|---|---|---|---|
| | % Máximo de Superficie Vidriada Respecto a Parámetros Verticales de la Envolvente | | |
| | | DVH Doble Vidriado Hermético | |
| Zona | Vidrio Monolítico | $3{,}6\ [W/m^2K] \geq U > 2{,}4\ [W/m^2K]$ | $U \leq 2{,}4\ [W/m^2K]$ |
| 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% |

*Fuente: Manual de aplicación Reglamentación Térmica: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Artículo 4.1.10. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Instituto de la Construcción (2007).*

Para tener más claridad de los puntos que se están abordando y de la importancia que estos cobran en las construcciones, es sustancial definir en este punto el concepto de transmitancia térmica $U$.

Flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperatura entre los dos ambientes separados por dicho elemento. Corresponde al inverso de la resistencia térmica total $Rt$ de un elemento y se expresa en $[W/m^2K]$. Se determina experimentalmente según la norma NCh 851 o bien por el cálculo como se señala en la norma NCh 853 (MINVU - Instituto de la construcción, 2007).

En el caso que el proyecto de arquitectura considere más de un tipo de vidrio, según Tabla 3 (Tabla 2 en este documento), se deberá determinar el máximo porcentaje posible para cada tipo de vidrio respecto a la superficie total de la envolvente vertical. Para ello, por cada tipo de vidrio a utilizar, se deberá aplicar la siguiente formula (MINVU - Instituto de la construcción, 2007):

$$\frac{TP * MV}{100} = MSV \qquad (3)$$

$TP$: Porcentaje del tipo de vidrio respecto del total de la superficie vidriada.

$MV$: Porcentaje máximo de superficie vidriada respecto a parámetros verticales de la envolvente.

$MSV$: Porcentaje máximo de superficie para tipo de vidrio, respecto de la superficie total de la envolvente.

A esta reglamentación se pueden sumar los Estándares de Construcción Sustentable. En esta se pueden reconocer requerimientos de los estándares como las demandas de calefacción y enfriamiento para todo el país.

| ZONAS TÉRMICAS | DEMANDA DE CALEFACCIÓN (kwh/m² año) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Zona A | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Zona B | 90 | 65 | 43 | 15 |
| Zona C | 77 | 56 | 38 | 15 |
| Zona D | 71 | 52 | 35 | 15 |
| Zona E | 117 | 88 | 59 | 30 |
| Zona F | 135 | 100 | 67 | 30 |
| Zona G | 120 | 90 | 60 | 30 |
| Zona H | 120 | 90 | 60 | 30 |
| Zona I | 150 | 110 | 73 | 30 |

**Figura 2**: *Requerimientos máximos de demanda en calefacción para vivienda por zona climática en Chile.*

*Fuente: Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile: Tomo II Energía, MINVU (2018).*

| ZONAS TÉRMICAS | DEMANDA DE ENFRIAMIENTO (kwh/m² año) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Zona A | 10 | 5 | 5 | 5 |
| Zona B | 10 | 5 | 5 | 5 |
| Zona C | 10 | 5 | 5 | 5 |
| Zona D | 15 | 10 | 5 | 5 |
| Zona E | 5 | 5 | 0 | 0 |
| Zona F | 5 | 5 | 0 | 0 |
| Zona G | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Zona H | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Zona I | 0 | 0 | 0 | 0 |

**Figura 3**: *Requerimientos máximos de demanda en enfriamiento para vivienda aislada por zona climática en Chile.*

*Fuente: Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile: Tomo II Energía, MINVU (2018).*

También se reconocen valores propuestos para la transmitancia térmica en comparación a los establecidos por la reglamentación oficial del Estado.

| ZONA TÉRMICA[2] | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Techos | 0,84 | 0,47 | 0,47 | 0,38 | 0,33 | 0,28 | 0,28 | 0,25 | 0,25 |
| Muros | 2,10 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,45 | 0,40 | 0,30 | 0,35 |
| Pisos ventilados | 3,60 | 0,70 | 0,87 | 0,70 | 0,60 | 0,50 | 0,39 | 0,32 | 0,32 |
| Pisos sobre terreno -R100 [(m$^2$K)/W]*100 | --- | 45 | 45 | 45 | 45 | 91 | 91 | 91 | 91 |
| Puertas | --- | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 |

**Figura 4**: *Valores propuestos de transmitancia térmica "U" [W/m2K] y resistencia térmica (R100), para actualización de la reglamentación térmica, Art. 4.1.10 de la OGUC.*

*Fuente: Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile: Tomo II Energía, MINVU (2018).*

#### 4.3.2.1 Confort térmico en viviendas sociales

Es un gran desafío a nivel global el mejorar la calidad de vida de las personas y asegurar ciertos mínimos sobre su bienestar y salud. Chile no puede quedarse atrás en estos aspectos por lo que ha tomado la decisión de ser parte del Acuerdo de Paris, bajo el cual se ha fijado ciertas metas que alcanzar en las diferentes metas en las diferentes temáticas de sustentabilidad, las cuales abarcan desde energía, pobreza, calidad de vida y recursos hídricos, hasta urbanización, sistemas alimentarios y acciones por el clima.

Primero se reconoce de manera generalizada la necesidad de un confort ambiental en las viviendas para mejorar la calidad de vida de las personas. Existen tres categorías de parámetros que influencian el confort ambiental:

Parámetros físicos, tales como la temperatura del aire del ambiente, la temperatura media radiante de las superficies del ambiente interior, la humedad relativa del aire, la presión atmosférica, el color de las superficies del ambiente, olor, intensidad y calidad de la luz, y niveles de ruido.

Parámetros humanos, tales como la edad, sexo y características particulares de cada persona. Factores culturales, relacionados, por ejemplo, con el lugar en que una persona ha nacido y viviendo gran parte de su vida, pueden afectar significativamente las condiciones en que ella se siente confortable.

Parámetros externos, que incluyen el tipo de actividad física en relación a la actividad metabólica, el tipo de vestimenta y las condiciones o hábitos sociales y culturales.

Dada la diversidad de variables que inciden en el confort ambiental, usualmente se consideran en forma separada el confort térmico (o más precisamente higrotérmico), el confort lumínico, el confort respecto de la calidad del aire y el confort acústico (Bustamante, Rozas, Cepeda, Encinas, & Martínez, 2009).

En esta oportunidad el estudio se centrará en el confort térmico el cual se define como "aquel estado en que las personas expresan satisfacción con el ambiente que lo rodea, sin preferir condiciones de mayor o menor temperatura" (Bustamante W. et al, 2009). Este confort térmico depende de varios parámetros los cuales se relacionan con las personas y con el ambiente donde estas se encuentran:

Temperatura del aire del recinto. Actúa muy directamente en la potencia (cantidad de calor por unidad de tiempo) de intercambio de calor por convección. Rangos de confort entre 20°C y 27°C (para invierno y verano respectivamente).

Temperatura superficial interior de la envolvente. A partir de la temperatura de la superficie de paredes, cielo, ventanas, piso, se define la temperatura radiante $Tr$, la que es el

promedio de las temperaturas de las distintas superficies del recinto, ponderada por el ángulo sólido generado entre el punto que representa el cuerpo humano y la respectiva superficie. Esta temperatura $Tr$ es la que representa la potencia de intercambio (por radiación) entre el cuerpo humando y las superficies del recinto.

Humedad relativa del aire ($HR$). Actúa sobre la posibilidad de intercambiar calor por evaporación de sudor. Mientras menor es la humedad relativa, más fácil es la evaporación y entonces no se forma una capa líquida de sudor molesto. Rangos de confort entre 20% y 75%.

Velocidad del aire. También actúa sobre la evaporación del sudor. Una mayor velocidad del aire permite aumentar la evaporación y por tanto en verano permite evitar liquido sobre la piel. En invierno, es recomendable evitar una alta velocidad de aire. Valores máximos de velocidad entre 0 y 1 m/s (Bustamante W. et al, 2009).

Como se menciona en la Guía de diseño para la Eficiencia Energética en la vivienda social el confort concerniente a la calidad del aire interior está relacionado con el uso racional de la energía "pues la renovación del aire implica consumo de energía para elevar la temperatura del aire exterior en invierno y el uso de algún sistema de ventilación mecánica o natural" (Bustamante W. et al, 2009).

De forma aún más específica en las viviendas sociales la calidad del aire interior está afecta a la presencia de una alta concentración de personas en espacios reducidos, la presencia de calefacción a llama abierta "los que al estar defectuosos provocan problemas de contaminación intradomiciliaria graves, con contenido de gases mortales en niveles peligrosos de concentración" (Bustamante W. et al, 2009).

### 4.3.3 Evaluación social de proyectos con eficiencia energética

Una buena medida para tasar la efectividad de una mejora de eficiencia energética es hacer una evaluación social sobre la misma, este aspecto hará que la evaluación sea más completa puesto que grandes consecuencias positivas solo pueden ser consideradas con precios sociales ya que sus beneficios no son directamente económicos.

Tomar una medida de eficiencia energética en la construcción de alguna edificación determina un provecho para la sociedad ya que significaría una disminución de emisiones en general. La forma más tangible de ver la disminución de emisiones es a través del uso de la calefacción.

Los instrumentos que se usan a nivel nacional para hacer estas evaluaciones son los precios sociales.

Para realizar una correcta evaluación social de proyectos se requiere valorizar tanto beneficios y costos, utilizando precios sociales. El objetivo de la estimación de los precios sociales es disponer de valores que reflejen el verdadero beneficio o costo para la sociedad de utilizar unidades adicionales de recursos durante la ejecución y operación de un proyecto de inversión (Ministerio de Desarrollo Social, 2018).

"El precio social del carbono permite incorporar dentro de las evaluaciones los beneficios o costos sociales por disminuir o aumentar las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI)".

Se propone seguir el modelo de Reino Unido y estimar un precio sombra de carbono a partir de la disposición de Chile de reducir, y por ende de pagar, emisiones de gases de efecto invernadero conforme a su meta de mitigación bajo el Acuerdo de Paris, denominada "contribución nacional determinada".

El análisis de los costos marginales de abatimiento para Chile deriva de la mejor información disponible a la fecha, que consiste en los resultados del proyecto MAPS Chile.

Los resultados del análisis arrojan un precio social de carbono que corresponde a 32,5 [USD/ton $CO_2$] con un rango de sensibilidad entre 20,2 [USD/ton $CO_2$] y 43,2 [USD/ton $CO_2$].

A un precio del dólar observado al 30 – dic – 2017 de 615,22 CLP/USD, se obtiene un valor de 19995 pesos por tonelada de $CO_2$.

El país también ha dictado un proyecto de ley el cual establece un impuesto anual que grava las emisiones de material particulado, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono, conocido como Impuesto Verde.

