UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Edificación

Departamento Construcciones Arquitectónicas y su Control

Variables técnicas y económicas asociadas al acondicionamiento
térmico de viviendas: Una mirada centrada en el desempeño de la
vivienda social chilena

TESIS DOCTORAL

Autor:

Héctor Hernández López

Magíster en Construcción

Tutores:

Dra. Inmaculada Martínez Pérez

Dr. Alfonso Cobo Escamilla

JUNIO – 2020

Tribunal nombrado por el Mgfc. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 20.....

Presidente:.....

Vocal:.....

Vocal:.....

Vocal:.....

Secretario:.....

Suplente:.....

Suplente:.....

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 20..... en la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid.

*Dedicado a mi familia,
Especialmente a mi abuelo*

.

Resumen

La presente investigación se centra en el estudio de variables económicas y técnicas relacionadas al acondicionamiento térmico en viviendas, especialmente en viviendas sociales chilenas. La metodología de trabajo comienza mediante una revisión bibliográfica, en la que se estudia la relación existente entre las necesidades de confort térmico del ser humano, la energía demandada para calefaccionar y el entorno climático que incide en las edificaciones. A continuación, se estudian los métodos para medir el impacto ambiental de las edificaciones mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), para estimar la energía demandada por la vivienda en condiciones de confort térmico y evaluar las inversiones de eficiencia energética en las viviendas. Se analizan cuatro casos de estudio cuyos resultados implican que una vivienda social chilena está lejos de ser confortable y eficiente energéticamente, respondiendo en su mayoría a edificaciones convencionales que demandan más de 120kWh/m^2 de energía primaria total al año. La muestra analizada, determina que se trata de edificaciones que requieren rehabilitación para alcanzar demandas para calefacción menores a 15kWh/m^2 al año, mostrando una elevada irrevocabilidad económica al momento de cambiar los atributos físicos que derivan de una asignación inicial de recursos y cuya evaluación económica de inversiones en reacondicionamiento resultan ser circunstanciales.

Dentro de los casos analizados se modeló una vivienda social chilena característica, para la cual se determinó la demanda acumulada de energía (CED), se calcularon las emisiones de efecto invernadero (GHG) y se evaluaron económicamente opciones de reacondicionamiento y de eficiencia energética en tres zonas climáticas muy diferentes de Chile: Antofagasta (23.64°S), Santiago (33.44°S) y Concepción (36.83°S). La vivienda social de $50,5\text{m}^2$ modelada en Santiago (ciudad con mayor número de viviendas y que está ubicada en la Zona Z3 según la actual regulación térmica chilena), con muros en albañilería y resto envolvente típica, resultó con una demanda de energía de calefacción anual de $104,55\text{ kWh/m}^2$, mostrando un tiempo no confortable durante el 40,1% del año, liberando $1664\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2/50\text{años}$ y mostrando una demanda de energía acumulada de $5934\text{kWh/m}^2/50\text{años}$. Cuando

esta vivienda es evaluada con muros estructurados en madera aislados térmicamente, las emisiones y la energía acumulada caen en 11,5% y 10,4% respectivamente, mostrando además una disminución del TNC de 17,3% y que la energía y carbono incorporados caen en 32% y 35,6% respectivamente. Claramente estos resultados confirman cuán importante es la definición de la envolvente de la vivienda.

Por otro lado, en un intento por mejorar el desempeño energético y sustentable de la vivienda social estructurada en albañilería, se evaluaron dos tipos de reacondicionamiento térmico, uno tradicional (con sistemas constructivos y precios asequibles) y otro que responde a criterios para viviendas pasivas o edificios de consumo energético ultra bajos (ULEB). Los resultados para el reacondicionamiento que responde a criterios de viviendas pasivas mostraron que las viviendas reacondicionadas en las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción, prácticamente prescindían de energía para calefaccionar durante el año (0 kWh/m² año, 3,91 kWh/m² año y 1,66kWh/m² respectivamente), evidenciando el potencial para conseguir viviendas altamente eficientes en estas zonas. Sin embargo, bajo un escenario futuro esperado para los precios de energía, horizontes entre 10 y 20 años y un costo de capital real bajo (3,5%), la evaluación económica mostró la conveniencia del reacondicionamiento tradicional por sobre el que responde a criterios para viviendas pasivas. Finalmente se concluye, en base al análisis de los resultados y a los requerimientos de sostenibilidad en edificaciones, que debieran ser preferidos los sistemas constructivos de muros estructurados en madera y aislados térmicamente en lugar de muros de albañilería en viviendas sociales.