A partir de la vigencia de la modificación del artículo 8 de la ley 20780, en el año 2017 se recaudaron 23.277.234 USD correspondientes al cobro por 100378 toneladas emitidas "el contaminante que representó la mayor cantidad de emisiones corresponde a los óxidos de nitrógeno con el 51,1% (51334 ton). No obstante, el material particulado es el contaminante que posee mayor recaudación, representando el 67,2% (15662513 USD) del total" (Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

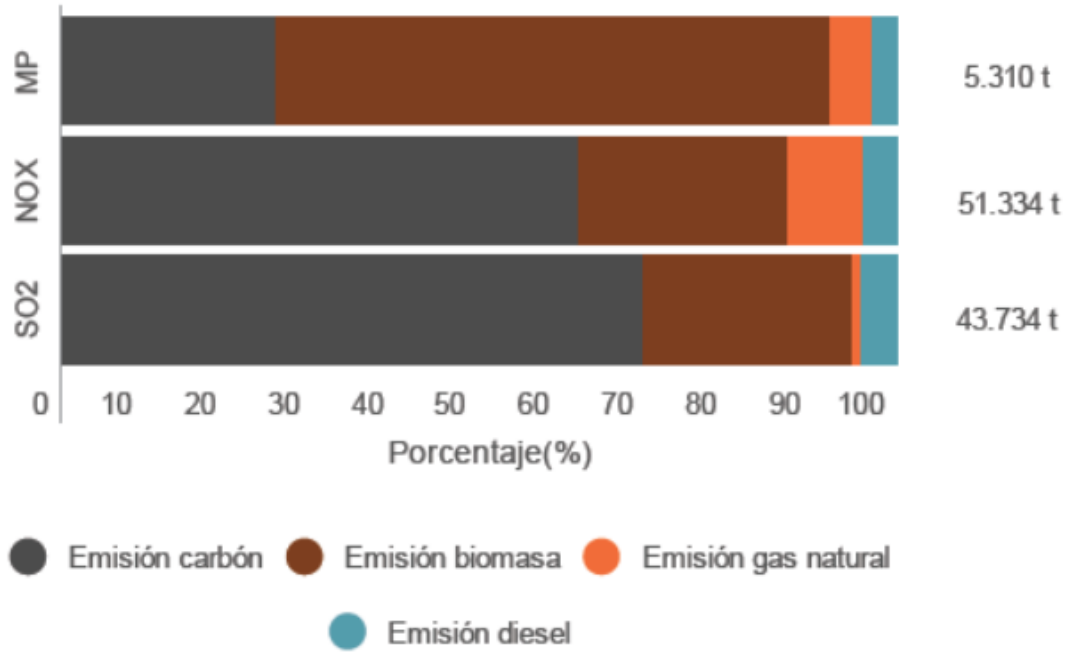

**Figura 5**: *Emisiones de impuesto verdes según contaminante local y combustible para el año 2017.*

*Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente, 2018, elaborado en base a la información proporcionada por RETC.*

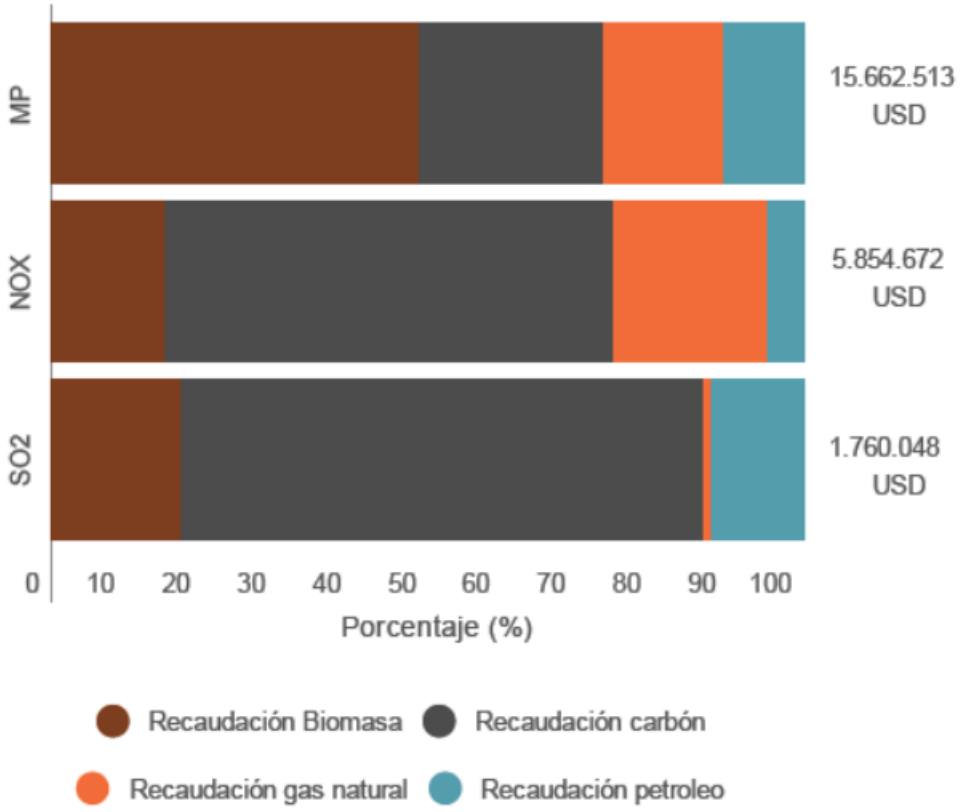


**Figura 6**: *Recaudación de impuesto verdes según contaminante local y combustible para el año 2017.*

*Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente, 2018, elaborado en base a la información proporcionada por RETC.*

# 5. METODOLOGÍA

## 5.1 Recopilación de la información

La recopilación de la información se enfocó principalmente en obtener tanto un contexto situacional del país, como en valores concretos para las características arquitectónicas, energéticas y componentes de la polución en las viviendas sociales.

### 5.1.1 Contexto nacional e internacional

Se hizo una recopilación de información del contexto en eficiencia energética, cambio climático y sustentabilidad en la construcción, de Chile y otros países y organizaciones gubernamentales a nivel mundial.

El primer contexto fue extraído de la publicación de la IEA en 2018 sobre las perspectivas respecto del cambio climático y el rumbo que deben tomar las decisiones de los gobiernos para lograr hacerle frente. En este documento se proponen estrategias para avanzar hacia la eficiencia energética en tres grandes sectores: construcción, industria y transporte.

Luego se hace un catastro muy generalizado sobre las certificaciones que se utilizan en el sector construcción a nivel mundial.

**Tabla 3***: Extracto de la Tabla 1 "Resumen de políticas de eficiencia energética en los países miembros de IEA" en el sector "Aplicaciones y Edificaciones".*

| | Australia | Canadá | Estados europeos miembros | Japón | Corea | Nueva Zelanda | USA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Códigos de energía en construcción** | Obligatorio para edificios residenciales y comerciales nuevos y existentes. Códigos actualizados en 2011. | Código nacional de energía voluntario para edificios residenciales y comerciales nuevos y existentes, publicado en 2011 para su aprobación por los reguladores subnacionales. | Obligatorio para edificios nuevos y existentes cuando se realiza la renovación. | Lineamientos voluntarios. | Obligatorio para edificios residenciales y edificios comerciales 500 - 300 m². Códigos actualizados en 2010. | Obligatorio para nuevos edificios residenciales y comerciales. | Obligatorio para nuevos edificios residenciales y comerciales, y grandes renovaciones, con algunas excepciones. Variación de rigurosidad en todos los estados. |
| **Etiquetados energéticos** | Marco nacional que reemplaza siete marcos legislativos estatales y territoriales. 7 electrodomésticos cubiertos por el Sistema obligatorio de etiquetado de calificación energética. Divulgación obligatoria de la eficiencia energética de los edificios comerciales. | Etiqueta obligatoria EnerGuide para ocho electrodomésticos y bombillas principales. Símbolo internacional ENERGY STAR promovido en Canadá. | Certificados de eficiencia energética obligatorios para todos los edificios nuevos. Etiquetado en su lugar para electrodomésticos. | Programa voluntario de etiquetado de edificios y Energy Star para equipos de oficina. | El sistema de etiquetado se expandió de 26 productos en 2011 a 35 productos en 2012. | 8 productos cubiertos. | Etiquetado obligatorio EnergyGuide para la mayoría de los electrodomésticos. Etiquetado voluntario de Energy Star para más de 60 categorías de electrodomésticos, equipos y edificios. |

*Fuente: Desarrollo de Políticas en Eficiencia Energética, septiembre 2011 – septiembre 2012, IEA (2012).*

A partir del marco teórico, se presume que a nivel nacional las zonas más afectadas por las necesidades energéticas y la contaminación consecuencia de la calefacción defectuosa son las zonas centro-sur.

**Tabla 4***: Comparación entre la norma térmica chilena y española para vidrios.*

| % de superficie de huecos | OGUC - Chile | CTE - España | CTE – España |
|---|---|---|---|
| | Zona 3 y Zona 4 | Zona C | Zona D |
| **0 a 10** | U ≥ 3,6 | 4,4 | 3,5 |
| **11 a 20** | U ≥ 3,6 | 4,4 ≥ U > 3,4 | 3,5 ≥ U > 3,0 |
| **21 a 30** | 3,6 ≥ U > 2,4 | 4,3 ≥ U > 2,9 | 3,5 ≥ U > 3,0 |
| **31 a 40** | 3,6 ≥ U > 2,4 | 3,9 ≥ U > 2,6 | 3,4 ≥ U > 2,2 |
| **41 a 50** | 3,6 ≥ U > 2,4 | 3,6 ≥ U > 2,4 | 3,2 ≥ U > 2,1 |
| **51 a 60** | 3,6 ≥ U > 2,4 | 3,5 ≥ U > 2,2 | 3,0 ≥ U > 1,9 |

| % de superficie de huecos | OGUC - Chile | CTE - España | CTE - España |
|---|---|---|---|
| | Zona 3 y Zona 4 | Zona C | Zona D |
| **0 a 10** | U ≥ 3,6 | U ≥ 3,6 | 3,1 |
| **11 a 20** | U ≥ 3,6 | 3,6 ≥ U > 2,4 | 3,1 |
| **21 a 30** | 3,6 ≥ U > 2,4 | 3,6 ≥ U > 2,9 | 3,1 ≥ U > 2,6 |
| **31 a 40** | 3,6 ≥ U > 2,4 | 3,6 ≥ U > 2,6 | 3,1 ≥ U > 2,2 |
| **41 a 50** | 3,6 ≥ U > 2,4 | U ≤ 2,4 | 3,1 ≥ U > 2,0 |
| **51 a 60** | U ≤ 2,4 | U ≤ 2,4 | 3,0 ≥ U > 1,9 |

*Fuente: Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile, Celis, García, Trebilcock, Escorcia, Miotto & Díaz (2012).*

**Tabla 5***: Comparación entre la norma térmica chilena y española para la envolvente de las viviendas.*

| **W/m2K** | **OGUC - Chile** | | **CTE - España** | **CTE - España** |
|---|---|---|---|---|
| | Zona 3 | Zona 4 | Zonas C | Zonas D |
| **Muros** | 1,9 | 1,7 | 0,95 | 0,86 |
| **Suelos** | 0,7* | 0,6* | 0,65* | 0,64 |
| **Cubiertas** | 0,47 | 0,38 | 0,53 | 0,49* |

| **W/m2K** | **OGUC - Chile** | | **CTE - España** |
|---|---|---|---|
| | Zona 5 | Zona 6 | Zonas E |
| **Muros** | 1,6 | | 0,74 |
| **Suelos** | 0,5* | | 0,62 |
| **Cubiertas** | 0,33 | | 0,46 |

*Fuente: Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile, Celis et al. (2012).*

### 5.1.2 Base de datos de viviendas CEV

Para identificar el desempeño energético actual de una vivienda en Chile se utilizó la información proporcionada por la Calificación Energética de Viviendas (CEV), programa impulsado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Los principales indicadores que entrega la CEV son el porcentaje de ahorro, nivel de eficiencia energética identificada con

una letra que va desde la A+ hasta la G “donde la A+ representa los porcentajes más altos de ahorro, mientras que la G representa un consumo mayor al estándar mínimo” (MINVU, s.f.) y el requerimiento energético o demanda.