Abstract

This research focuses on the study of economic and technical variables related to thermal conditioning in dwellings especially in Chilean social housing. The work methodology begins with a bibliographic review, in which the relationship between human thermal comfort needs, the energy demanded for heating and the climatic environment that affects buildings is studied. Following, the methods to measure the environmental impact of buildings are studied through Life Cycle Analysis (LCA), to estimate the energy demanded by the dwelling in conditions of thermal comfort and to evaluate the energy efficiency investments in housings. Four case studies are analyzed whose results imply that a Chilean social housing is far from being comfortable and energy efficient, responding mostly to conventional buildings that demand more than 120 kWh / m² of total primary energy per year. The sample analyzed, determines that these are buildings that require refurbishment to achieve heating demands of less than 15 kWh / m² per year, showing a high economic irreversibility at the moment of changing the physical attributes that derive from an initial allocation of resources and whose economic evaluation of investments in reconditioning turn out to be circumstantial.

Among the cases analyzed, a characteristic Chilean social housing was modeled, for which the accumulative energy demand (CED) was determined, greenhouse emissions (GHG) were calculated, and retrofitting and energy efficiency options were economically evaluated in three very different climatic zones of Chile: Antofagasta (23.64°S), Santiago (33.44°S) and Concepción (36.83°S). The 50.5m² social housing modeled in Santiago (the city with the largest number of dwellings and which is located in Zone Z3 under current Chilean thermal regulation), with masonry walls and a typical surrounding envelope, resulted in an annual energy demand for heating of 104.55 kWh / m², showing a time non comfortable during 40.1% of the year, releasing 1664kgCO₂eq / m² / 50 years and showing a cumulative energy demand of 5934kWh / m² / 50 years. When this dwelling is evaluated with thermally insulated wood-frame walls, the emissions and the cumulative energy demand fall by 11.5% and 10.4%, respectively, also showing a decrease in the TNC of 17.3% and that the embodied

energy and embodied carbon fall by 32% and 35.6% respectively. Clearly, these results confirm how important the definition of the housing envelope is.

Otherwise, in an attempt to improve the energy and sustainable performance of social housing structured in masonry, two types of thermal reconditioning were evaluated, one traditional (with constructive systems and affordable prices) and another that meets criteria for passive or ultra low energy buildings (ULEB). The results for the refurbishment that meets passive housing criteria showed that the refurbished dwellings in the cities of Antofagasta, Santiago and Concepción, practically did not need energy for heating during the year (0 kWh / m² year, 3.91 kWh / m² year and 1.66kWh / m² respectively), showing the potential for highly efficient housing in these areas. However, under an expected future scenario for energy prices, horizons between 10 and 20 years and a low real capital cost (3.5%), the economic evaluation showed the convenience of traditional reconditioning over the which it meets criteria for passive housing. Finally, it is concluded, based on the analysis of the results and the sustainability requirements in buildings, that the construction systems of insulated wood-frame should be preferred over masonry walls in social housing.

Agradecimientos

En este trabajo quiero expresar mi agradecimiento a la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid por haberme dado la oportunidad de ingresar al programa de doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación. En especial a mis tutores Dra. Inmaculada Martínez y Dr. Alfonso Cobo, como también, a las profesoras Dra. M^a de las Nieves González y Dra. M^a Isabel Prieto. También a mi familia y amigos. Sin la colaboración de todos ellos, este desafío habría sido inviable. A todos ellos mi eterno y profundo agradecimiento.