Entre otros datos, este portal entrega información sobre la totalidad de las viviendas calificadas a nivel nacional, y a partir de esta es que se trabajaron resultados como letra de calificación por tipo de vivienda, letra de calificación por región y letra de calificación por tipo de vivienda por región, lo que ayudó a caracterizar el antes nombrado desempeño energético para el país. Así mismo el portal de la CEV entrega un informe consolidado con los materiales más utilizados por las viviendas sociales en Chile, lo que ayuda a identificar cuáles son las mejoras arquitectónicas a considerar para hacer la propuesta y evaluación económica.

### 5.1.3 Contaminación del aire, enfermedades relacionadas y costos sociales

Para determinar la contaminación del aire dentro de las viviendas es que se utiliza la información proporcionada por el Reporte del Estado del Medio Ambiente en materias de Calidad del Aire generado por SINIA del Ministerio del Medio Ambiente.

Los datos se dividen entre los principales contaminantes del aire: material particulado en sus fracciones gruesa ($MP_{10}$) y fina ($MP_{2,5}$), óxidos de nitrógeno ($NO_x$), dióxido de azufre ($SO_2$) y dióxido de carbono ($CO_2$). De ellos se utilizaron los resultados para la combustión de leña residencial, ya que es dato representante del principal comburente utilizado para calefacción en la zona centro sur. De ellos la leña residencial tiene como principales contaminantes el material particulado fino, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre. Estos luego son estudiados por región lo que permitió incluirlos en el estudio para las regiones seleccionadas.

En este mismo informe se encuentran los datos sobre la mortalidad y movilidad asociada a la exposición a material particulado fino, óxido de nitrógeno y dióxido de azufre, además, sus costos sociales en millones de dólares:

**Tabla 6***: Mortalidad y morbilidad asociada a la exposición a material particulado fino (MP2,5) para el año 2017.*

| Tipo de efecto | Causa | Grupo de edad | Casos | Costos sociales (MM USD) |
|---|---|---|---|---|
| **Mortalidad prematura** | Cardiopulmonar | Mayores de 30 años | 3494 | 2417 |
| **Admisiones hospitalarias** | Ataques de asma | Entre 0 y 64 años | 130 | 0,16 |
| | Cardiovasculares | Mayores de 18 años | 1503 | 3,9 |
| | Pulmonar crónica | Mayores de 18 años | 211 | 0,35 |
| | Neumonía | Mayores de 65 años | 941 | 1,7 |
| **Visita a sala de emergencia** | Bronquitis aguda | Entre 0 y 17 años | 90001 | 5,2 |
| **Restricción de actividad** | Días de pérdida de trabajo | Entre 18 y 64 años | 731613 | 28 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Días de actividad restringida | Entre 18 y 64 años | 3226602 | 37 |

*Fuente: Departamento de información ambiental, SINIA Ministerio de Medio Ambiente (2018).*

## 5.2 Selección de regiones

Debido a que las características y requerimientos físicos térmicos de las edificaciones son diferentes dependiendo de la zona térmica en la cual se emplazan, es que se debe hacer una selección de las regiones a evaluar.

Primero se debe tener en consideración la factibilidad de acceder a la información necesaria para hacer el estudio, por lo que se elige la Región Metropolitana y la Región del Bío Bío, cuyas capitales regionales son las dos más pobladas del país.

De igual manera se hizo un proceso de selección de una tercera región para hacer un estudio representativo de Chile.

### 5.2.1 Factores climatológicos y socioeconómicos

Para efectuar este proceso de selección se utilizaron ciertos factores climatológicos, sociales y económicos. Estos factores son:

- Climatológicos: zonificación térmica, requerimientos térmicos y temperaturas extremas de cada región.
- Socio-económicos: población, tipo de vivienda, enfermedades, ingresos y gasto en salud y calefacción.

Este procedimiento consideró cinco pasos. El primero de ellos fue reunir la información sobre los factores. Luego se calcularon indicadores que fueran calificables a partir de los factores nombrados anteriormente. Las regiones fueron subdivididas por zonas norte, central y sur. El cuarto paso refirió a enumerar las regiones (del 1 al 5 en la zona norte y centro, y del 1 al 6 en la zona sur) en cada factor, utilizando esta enumeración como puntaje, el cual se sumó para finalmente elegir la región que tuviera el menor número final, como se muestra en las Tablas 7 y 8.

Para enumerar las regiones se sacó un promedio, luego se calculó la diferencia absoluta entre el valor del indicador para la región y el promedio obtenido para la zona. Dependiendo de cuán mayor fuera la diferencia con el promedio, mayor sería el número de calificación.

Debido a que la zona norte no presenta una gran oscilación térmica y a que la zona centro estaba previamente delimitada, se volvió a acotar la aplicación del proceso de selección sólo a la zona sur. Determinando así tres regiones, dos de la zona sur.

Las regiones seleccionadas fueron representadas tanto por su nombre regional como por sus capitales regionales.

**Tabla 7***: Extracto de la planilla resumen para la selección de las regiones por factores socioeconómicos.*

| Región | Población | | Vivienda | | Población/ Vivienda | | Salud Enfermedades | | Ingreso [MM$] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bío Bío** | 8,85% | 6 | 8,70% | 6 | 2,71 | 6 | 0,2863% | 5 | 985583 | 6 | 29 |
| **Araucanía** | 5,44% | 3 | 5,78% | 3 | 2,51 | 1 | 0,2382% | 2 | 569335 | 2 | 11 |
| **Los Ríos** | 2,19% | 2 | 2,33% | 2 | 2,50 | 2 | 0,2513% | 4 | 271106 | 3 | 13 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Los Lagos** | 4,71% | 1 | 5,05% | 1 | 2,49 | 3 | 0,2076% | 3 | 521930 | 1 | 9 |
| **Aysén** | 0,59% | 5 | 0,68% | 5 | 2,31 | 5 | 0,1425% | 6 | 90273 | 5 | 26 |
| **Magallanes** | 0,95% | 4 | 1,00% | 4 | 2,54 | 4 | 0,2258% | 1 | 160419 | 4 | 17 |

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos que fueron obtenidos mayoritariamente de los resultados de la Biblioteca Nacional del Congreso y la Encuesta CASEN 2015*.

**Tabla 8***: Extracto de la planilla resumen para la selección de las regiones por factores climatológicos.*

| Capital Regional | Delta T° extremas [°C] | | Zona térmica | R. Calefacción | R. Refrigeración | Delta | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Concepción** | 9,2 | 2 | 4 | 117 | 5 | 112 | 2 | 4 |
| **Temuco** | 12,4 | 5 | 5 o 6 | 120 | 0 | 120 | 1 | 6 |
| **Valdivia** | 11,5 | 4 | 5 | 120 | 0 | 120 | 1 | 5 |
| **Pto. Montt** | 9,1 | 3 | 6 | 120 | 0 | 120 | 1 | 4 |
| **Coyhaique** | 9,3 | 1 | 7 | 150 | 0 | 150 | 3 | 4 |
| **Pta. Arenas** | 7,1 | 6 | 7 | 150 | 0 | 150 | 3 | 9 |

*Fuente: Elaboración propia, a partir de datos que fueron obtenidos principalmente de la Dirección Meteorológica de Chile. Los requerimientos de calefacción y refrigeración están expresados en [kWh/m$^2$] al año.*

En la última columna de cada una de las tablas se puede ver el puntaje total de cada región. En ella se puede ver que la Región del Bío Bío (ya seleccionada) cuenta con un puntaje total de 33 puntos, siendo la más alejada al promedio, luego la Región de los Lagos cuenta con el menor puntaje, pero debido a la inespecificidad de la información disponible se elige la región con la que hasta hace varios años atrás formaban una sola región, es decir,

la región de Los Ríos, que además tiene sólo un punto de diferencia con segunda mejor puntuación.

### 5.3 Tipología de las viviendas estudiadas

Para caracterizar las viviendas del país pertenecientes a las regiones seleccionadas se utilizó la información presentada por el "Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial" elaborado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción; y la información presentada por la memoria de título "Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción" de N. Romero, el cual trabaja con datos del primero mencionado.

Se proponen 3 tipos de viviendas que son las que más comúnmente se utilizan a la hora de diseñar las viviendas sociales:

- Vivienda tipo 1: 1 piso, aislada.
- Vivienda tipo 2: 1 piso, pareada.
- Vivienda tipo 3: 2 pisos, pareada.

**Tabla 9***: Caracterización de las viviendas tipo utilizadas en el análisis energético.*

| | **Vivienda Tipo 1** | **Vivienda Tipo 2** | **Vivienda Tipo 3** |
|---|---|---|---|
| **Superficie Útil [$m^2$]** | 56,5 | 67,7 | 84,7 |
| **Muros Envolvente [$m^2$]** | 83,8 | 51,0 | 82,0 |
| **Tejado [$m^2$]** | 60,2 | 81,7 | 56,5 |
| **Área de ventanas [$m^2$]** | 17,5 | 5,39 | 12,13 |

*Fuente: Elaborada como resumen a partir de las tipologías utilizadas en el Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial, Cámara Chilena de la Construcción (2010).*

### 5.3.1 Valores materiales utilizados

Como se presentó anteriormente, gracias a la información proporcionada por la calificación energética se pudieron representar los materiales más utilizados en la construcción de las viviendas sociales. No obstante, también se requirió saber el valor de dichos materiales, por lo tanto, fue necesario hacer una búsqueda de los valores en el portal Mercado Público, donde son licitadas todos los proyectos habitacionales impulsados por el Ministerio de Vivienda, esto fue realizado para cada región ya que estos valores varían entre cada una de ellas.

Para determinar los valores de los materiales más utilizados en la construcción de viviendas sociales es que utilizaron licitaciones para las regiones Metropolitana, Bío Bío y De Los Ríos.

### 5.3.2 Valores materiales propuestos

Para encontrar valores de materiales con menor transmitancia térmica se utilizaron conceptos básicos entregados por el Manual de Aplicación Reglamentación Térmica (elaborado por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones), la Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social (elaborado por la Pontificia Universidad Católica de Chile) y el Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico (construido por la CDT). A partir de estos se obtuvieron precios en el Generador de Precios de la Construcción de CYPE Ingenieros para los mismos materiales mencionados anteriormente, sin embargo,

gracias a la capacidad del software de seleccionar las características de los materiales, es que se pudieron incluir las características más energéticamente eficientes que fueron recomendadas por los documentos antes mencionados. Ante aquellos elementos que el software no consideraba, se utilizaron los precios del mercado cotizados principalmente en Sodimac Constructor.

## 5.4 Evaluación económica y caracterización del proyecto habitacional

### 5.4.1 Cálculo de la línea base

El primer paso para hacer la evaluación económica es determinar la línea base de requerimiento energético. Para ello se utilizó la selección de las tres tipologías de viviendas, en base a sus medidas, se cuantifica la demanda energética a través de la Ley de Conducción presentada anteriormente para obtener el flujo de calor en cada elemento de la envolvente de una vivienda.

La fórmula utilizada para calcular el flujo de calor, responde a los principios de transferencia de calor por convección en un estado estacionario unidimensional, la cual se desprende de la *De la* Fórmula 1 presentada anteriormente.

$$Q_k = -k\frac{A}{L}(T_2 - T_1) = k\frac{A}{L}(T_1 - T_2) \quad (4)$$

Donde la Fórmula 4, corresponde al flujo de calor a través de un material unidimensional, a partir de esta se puede hacer la analogía para un conjunto de materiales dispuestos en serie como sería el caso de la aplicación de una capa de aislamiento a una pared.