ÍNDICE

Resumen	vi
Abstract.....	viii
Agradecimientos	x
ÍNDICE	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ACRÓNIMOS	xxi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	9
1.3. Metodología	11
1.4. Estructura de la Tesis	15
1.5. Alcances y limitaciones	17
2. VIVIENDA, CONFORT Y ENERGÍA	18
2.1. Control ambiental y evolución arquitectónica hacia la economía circular	18
2.2. El ciclo de vida de la edificación y su visión de proceso	26
2.3. Energía y emisiones.....	35
2.3.1. Consumo de Energía primaria.....	35
2.3.2. Emisiones e incremento de temperaturas	43
2.3.3. Energía y emisiones en edificaciones	51
2.3.4. Distribución del consumo de energía en la vivienda	57
2.3.5. Precio de la energía en el sector residencial.....	60
2.4. Confort térmico en viviendas.....	70
2.4.1. Intercambio de calor entre el cuerpo humano y el ambiente.....	71
2.4.2. Escalas de sensación térmica VMP y PPI.....	78
2.4.3. Adaptabilidad de las personas a las condiciones ambientales	81
2.4.4. Evaluación del confort térmico a partir de gráficos psicrométricos.	86
2.5. Confort térmico y demanda de energía.....	90
2.5.1. El calor, la luz y el aire.....	90
2.5.2. Balance energético y demanda bajo régimen estacionario	107
2.5.3. Transmisión de calor en régimen dinámico e inercia térmica	113
2.5.4. Viviendas altamente eficientes energéticamente	119
2.5.5. Simulación dinámica de edificios, EnergyPlus Software.	130
3. CLIMA, REGLAMENTACIÓN TÉRMICA Y VIVIENDA SOCIAL EN CHILE	140
3.1. El clima y otras preexistencias ambientales	140
3.2. Aspectos climáticos para Chile	145
3.3. Programa Climate Consultant.....	150
3.4. Reglamentación térmica en Chile	158
3.5. Vivienda en Chile, tipologías y desempeños.	165
3.5.1. Datos estadísticos y tipologías de viviendas chilenas	165
3.5.2. Parámetros de demanda para calefacción y refrigeración de viviendas chilenas	169
3.6. Vivienda social chilena y su desempeño térmico.....	174
4. EVALUACIÓN DE INVERSIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VIVIENDAS	183
4.1. Inversiones de eficiencia energética	183
4.2. Evaluación de inversiones de eficiencia energética en edificios.....	184
4.2.1. Consideraciones para la evaluación de inversiones de eficiencia energética	186
4.2.2. Viviendas de bajo EPE (Energy Performance Endowment).....	192
4.2.3. Métodos de evaluación de inversiones de eficacia energética en viviendas	193

5. EVALUACIÓN SUSTENTABLE DE VIVIENDAS	202
5.1. <i>Vivienda sustentable y sistemas de evaluación</i>	202
5.2. <i>Análisis de Ciclo de Vida en viviendas.....</i>	207
5.2.1. Objetivo y definición del alcance	209
5.2.2. Análisis de inventario (Life-Cycle Inventory – LCI).....	214
5.2.3. Análisis del impacto (Life-Cycle Impact Assessment – LCIA)	217
5.2.4. Interpretación.....	221
5.3. <i>Consideraciones en las fases del ciclo de vida.....</i>	222
5.4. <i>Limitaciones de ACV en viviendas sociales chilenas.....</i>	232
6. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO.....	236
6.1. <i>Caso 1: Contraste de la demanda de energía para calefaccionar una vivienda con baja inercia por absorción a partir de un análisis estacionario y dinámico.....</i>	236
6.1.1. Introducción al caso.....	236
6.1.2. Aspectos metodológicos.....	237
6.1.3. Descripción de la vivienda caso de estudio.....	238
6.1.4. Resultados de la modelación de la vivienda	240
6.1.5. Análisis de los resultados	243
6.1.6. Conclusiones del caso.....	245
6.2. <i>Caso 2: Eficiencia energética en una vivienda social – Análisis de mejoras en aislamiento térmico a partir de la reglamentación térmica</i>	246
6.2.1. Introducción al caso.....	246
6.2.2. Aspectos metodológicos.....	247
6.2.3. Vivienda base de estudio y propuestas de mejora	248
6.2.4. Determinación de T_{im} , demanda de energía y riesgo de condensación.	249
6.2.5. Análisis de los datos y resultados de la modelación	254
6.2.6. Conclusiones sobre el caso.....	256
6.3. <i>Caso 3: Análisis de ciclo de vida en viviendas, caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social</i>	258
6.3.1. Introducción al caso.....	258
6.3.2. Antecedentes metodológicos	260
6.3.3. Descripción del caso de estudio.....	262
6.3.4. Aplicación del ACV simplificado	265
6.3.5. Resultados para el ACV en los casos de estudio.....	270
6.3.6. Análisis y discusión sobre el caso	274
6.3.7. Conclusiones en torno al caso	279
6.4. <i>Caso 4: Evaluación económica de inversiones de eficiencia energética para disminuir el consumo de energía para calefaccionar una vivienda social materializada en albañilería.....</i>	281
6.4.1. Introducción al caso.....	281
6.4.2. Antecedentes y alcances metodológicos	282
6.4.3. Descripción de las mejoras	288
6.4.4. Resultados para proyecciones de precio, ahorros de energía e indicadores económicos.	292
6.4.5. Análisis y discusión del caso	304
6.4.6. Conclusiones en torno al caso de estudio.....	310
6.5. <i>Contraste de resultados para los casos de estudio</i>	314
7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN FINAL.....	320
7.1. <i>En torno a la revisión bibliográfica</i>	320
7.2. <i>En torno a los objetivos.....</i>	330
8. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	339
9. BIBLIOGRAFÍA.....	341
10. ANEXOS	356