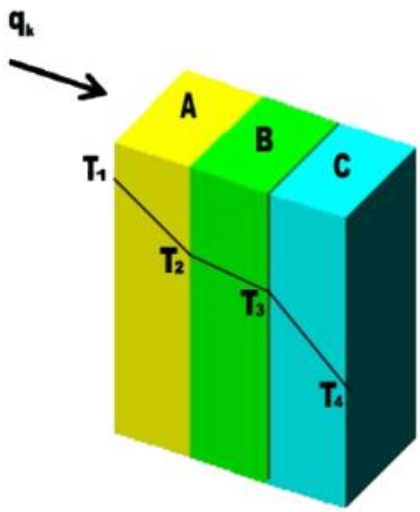


**Figura 7***: Conducción unidimensional a través de paredes planas dispuestas en serie.*

*Fuente: Unet (s.f.).*

$$Q_k = \left(k\frac{A}{L}\right)_A (T_1 - T_2) = \left(k\frac{A}{L}\right)_B (T_2 - T_3) = \left(k\frac{A}{L}\right)_C (T_3 - T_4) \quad (5)$$

De (5), se pueden obtener las relaciones (6) y (7) (Visitar anexo), para finalmente obtener:

$$Q_k = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{L}{kA}\right)_i}$$

Este, al ser el caso base, no cuenta con aislamiento por lo tanto la envolvente considera solo los elementos básicos de construcción, es decir:

- Vidrio monolítico para las ventas
- Muros de hormigón
- Estructura libre de techo y cielo
- Piso ventilado simple

Gracias a la información presentada por la Corporación de Desarrollo Tecnológico se hizo una caracterización de las emisiones que son consecuencia de la demanda energética en calefacción de la vivienda, cuyos energéticos componentes son:

**Tabla 10***: Consumo anual de energéticos (combustibles y electricidad) en calefacción para un hogar promedio.*

| Combustible | kWh/año | % |
|---|---|---|
| **Gas Natural** | 133 | 6,1 |
| **Gas Licuado** | 569 | 25,9 |
| **Electricidad** | 142 | 6,4 |
| **Leña** | 1314 | 59,8 |
| **Kerosene** | 40 | 1,8 |

*Fuente: Tabla 7.19 del estudio de Usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial, Cámara Chilena de la Construcción (2010).*

De la Tabla 10 se extraen los porcentajes en que son utilizados estos energéticos para calefaccionar una vivienda, destacándose el uso de leña con casi el 60%. Esta caracterización sirve para determinar los niveles de emisión de contaminantes como el $CO_2$, $NO_x$, $SO_x$ y material particulado presentes al momento de calefaccionar (ya sea por quema de combustibles o utilización de la corriente eléctrica).

Una vez que se tiene la caracterización con los niveles de contaminantes emitidos por el uso de estos energéticos, se tiene completa la línea base de demanda energética.

### 5.4.2 Identificación de las mejoras y situación esperada

El segundo paso para determinar la evaluación económica consiste en cuantificar la situación esperada una vez aplicadas las mejoras.

Para determinar las mejoras necesarias, se debe hacer un breve análisis a la estructura de la envolvente de una vivienda. En una casa sin aislamiento, alrededor del 35% de la pérdida de calor se produce a través de las paredes y el 25% se pierde a través del techo. El 40% restante se pierde a través de puertas, ventanas y el piso (Haringey London, s.f.). Por esto es que, es necesario aplicar una medida de eficiencia térmica en cada uno de los elementos que comprenden la envolvente, en específico se mejorará la aislación a tejado, muros y piso, y se disminuirá la transmitancia de las ventanas al instalar una ventana de doble vidrio o termo panel.

En cada uno de los documentos, “Usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial” y “Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción”, se enlistan varias mejoras para lograr eficiencia y confort térmico que responden a los mismos puntos seleccionados a estudiar, por lo que, a partir de estos, se obtiene un contexto sobre cuáles serían las medidas más convenientes a implementar energética y económicamente.

Una vez que se han seleccionado las medidas es necesario cuantificar cuanto es realmente la demanda energética que disminuye al aplicarlas, para ello se calcula el flujo de calor a través de cada uno de los elementos de la envolvente, considerando las mejoras.

Con este flujo de calor se puede obtener la demanda energética esperada, la cual es comparada con la línea base a través de las emisiones de contaminantes provenientes de los energéticos utilizados, por lo que, nuevamente hay que hacer una caracterización del consumo. Utilizando los mismos porcentajes para el consumo de energéticos presentados en

la Tabla 10, se obtienen ahora, la cantidad de contaminantes emitidos, pero con la demanda energética una vez aplicadas las mejoras a cada una de las viviendas tipo.

### 5.4.3 Ahorros y precios sociales

Teniendo la línea base y la situación esperada, ambas respecto de los contaminantes emitidos por el consumo de los energéticos presentados en la Tabla 10 cubrir la demanda energética en calefacción de una vivienda promedio (considerando todas las viviendas tipo presentadas), se puede calcular el porcentaje de ahorro por concepto de aplicación de las mejoras de eficiencia térmica.

Este ahorro corresponderá a la diferencia entre la cantidad de contaminantes emitidos en la situación línea base y la cantidad de contaminantes emitidos en la situación esperada. Una vez que se tiene esta diferencia, se cuantifica económicamente, para eso se utilizan los precios sociales dictados por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia, y por el Artículo 8 de la Ley 20.780 de Impuestos Verdes.

**Tabla 11***: Resumen de precios sociales para contaminantes emitidos.*

| Contaminante | Precio en USD/ton |
|---|---|
| **$CO_2$** | 32 |
| **MP** | 0,9 |
| **$SO_2$** | 0,01 |
| **$NO_x$** | 0,025 |

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por el Ministerio de Desarrollo Social y el Artículo 8 de la Ley 20.780.*

### 5.4.4 Flujo de caja

Finalmente, para obtener la evaluación económica, se realiza un flujo de caja simplificado el cual cuantificará la estructura económica por la cantidad de años que comprenda la vida útil de las mejoras.

En la estructura del flujo, se considerarán como ingresos los llamados ahorros, producto de la disminución de demanda energética de la vivienda, se considerará como inversión el costo de las mejoras. La tasa de descuento social corresponde al 6% determinado por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

A partir de las disposiciones antes descritas, se puede obtener el VAN.

# 6. RESULTADOS

## 6.1 Análisis de los Contextos de Estándares Energéticos

### 6.1.1 Calificación Energética de Vivienda (CEV)

A partir de los datos entregados por la base de datos de las viviendas calificadas por la CEV, se obtuvieron diversos resultados para caracterizar el comportamiento energético de las viviendas a lo largo del país.

Como se muestra en la Figura 7, parece lógico que la Región Metropolitana (caracterizada por el número 13) al ser la capital nacional, que cuenta con la mayor concentración poblacional correspondiente a 7.112.808 personas, lo sigue la Región del Bío Bío (caracterizada por el número 8), que también es la siguiente en concentración poblacional con 2.037.414 personas al 2017 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017).

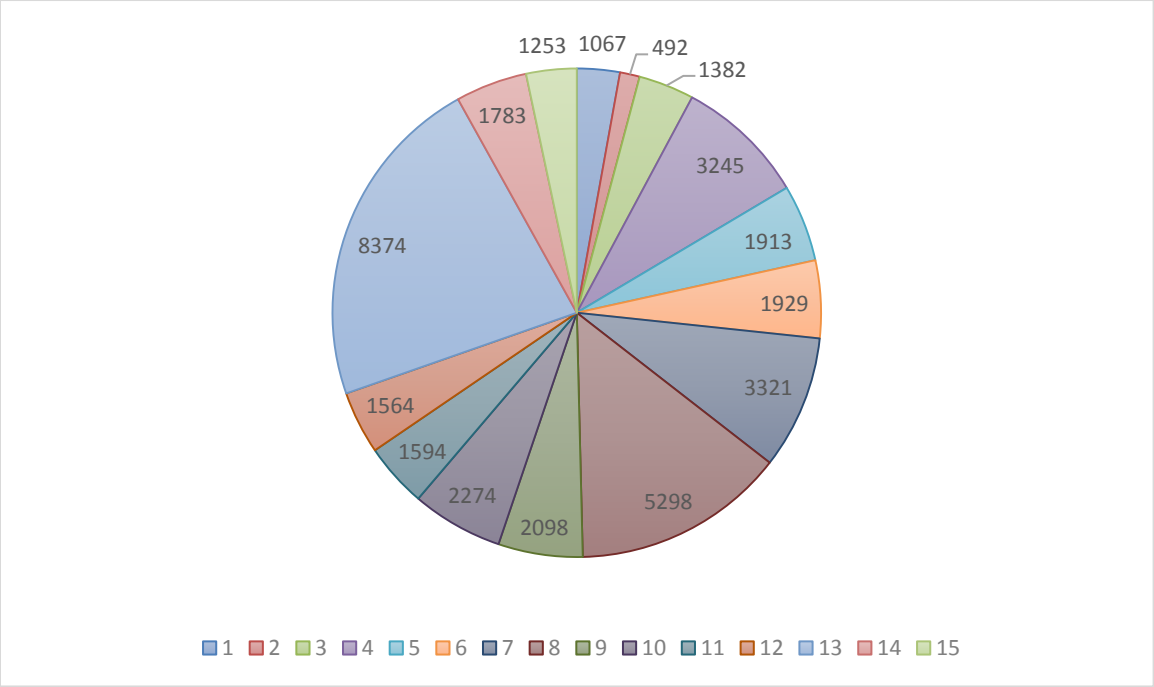


**Figura 8**: *Total de calificaciones hechas por región para las 15 regiones del país.*

*Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de la CEV del año 2018.*

Se pueden ver las calificaciones por letra, como se ha mencionado anteriormente, las calificaciones van desde la A+ que representa la máxima eficiencia energética y confort térmico, hasta la letra G (8 niveles en total), tomándose en Chile la letra E como la letra mínima aceptable para las viviendas.

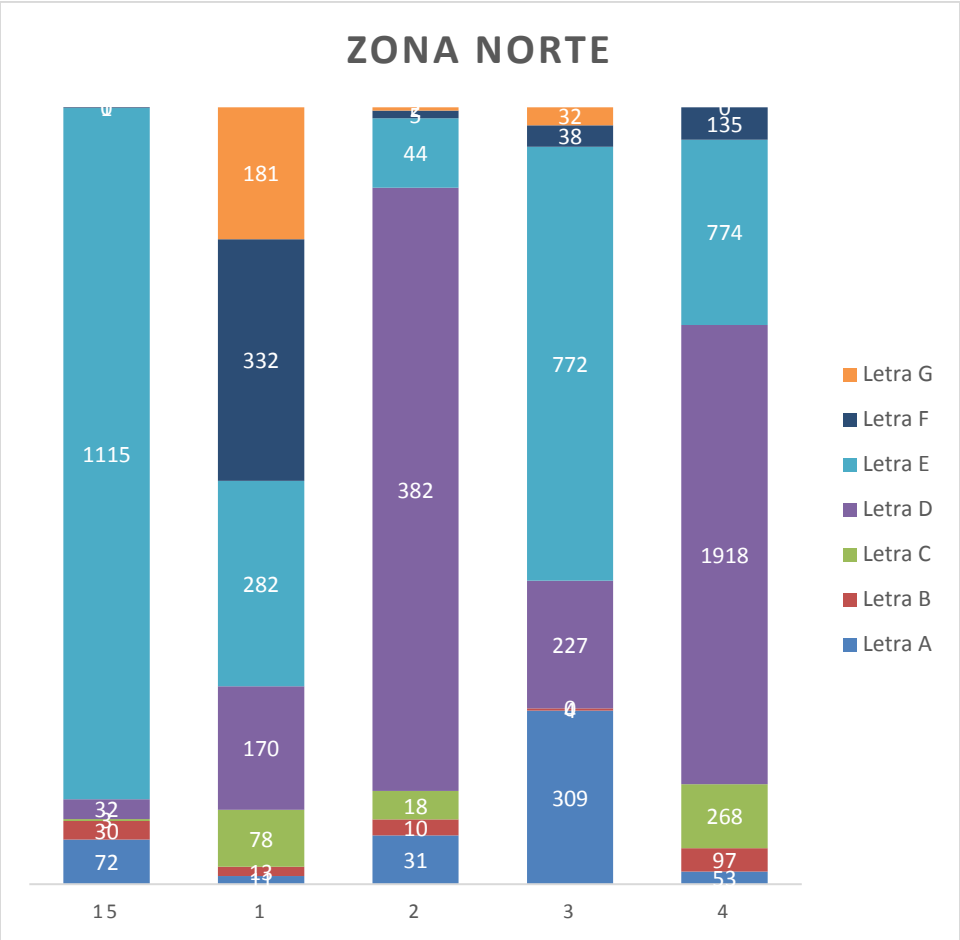


**Figura 9**: *Compilado del número de calificaciones por letra para las regiones de la zona norte.*

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por la base de datos de las viviendas calificadas por la CEV para el año 2018.*

En la Figura 8 se puede ver que existe una leve tendencia las calificaciones E y D, la región de Tarapacá (representada por el número 1) muestra la fuerte presencia de letras aún más bajas F y G. De igual modo la región de Atacama (representada por el número 3) presenta muchas más calificaciones de la letra A que otras regiones de la zona en general.

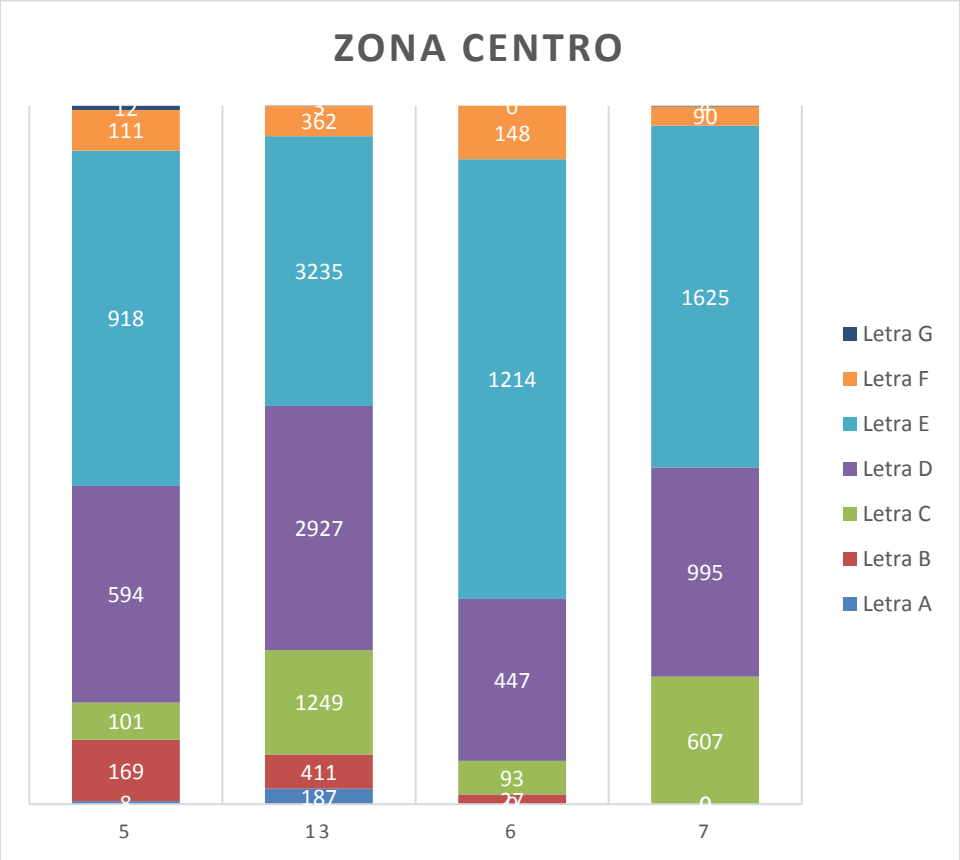


**Figura 10**: *Compilado de número de calificaciones por letra para las regiones de la zona centro.*

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por la base de datos de las viviendas calificadas por la CEV para el año 2018.*

En esta zona nuevamente se ve fuerte presencia de las letras D y E, pero también un poco más las letras C y F.

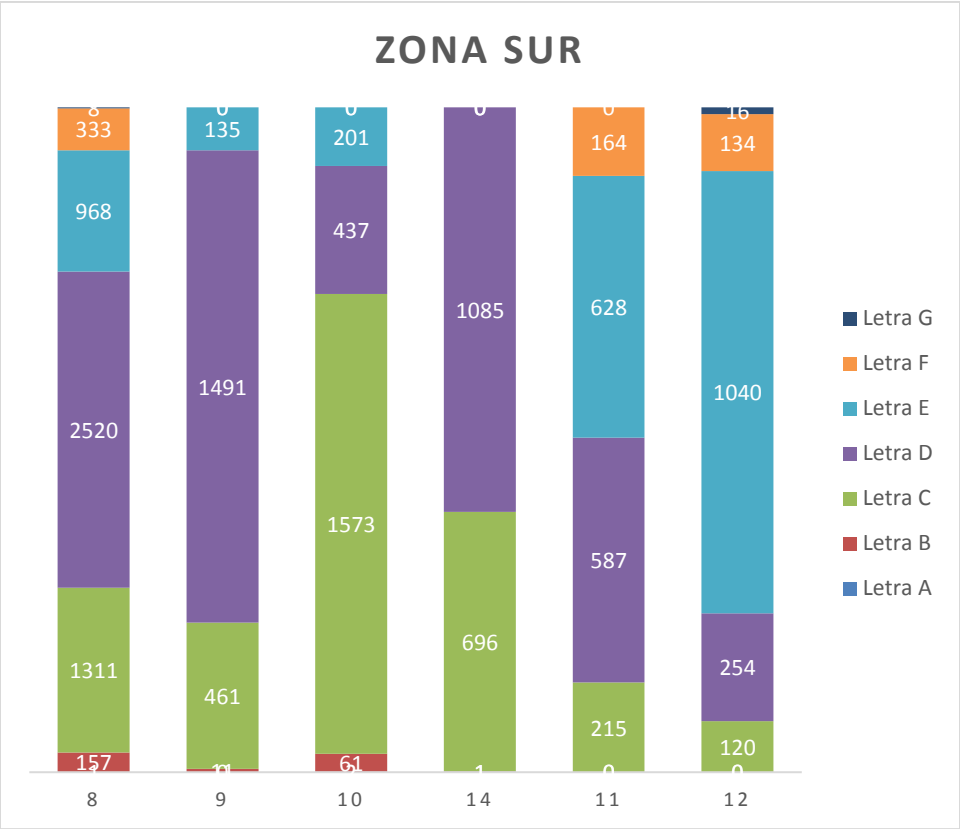


**Figura 11**: *Compilado de número de calificaciones por letra para las regiones de la zona sur.*

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por la base de datos de las viviendas calificadas por la CEV para el año 2018.*

En la zona sur, como se muestra en la Figura 10, se puede ver aún más fuertemente la presencia de la letra C, seguido por la letra D y mucho menos fuerte la letra E. Lo cual presenta un buen augurio respecto del desempeño necesario para las viviendas en cuanto a la eficiencia energética y el consumo en la zona que es mayor en comparación a la zona norte.

**Tabla 12**: *Cantidad de viviendas sociales calificadas en el país por letra.*

| | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Viviendas Sociales** | 477 | 240 | 4476 | 11662 | 11816 | 1791 | 258 |
| **Porcentaje** | 1,55% | 0,78% | 14,57% | 37,96% | 38,46% | 5,83% | 0,84% |

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por la base de datos de las viviendas calificadas por la CEV para el año 2018.*

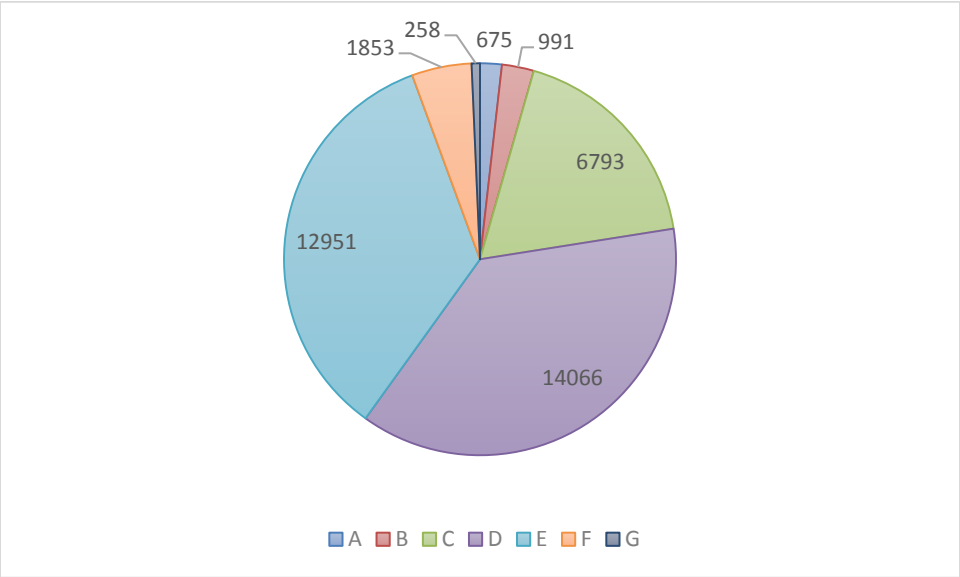


**Figura 12***: Calificaciones a nivel país para cada letra.*

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por la base de datos de las viviendas calificadas por la CEV para el año 2018.*

A pesar de que, para las viviendas sociales, las cuales representan el 81,73% de las calificaciones entregadas (correspondiendo a 30720 viviendas), la moda es la letra E, para el total de las viviendas la calificación moda es la letra D. Entre las viviendas sociales se reconoce que la mayoría de las casas cumplen con los estándares mínimos, quedando fuera

sólo un 6,67% de hogares, los cuales sufren de falta de confort térmico de manera aún más grave, quedando más expuestos a enfermedades y contaminación.

## 6.2 Selección de regiones

Como fue mencionado anteriormente, se realizó un proceso de selección de las regiones a estudiar considerando factores climatológicos y socioeconómicos.

El primer factor climatológico considerado fue la diferencia entre las temperaturas extremas promedio para la región, es decir, promedio de temperaturas máxima y promedio de temperaturas mínima. De estas temperaturas el mejor candidato será aquel que tenga mayor diferencia de temperaturas, porque de cierta forma, implica que es el más probable de tener un mayor requerimiento de climatizadores para llegar al confort térmico.

Considerando los filtros explicados anteriormente en la metodología, se tienen las diferencias de temperaturas para la zona sur del país.

**Tabla 13***: Diferencias de temperaturas promedio extremas para las regiones de la zona sur del país.*

| Capital Regional | T° mínima | T° máxima | Diferencia | Ponderación |
|---|---|---|---|---|
| **Concepción** | 8,5 | 17,7 | 9,2 | 2 |
| **Temuco** | 5,8 | 18,2 | 12,4 | 5 |
| **Valdivia** | 5,6 | 17,1 | 11,5 | 4 |
| **Puerto Montt** | 5,9 | 15 | 9,1 | 3 |
| **Coyhaique** | 4,1 | 13,4 | 9,3 | 1 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Punta Arenas** | 3 | 10,1 | 7,1 | 6 |

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por el portal de Meteorología Chile* (Dirección Meteorológica de Chile, s.f.).

Del estudio sólo de estos factores existen 3 regiones candidatas: Bío Bío (representada por Concepción), Los Lagos (representada por Puerto Montt) y Aysén (representada por Coyhaique).

Debido a que la elección únicamente basada en factores climatológicos dejaría fuera muchos aspectos importantes del comportamiento de las personas respecto del confort térmico, eficiencia energética y consumo energético, es que también se consideran factores socioeconómicos.

Entre los factores socioeconómicos se destaca el ratio cantidad de población sobre viviendas totales de la región, la cantidad de defunciones provocadas por enfermedades relacionadas con la contaminación del aire, es decir las que afectan al sistema circulatorio y sistema respiratorio, y el ingreso promedio de la región; los cuales se pueden ver en la Tabla 7.

**Tabla 14***: Ratio de densidad, población total de la región sobre cantidad de viviendas en la región.*

| **Región** | **Población/Vivienda** | | |
|---|---|---|---|
| **Bío Bío** | 2,71 | -20,45% | 6 |
| **Araucanía** | 2,51 | -0,17% | 1 |
| **Los Ríos** | 2,50 | 1,04% | 2 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Los Lagos** | 2,49 | 2,05% | 3 |
| **Aysén** | 2,31 | 20,30% | 5 |
| **Magallanes** | 2,54 | -2,75% | 4 |

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la Biblioteca del Congreso Nacional.*

**Tabla 15***: Número de defunciones por enfermedades relacionadas con contaminación del aire.*

| **Región** | **Defunciones Sist. Circulatorio** | **Defunciones Sist. Respiratorio** | **Representación respecto del total** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Bío Bío** | 3376 | 1081 | 0,2863% | -0,0610% | 5 |
| **Araucanía** | 1647 | 633 | 0,2382% | -0,0129% | 2 |
| **Los Ríos** | 734 | 233 | 0,2513% | -0,0260% | 4 |
| **Los Lagos** | 1287 | 433 | 0,2076% | 0,0177% | 3 |
| **Aysén** | 107 | 40 | 0,1425% | 0,0828% | 6 |
| **Magallanes** | 319 | 57 | 0,2258% | -0,0005% | 1 |

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la Biblioteca del Congreso Nacional.*

Una vez presentadas más en detalle la elaboración de los factores antes mencionados se puede hacer el conteo y la selección de la región.

**Tabla 16***: Resumen de la suma de puntajes para selección de región.*

| Región | Δ T° | Δ Req. | Pobl. | Viv. | Pobl. /Viv. | Salud | Ingreso | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bío Bío** | 2 | 2 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 33 |
| **Araucanía** | 5 | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 17 |
| **Los Ríos** | 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 18 |
| **Los Lagos** | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 13 |
| **Aysén** | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 30 |
| **Magallanes** | 6 | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 | 4 | 26 |

*Fuente: Elaboración propia.*

Como se mencionó anteriormente, una de las regiones seleccionadas es la región del Bío Bío, la que cuenta con el mayor puntaje y la segunda región seleccionada debería ser la región con menor puntaje, pero debido a la poca especificidad y gran dificultad para encontrar datos propios de la región es que se seleccionó la región de Los Ríos.

## 6.3 Caracterización de las viviendas evaluadas y demanda energética

### 6.3.1 Línea base: demanda energética

Para determinar la línea base se caracterizaron 3 viviendas tipo. Según la división presentada en el “Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial”, las tres regiones seleccionadas pertenecen a una misma zona, la Zona C, la que incluye las zonas térmicas 3, 4 y 5.

Se tienen los materiales por los cuales pasa el flujo de calor, la cantidad de energía necesaria para mantener el confort térmico dentro de la vivienda para un metro cuadrado de

componente de la envolvente. Luego se multiplica este metro cuadrado base, por la cantidad de metros cuadrados totales de componente de la envolvente para tipo de vivienda, con ello se obtiene la demanda energética, en kWh/año los cuales han sido presentados en la Tabla 17.

**Tabla 17***: Resumen de demandas energéticas de una vivienda promedio en línea base para cada tipo de vivienda.*

| | **Vivienda tipo 1** | **Vivienda tipo 2** | **Vivienda tipo 3** |
|---|---|---|---|
| **kWh/año** | 82455,4 | 78957,4 | 89699,9 |

*Fuente: Elaboración propia.*

La demanda energética se puede descomponer en los energéticos que caracterizan el consumo en calefacción de una vivienda promedio. Para unificar cuales son las consecuencias monetarias de las emisiones de contaminantes de cada uno de los energéticos es que se utilizan los Factores de Conversión de Emisiones.

**Tabla 18***: Resumen de Factores de Emisión por contaminantes para cada tipo de energético utilizado.*

| **kg/kWh** | **$CO_2$** | **MP** | **$NO_x$** | **$SO_x$** |
|---|---|---|---|---|
| **Gas natural** | 2,0196 *10-1 | 1,1532 *10-5 | 1,4263 *10-4 | 9,1024 *10-7 |
| **Gas licuado** | 2,3112 *10-1 | 1,0845 *10-5 | 2,0140 *10-4 | 1,5492 *10-6 |
| **Electricidad** | 4,1870 *10-1 | 0 | 0 | 0 |
| **Leña** | 0 | 2,6451 *10-3 | 3,2456 *10-5 | 2,1908 *10-4 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Kerosene** | 2,5884 *10-1 | 2,2934 *10-5 | 2,2934 *10-4 | 1,6283 *10-3 |

*Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Emissions Factors & AP 42, y Energía Abierta.*

Con estos datos se puede elaborar una línea base de demanda energética de una vivienda promedio para las zonas térmicas 3, 4 y 5. También se puede evaluar económicamente la emisión de los contaminantes por consecuencia de dicha demanda energética, ya que actualmente este es un costo social.

## 6.4 Situación esperada

Para poder hacer una evaluación económica, además de determinar la línea base, se necesita saber cuál es el valor esperado como consecuencia de la implementación de las medidas de eficiencia energética que aseguran un mejor estándar y el alcance del confort térmico.

### 6.4.1 Medidas de reducción de demanda energética

Para lograr una mayor eficiencia energética y confort térmico en las viviendas sociales se propone mejorar ciertos aspectos de la envolvente, hacerlos mucho más exigente respecto de la normativa vigente.

Las medidas seleccionadas fueron cotejadas con el stock de medidas contenidas en los documentos de la Corporación de Desarrollo Tecnológico (Cámara Chilena de la Construcción, 2010) y Romero (2011), quedando en total cuatro medidas que son asimilables entre ambos documentos:

**Tabla 19***: Resumen de las medidas de eficiencia energética comparadas entre documentos.*

| | **Corp. Desarrollo Tecnológico** | **Romero** |
|---|---|---|
| **Medida 1** | Ventana Doble Vidriado Hermético (termo panel) U=3,1 [W/m$^2$K] | Ventana U=3,1 [W/m$^2$K], con DVH o doble ventana |
| **Medida 2 y 3, respectivamente** | Muro 2 [cm] de aislación adicionales | Muro 20 mm aislación Poliestireno Expandido 15 [kg/m$^3$] |
| **Medida 4 y 5, respectivamente** | Techumbre 5 [cm] de aislación adicionales | Techo 60 mm aislación Lana de Vidrio 13,1 [kg/m$^3$] |
| **Medida 5 y 6, respectivamente** | Piso medianamente aislado con kt=1,2 [W/mK] | Piso $k_L$=1,2 [W/mK] |

*Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, las medidas seleccionadas fueron:

- Medida 1: Recambio de ventanas a doble vidriado hermético (termo panel), con cámara de aire de 6 mm, cuya transmitancia sea de 3,1 [W/m$^2$K]
- Medida 2: Agregar poliestireno expandido de 5 [cm] de espesor como aislante térmico para los muros de forma interna
- Medida 3: Agregar poliestireno expandido de 5 [cm] de espesor como aislante térmico para el tejado de forma externa

- Medida 4: Agregar poliestireno expandido de 3 [cm] de espesor como aislante térmico para el piso

### 6.4.2 Caracterización económica de las medidas

Cada una de las medidas seleccionadas fue cuantificada económicamente, como se mencionó anteriormente, utilizando el software de CYPE Ingenieros y los valores de mercado presentados por Sodimac, obteniéndose los siguientes resultados.

#### 6.4.2.1 Medida 1

La medida de eficiencia energética 1, considera que se debe hacer un cambio de ventanas, es decir, la vivienda ya tiene ventanas monolíticas y estas serán cambiadas por ventanas de doble vidriado con transmitancia térmica 3,1 [W/m$^2$K]. Para ello se debe considerar tanto la mano de obra de sacar las ventanas que ya existían como de colocar las nuevas ventanas.

Se tiene, para cada metro cuadrado de doble vidriado:

- Subtotal de materiales CLP $73.207
- Subtotal de mano de obra CLP $3.975
- Subtotal de herramientas CLP $1.543

Obteniéndose un total de CLP $78.726. Además, se debe considerar un cargo de otros CLP $3.975 por cada metro cuadrado de ventana retirado.

#### 6.4.2.2 Medida 2

La medida de eficiencia energética 2, consiste en añadir aislación a todos los muros que son parte de la envolvente de la vivienda. Como aislante se utilizarán planchas de poliestireno expandido de 15 [kg/m$^3$] de densidad, con un espesor de 0,05 [m]. Además, se incluye una barrera de vapor el cual combate la humedad que se encapsula dentro de la vivienda por concepto de aislación.

Para cada metro cuadrado de muro con aislante y barrera de vapor, se tiene:

- Subtotal de materiales CLP $5.136
- Subtotal de mano de obra CLP $1.105
- Subtotal de herramientas CLP $125

Con todo esto se obtiene un total de CLP $6.366.

Para la barrera de vapor se utilizará una lámina de aluminio, el valor comercial de esta es de CLP $3.690, a la cual no se le agrega costos de mano de obra y herramientas, puesto que se consideran parte de los subtotales presentados anteriormente.

#### 6.4.2.3 Medida 3

La medida de eficiencia energética 3, consiste en añadir aislación a la techumbre de la vivienda. Al igual que para la Medida 2, se utilizarán planchas de poliestireno expandido de 15 [kg/m3] de densidad, con espesor de 0,05[m], también se añadirá el uso de la barrera de vapor.

Para cada metro cuadrado de techo con aislante y barrera de vapor, se tiene:

- Subtotal de materiales CLP $8.027
- Subtotal de mano de obra CLP $834
- Subtotal de maquinaria y herramientas CLP $187

Con esto se obtiene un total de CLP $9.047. Y al igual que en la Medida 2, es necesario agregar el valor de la lámina de aluminio que actuará como barrera de vapor, cuyo único gasto extra es de CLP $3.690 por concepto de materiales.

#### 6.4.2.4 Medida 4

Finalmente, la medida de eficiencia energética número 4, consiste en agregar al piso ventilado un aislamiento de poliestireno expandido de 15 [kg/m$^3$] de densidad, esta vez con un espesor de 0,03 [m] y la barrera de vapor.

Con esto, para cada metro cuadrado de piso con aislante, se tiene:

- Subtotal de materiales CLP $2.795
- Subtotal de mano de obra CLP $1.018
- Subtotal de herramientas CLP $76

Todo esto en total entrega un costo de CLP $3.889. A lo que se agrega, como se ha hecho con las medidas anteriores, el valor de la lámina de aluminio correspondiente a CLP $3.690.

### 6.4.3 Reducción de la demanda energética

Con estas medidas de eficiencia energética seleccionadas se obtiene una reducción de la demanda energética contundente. Al volver a hacer el cálculo del flujo de calor a través de los elementos de la envolvente ahora con aislante, se obtienen los valores presentados en la Tabla 20.

**Tabla 20***: Resumen de demandas energéticas de una vivienda promedio en la situación esperada para cada tipo de vivienda.*

| | **Vivienda Tipo 1** | **Vivienda Tipo 2** | **Vivienda Tipo 3** |
|---|---|---|---|
| **kWh/año** | 11100,5 | 9510,0 | 11659,3 |

*Fuente: Elaboración propia.*

Con estos resultados, se pueden cuantificar las disminuciones para cada tipo de vivienda. Para la Vivienda Tipo 1 se tiene una disminución en demanda energética de 71355 [kWh/año], en la Vivienda Tipo 2 la disminución es de 69447,3 [kWh/año] y en la Vivienda Tipo 3 es de 78040,5 [kWh/año].

Para mostrar la importancia de agregar aislación a los elementos Techo y Muros que corresponden a los porcentajes de mayor pérdida de calor, mostrados anteriormente, se tiene que el flujo de calor en [W] a través de estos disminuye en casi 100 unidades por metro cuadrado.

## 6.5 Ahorro económico

Luego para cuantificar el ahorro económico del Estado se deben llevar estos resultados mostrados en [kWh/año], a [kg] de contaminantes por tipo de energético.

Se tienen los [kWh/año] por tipo de energético tanto de la Línea Base como de la Situación Esperada, para calcular los [kg] de contaminantes simplemente se obtiene la diferencia entre ambas y se multiplica por los factores de emisión presentados en la Tabla 18.

**Tabla 21***: Resumen de la diferencia entre línea base y situación esperada para cada contaminante al año por tipo de vivienda.*

| | kg $CO_2$/año | kg MP/año | kg $NO_x$/año | kg $SO_x$/año |
|---|---|---|---|---|
| **Vivienda Tipo 1** | 7394,909 | 113,149 | 6,022 | 11,472 |
| **Vivienda Tipo 2** | 7197,209 | 110,124 | 5,861 | 11,165 |
| **Vivienda Tipo 3** | 8087,766 | 123,751 | 6,587 | 12,547 |

*Fuente: Elaboración propia.*

En la Tabla 21 se presenta la suma de los [kg] de contaminante para todos los energéticos presentados, para cada Vivienda Tipo (el detalle se puede revisar en los anexos A, Tablas 22 a la 24). Luego, para poder utilizar los precios presentados en la Tabla 11 para los contaminantes, se pasan de kilogramos a toneladas, obteniéndose así los costos representativos de contaminar el aire, que, en este caso, se tomarían como ahorros ya que esta cantidad de contaminante es la que no se está emitiendo al implementar las medidas de eficiencia energética y térmica.

Una vez que se tienen todos los importes en USD, se pueden sumar y dejar sólo un valor por concepto de contaminantes para cada tipología de vivienda. Para la Vivienda Tipo 1 se tiene un ahorro de $236,7 USD al año, para la Vivienda Tipo 2 un ahorro de $230,4 USD al año y para la Vivienda Tipo 3 un ahorro de $258,9 USD al año.

## 6.6 Flujo de caja

Finalmente, para hace la evaluación económica, como se había mencionado anteriormente, se realiza un flujo de caja. Para determinar el periodo de evaluación se

determina que la vida útil de las mejoras en promedio es de 20 años, luego de estos 20 años se requeriría una reinversión por concepto de mantención a las medidas.

Se utilizará la tasa de descuento social que corresponde al 6% (Ministerio de Desarrollo Social, 2018).

Se considerarán los costos de las mejoras como la inversión que se desea realizar, en el año 0. El proyecto a evaluar abarcará las tres Viviendas Tipo, con esto se obtiene una inversión total de $12.838,5 USD, para obtener este valor en dólares se utilizó el dólar del día 7 de octubre de 2019 (SII, 2019) que se registró en $715,53 CLP.

Luego se tomará como ingreso anual, los ahorros anuales consecuencia de la disminución en la emisión de contaminantes por las mejoras en cada tipo de vivienda, lo que en total da $726,1 USD al año.

Considerando todos estos datos, se tiene como resultado un VAN de - $4.255,26 USD, con un Payback al año 18 (ver anexo A, Tabla 25).

Ahora bien, a este flujo de caja se le pueden agregar factores en los que también invierte el Estado para lograr el confort térmico actualmente y que en un futuro podría dejar de existir, si desde el momento de construcción de una vivienda social estas medidas de eficiencia térmica estuvieran incluidas. El factor más importante actualmente vigente es el subsidio que entrega el Programa de Protección del Patrimonio Familiar, el cual va dirigido a facilitar el acceso a mejoras para las viviendas de las familias del 40% más pobre del país. El monto máximo al que puede acceder una familia es de 150 UF. Para agregar este valor a la evaluación económica se toma como supuesto que en promedio las familias se adjudican el 30% del valor máximo del subsidio, con esto se tiene que el monto promedio adjudicado es de $1.764,8 USD, correspondiente al valor del subsidio para una vivienda.

Si este valor se multiplica por 3, ya que el proyecto considera las 3 viviendas tipo, se tiene un monto total de $5.294,4 USD como ahorro potencial del Estado, el cual para ser reflejado en un flujo de caja se toma como parte de los ingresos en el año 0.

Con esta nueva información, si se vuelve a evaluar un flujo de caja a 20 años, con una tasa de descuento del 6%, se tiene un VAN de $739,47 USD y Payback al año 11 (ver anexo A Tabla 26).

## 6.7 Consecuencias no cuantificables

Existen una serie de consecuencias que afectan las arcas del Estado que son difíciles de cuantificar, a partir de aplicar las mejoras de eficiencia energética y térmica.

Una de las más importantes que se mencionaba anteriormente es la reducción de enfermedades por contaminación del aire, la que se revisará más en detalle más adelante, también se tienen la disminución de gastos en calefacción, de condensación y humedad dentro de la vivienda (que también trae como consecuencia otro tipo de enfermedades), mayor seguridad, durabilidad y valor agregado del inmueble.

En cuanto a la potencial reducción de enfermedades a raíz de la contaminación del aire interior de la vivienda, este aspecto tiene varias aristas: la mortalidad prematura, admisiones hospitalarias y visitas a salas de emergencias, licencias médicas y trabajo restringido. En la Tabla 6 se hace mención de la cantidad de USD asociados a cada uno de estos puntos, principalmente por enfermedades relacionadas con los sistemas respiratorio y circulatorio.

Con una reducción promedio aproximada del 87% de las emisiones de contaminantes tras la aplicación de las medidas de eficiencia térmica, esto definitivamente significaría una

reducción de enfermedades a causa de la contaminación del aire, ya que las personas estarían menos tiempo expuestas a la contaminación interna de los hogares. Existe una gran cantidad de personas que pasan más de 12 horas expuestas a la contaminación del aire en un hogar, los cuales serían cerca del 42% de la población en Chile (Instituto Nacional de Estadísticas b, s.f.).

# 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al analizar todo el proceso de construcción de esta evaluación económica para las medidas de eficiencia térmica que se proponen como una mejora a los estándares actuales de reglamentación térmica de las viviendas en Chile, particularmente de las viviendas sociales, se mencionan diferentes aspectos que son importantes a destacar. En primer lugar, la inversión que no sólo hacen las familias, sino principalmente el Estado al financiar distintos tipos de subsidios, materiales, programas y planes en los sectores de salud y vivienda; inversión que podría ser menor o más eficientemente utilizada si es que se proponen objetivos más ambiciosos.

A partir de las caracterizaciones de las viviendas en Chile, lo primero que se puede ver es que las exigencias térmicas y energéticas están al debe en materia de eficiencia puesto que en general las Calificaciones Energéticas de Vivienda para las viviendas sociales estaban mayoritariamente entre las letras C y E, rozando el límite del mínimo aceptable, donde existe la tendencia a que las viviendas sociales suelen tener una calificación energética menor, por lo tanto, exponen a una población con escasos recursos a una baja calidad energética y térmica, lo que como se pudo ver trae consecuencias indirectas como enfermedades y mayores gastos en calefacción.

En cuanto al requerimiento de calefacción y la selección de regiones para las cuales hacer una representación del contexto país, se puede concluir que es necesario expandir este estudio de la evaluación económica a la aplicación de medidas de eficiencia a todas las regiones puesto que, si bien se intentó seleccionar regiones con demandas energéticas importantes, cada región y zona de Chile tiene aspectos distintos que deben ser estudiados y problemáticas de confort térmico que deben ser tratadas y que no son abarcadas al examinar

únicamente las zonas centrales y sur. Sin embargo, se pudo hacer una actualización general de los aspectos económicos evaluados en los documentos “Usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile” y la memoria de título “Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción”, los cuales presentan un análisis y evaluación económica de la aplicación de medidas de eficiencia energética en el contexto de un Chile de hace 10 años atrás, el cual no tenía en mente cambiar su matriz energética completamente a fuentes renovables al año 2050, ni se estaba enfrentando al escenario de emergencia que se vive hoy en día con la crisis climática mundial y las grandes acciones que deben tomar las Naciones en el mundo para hacer frente a la solución que se necesita.

Respecto de las medidas seleccionadas dentro del presente documento, estas se pueden considerar suficientes para alterar de manera contundente el comportamiento de la envolvente de una vivienda, sin embargo, se podría tomar este como un ejemplo base para proponer medidas más elaboradas, las cuales lleven al mejor uso de recursos económicos y mayor eficiencia al aplicar soluciones más innovadoras. Las consecuencias de ahorro en alrededor de un 87% por concepto de eficiencia térmica tras la aplicación de las medidas (de forma teórica) indican que se tiene un buen comportamiento de los materiales para cubrir las necesidades presentadas, sin importar mayormente el tipo de vivienda en él se estén aplicando las medidas.

En cuanto a la evaluación económica sobre la aplicación de las medidas, esta entrega una respuesta levemente ambigua ya que no es del todo posible cuantificar dentro del flujo de caja mismo, cada uno de los aspectos en los que el Estado estaría ahorrando por concepto de mejoras a las viviendas sociales.

El primer flujo de caja presentado tiene flujos netos positivos a partir del año 18 en un horizonte de 20 años y un VAN negativo, lo cual no es muy alentador si de convencer económicamente de la inversión se trata. Sin embargo, esta evaluación sólo está considerando ahorros por concepto de emisión de contaminantes (por sus respectivos precios sociales). Queda en la palestra determinar el precio social de cada enfermedad generada a una persona que habita en una vivienda social de baja calidad a partir de la emisión de estos contaminantes, si bien este cálculo se pretende insinuar al mostrar los costos sociales en los que incurre el Estado por conceptos de mortalidad prematura, admisiones hospitalarias, licencias médicas y días perdidos, estos gastos no son comparables con los presentados al evaluar un proyecto de tres viviendas tipo en Chile.

En el segundo flujo de caja se pretende sensibilizar el análisis incluyendo un factor que si es cuantificable y totalmente contingente al proyecto evaluado el cual es el subsidio que hace el Estado a familias de niveles socioeconómicos bajos a través del Proyecto de Protección del Patrimonio Familiar, el cual financia hasta 150 UF para diversas mejoras que se puedan hacer a las viviendas. Con este ya queda en evidencia que al agregar cualquier otro tipo de gasto que hace el Estado, incluso de forma indirecta, si va a ser conveniente hacer una inversión inicial en mejorar los estándares y exigencias térmicas de las viviendas sociales, ya que, de forma estrictamente económica, se tiene un VAN positivo al final del horizonte de evaluación.

Es importante cerrar con la idea de que, si bien económicamente se puede ver una tendencia a que es un proyecto rentable para el Estado de Chile, existen múltiples beneficios no económicos (muchos de ellos como el confort térmico que no tienen actualmente bien definido un costo social) que deben ser ponderados por el Estado puesto que el fin último de éste debe ser propiciar una buena calidad de vida a las personas y debe hacer frente a las

necesidades actuales del mundo, al cual urge un compromiso radical con la eficiencia en el consumo de energéticos (entre varias otras medidas).

# 8. REFERENCIAS


Biblioteca del Congreso Nacional. (s.f.). *Biblioteca del Congreso Nacional*. Recuperado el mayo de 2019, de https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/regiones

Biblioteca del Congreso Nacional. (s.f.). *Ley Chile*. Recuperado el 6 de agosto de 2018, de www.leychile.cl/Consulta/listado_n_sel?_grupo_aporte=&sub=643&agr=1046&comp=>

Bulkeley, H. (2015). Can cities realise their climate potential? Reflection on COP21 Paris and beyond. *Local Environment 20 (11)*, 1405 - 1409. Obtenido de www.researchgate.net/publication/283845277_Can_Cities_Realise_their_Climate_Potential_Reflections_on_COP21_Paris_and_beyond

Bustamante, W., Rozas, Y., Cepeda, R., Encinas, F., & Martínez, P. (2009). *Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social.* (M. D. Energética, Ed.) Santiago , Chile.

Cámara Chilena de la Construcción . (2010). Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial.

Celis , F., Garcia, R., Trebilcock, M., Escorcia, O., Miotto, U., & Díaz, M. (2012). Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile. *Arquitetura revista, 8*(1), 62 - 75.

Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa* (4ta ed.). Mc Graw Hill.

Department of Communities and Local Government. (2016). Improving the energy efficiency of our buildings: Local Weights and Measures Authority guidance for the enforcement of the requirements of the Energy Performance of Buildings (England and Wales) Regulations 2012 (as amended). Obtenido de

www.gov.uk/government/publications/local-weights-and-measures-guidance-for-energy-certificates-and-air-conditioning-inspections-for-buildings

Díaz, G. (2012). El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad 37(2)*, 227 - 241.

Dirección Meteorológica de Chile. (s.f.). *Climatología MeteoChile*. Recuperado el mayo de 2019, de https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/productos/RE7003

Haringey London. (s.f.). Obtenido de https://www.haringey.gov.uk/environment-and-waste/going-green/green-home-improvements/heat-loss-homes

Herrán, C. (2012). El cambio climático y sus consecuencias para América Latina. *Bolsa de Comercio de Rosario*, 6 - 10.

Impuesto Verde - Modificación según proyecto de ley "Modernización Tributaria", Artículo 8 original Ley 20780 (2017).

Instituto Nacional de Estadística. (22 de 12 de 2017). *Emol*. Recuperado el 2019, de https://www.emol.com/noticias/Economia/2017/12/22/888510/El-nuevo-mapa-de-la-poblacion-en-Chile-Revisa-los-datos-del-Censo-comuna-por-comuna.html

Instituto Nacional de Estadísticas. (s.f.). *Regiones INE*. Recuperado el mayo de 2019, de https://regiones.ine.cl/

Instituto Nacional de Estadísticas. (s.f.). *Resultados Censo 2017*. Recuperado el Octubre de 2019, de http://resultados.censo2017.cl/

International Energy Agency OECD. (2012). *Energy Efficiency Policy Developments.*

International Energy Agency OECD. (2018). Perspectives for the Energy Transition: The Role of Energy Efficiency. París: IEA Publications.

Knudstrup, M., Hansen, H., & Brunsgaard, C. (2009). Approaches to the design of sustainable housing with low CO2 emission in Denmark.

Krellenberg, K., Müller, A., Welz, J., Nagel, J., Bräutigam, R., Kopfmüller, J., . . . Stelzer, V. (2012). *Clima Adaptación Santiago.* Santiago : Helmholtz Centre for Environmental Research UFZ.

Miller, G. (2007). Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral. *8va*. México: Editores Internacional Thomson.

Ministerio de Desarrollo Social. (Febrero de 2018). Precios Sociales. Santiago.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (s.f.). *Observatorio Social*. Recuperado el mayo de 2019, de http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen-multidimensional/casen/casen_2015.php

Ministerio de Energía, División de Eficiencia Energética. (2017). *Informe técnico estándar mínimo de eficiencia energética: Equipo de aire acondicionado.*

Ministerio del Medio Ambiente. (2018). Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente.

MINVU - Instituto de la construcción. (2007). Manual de aplicación: Reglamentación Térmica Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones Artículo 4.1.10. Obtenido de http://www.minvu.cl/incjs/download.aspx?glb_cod_nodo=20070402125030&hdd_nom_archivo=Manual_Parte1.pdf

MINVU - MMA- MINENERGÍA - MOP. (2013). Estrategia Nacional de Construcción Sustentable. Obtenido de http://csustentable.minvu.gob.cl/

MINVU. (Febrero de 2018). Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile Tomo II Energía. *2da* . Obtenido de http://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/EST%C3%81NDARES-DE-CONSTRUCCI%C3%93N-SUSTENTABLE-PARA-VIVIENDAS-DE-CHILE-TOMO-II-ENERGIA.pdf

MINVU. (s.f.). *Calificación Energética*. Recuperado el enero de 2019, de https://www.calificacionenergetica.cl/principales-indicadores-de-la-cev/

Naciones Unidas. (s.f.). *Sustainable Development Goals*. Recuperado el Agosto de 2019, de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/

Naciones Unidas. (s.f.). *Sustainable Development Goals*. Recuperado el Agosto de 2019, de www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/

Noailly, J. (2012). Improving the energy efficiency of buildings: The impact of environmental policy on technological innovation. Obtenido de www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988311001459

OECD - IEA - NEA - ITF. (2015). Aligning Policies for a Low-Carbon Economy. Paris: OECD Publishing.

Organización Mundial de la Salud. (8 de mayo de 2018). Contaminación del aire de interiores y salud. Obtenido de https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health

Ponce-Cruz, Y., & Cantú-Martínez, P. (2012). Cambio climático: bases científicas y escepticismo. *CULCyT Cultura Científica y Tecnológica (46), 9*, 5 - 12.

Ramírez, V., & Serpell, A. (2011). Certificación de la calidad de viviendas en Chile: Análisis comparativo con sistemas internacionales. *Revista de la construcción (1), 11*, 134 - 144.

Romero , N. (Marzo de 2011). Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción. Santiago, Chile.

SII. (Octubre de 2019). *Servicio de Impuestos Internos*. Obtenido de http://www.sii.cl/valores_y_fechas/dolar/dolar2019.htm

Unet. (s.f.). *Fenómenos de Transporte: Transferencia de calor*. Obtenido de http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-165.htm

Van Buskirk, R., Kantner , C., Gerke, B., & Chu, S. (2014). A retrospective investigation of energy efficiency standards: policies may have accelerated long term declines in appliance costs. *Environmental Research Letters*(9). Obtenido de http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/11/114010/meta

# 9. ANEXOS

## 9.1 Anexo A: Tablas

**Tabla 22***: Descomposición de los [kg] de contaminante por año para cada energético componente de la demanda energética de una Vivienda Tipo 1.*

| Energético | [kWh/año] | [kg $CO_2$/año] | [kg MP/año] | [kg $NO_x$/año] | [kg $SO_x$/año] |
|---|---|---|---|---|---|
| **Gas natural** | 4352,654 | 879,061 | 0,050 | 0,621 | 0,004 |
| **Gas licuado** | 18480,939 | 4271,311 | 0,200 | 3,722 | 0,029 |
| **Electricidad** | 4566,719 | 1912,085 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| **Leña** | 42670,276 | 0,000 | 112,869 | 1,385 | 9,348 |
| **Kerosene** | 1284,390 | 332,451 | 0,029 | 0,295 | 2,091 |

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 23***: Descomposición de los [kg] de contaminante por año para cada energético componente de la demanda energética de una Vivienda Tipo 2.*

| Energético | [kWh/año] | [kg $CO_2$/año] | [kg MP/año] | [kg $NO_x$/año] | [kg $SO_x$/año] |
|---|---|---|---|---|---|
| **Gas natural** | 4236,287 | 855,560 | 0,049 | 0,604 | 0,004 |
| **Gas licuado** | 17986,860 | 4157,120 | 0,195 | 3,623 | 0,028 |
| **Electricidad** | 4444,629 | 1860,966 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| **Leña** | 41529,506 | 0,000 | 109,852 | 1,348 | 9,098 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Kerosene** | 1250,052 | 323,563 | 0,029 | 0,287 | 2,036 |

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 24***: Descomposición de los [kg] de contaminante por año para cada energético componente de la demanda energética de una Vivienda Tipo 3.*

| **Energético** | **[kWh/año]** | **[kg $CO_2$/año]** | **[kg MP/año]** | **[kg $NO_x$/año]** | **[kg $SO_x$/año]** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Gas natural** | 4760,471 | 961,424 | 0,055 | 0,679 | 0,004 |
| **Gas licuado** | 20212,490 | 4671,507 | 0,219 | 4,071 | 0,031 |
| **Electricidad** | 4994,592 | 2091,236 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| **Leña** | 46668,220 | 0,000 | 123,444 | 1,515 | 10,224 |
| **Kerosene** | 1404,729 | 363,600 | 0,032 | 0,322 | 2,287 |

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 25**: *Flujo de caja para las tres viviendas tipo con aplicación de medidas de eficiencia térmica.*

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Inversión en Mejoras | $ 12.838,5 | | | | | | | | |
| Ahorro Anual por E. C. | | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 |
| Beneficio Neto | $ -12.838,5 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 |
| Acumulado | $ -12.838,5 | $ -12.112,5 | $ -11.386,4 | $ -10.660,3 | $ -9.934,3 | $ -9.208,2 | $ -8.482,1 | $ -7.756,1 | $ -7.030,0 |

| | |
|---|---|
| Tasa de descuento | 6% |
| VAN | $-4.255,26 |
| Payback | 18 |

| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 |
| $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 |
| $ -6.303,9 | $ -5.577,8 | $ -4.851,8 | $ -4.125,7 | $ -3.399,6 | $ -2.673,6 | $ -1.947,5 | $ -1.221,4 | $ -495,4 | $ 230,7 | $ 956,8 | $ 1.682,8 |

**Tabla 26**: *Flujo de caja para las tres viviendas tipo con aplicación de las medidas de eficiencia térmica y subsidio del Estado.*

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Inversión en Mejoras | $ 12.838,5 | | | | | | | | |
| Ahorro Potencial de Subsidio | $ 5.294,4 | | | | | | | | |
| Ahorro Anual por E. C. | | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 |
| Beneficio Neto | $ -7.544,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 |
| Acumulado | $ -7.544,1 | $ -6.818,0 | $ -6.092,0 | $ -5.365,9 | $ -4.639,8 | $ -3.913,8 | $ -3.187,7 | $ -2.461,6 | $ -1.735,6 |

| | |
|---|---|
| Tasa de descuento | 6% |
| VAN | $739,47 |
| Payback | 11 |

| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 |
| $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 | $ 726,1 |
| $ -1.009,5 | $ -283,4 | $ 442,6 | $ 1.168,7 | $ 1.894,8 | $ 2.620,9 | $ 3.346,9 | $ 4.073,0 | $ 4.799,1 | $ 5.525,1 | $ 6.251,2 | $ 6.977,3 |