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evaluación del impacto ambiental de materiales de construcción frecuentes.....	29
Tabla 2. Factores de emisión promedio anual en Chile, en tCO ₂ /MWh por tipo de sistema.	48
Tabla 3. Factores de emisiones para combustibles utilizados en Chile	48
Tabla 4. Determinación del precio (sin IVA) de energía eléctrica en Chile	68
Tabla 5. Precios de la energía eléctrica en Chile año 2017	69
Tabla 6. Estimación de precios para los combustibles habituales para calefaccionar en Chile por unidad de energía año 2018.....	70
Tabla 7. Recomendaciones de temperaturas y humedades relativas interiores	84
Tabla 8. Parámetros de confort térmico.	85
Tabla 9. Cargas internas en una vivienda.	95
Tabla 10. Valores característicos para ϵ y α a temperaturas corrientes.....	100
Tabla 11. Recomendaciones para caudales de ventilación.	104
Tabla 12. Difusividad para algunos materiales de construcción.....	115
Tabla 13. Efusividades de algunos materiales de construcción.	116
Tabla 14. Factores de conversión de energía útil a primaria en España	125
Tabla 15. Variabilidad en los coeficientes de paso de energía primaria (PEF)	126
Tabla 16. Cálculo de PEF para electricidad y su proyección basado en 4 métodos y el contexto Europeo.....	126
Tabla 17. Valores recomendados de consumo de energía primaria para nuevos conceptos de edificios cerrados.....	128
Tabla 18. Variables climáticas preponderantes en las viviendas	142
Tabla 19. Aspectos macro y micro-climáticos en la temperatura.	143
Tabla 20. Variabilidad de factores climáticos en Chile	147
Tabla 21. Características climáticas referenciales para distintas zonas de Chile.	149
Tabla 22. Valores máximos recomendados para transmitancias de la envolvente según NCh1079Of.2008, en W/(m ² K)	150
Tabla 23. Exigencias transmitancias a elementos de envolvente según OGUC.....	159
Tabla 24. Exigencias propuestas para distintos sistemas constructivos en la segunda etapa de la reglamentación térmica chilena.	162
Tabla 25. Transmitancias térmicas para elementos de envolvente en NTM 011/2/2014.....	164
Tabla 26. Limitación de proporción de ventanas por orientación en orden al valor de U.	164
Tabla 27. Tipologías de viviendas chilenas y sus características en relación a las pérdidas de calor.	168
Tabla 28. Demandas para calefacción y enfriamiento en 4 edificios chilenos.	170
Tabla 29. Demandas de energía para calefaccionar en viviendas chilenas por zona térmica.	172
Tabla 30. Requerimientos máximos de energía para calefacción y enfriamiento para zonas térmicas propuestas por la NTM 011/2 2014.....	173
Tabla 31. Disminución de la demanda de energía (en kWh/m ² año) para calefaccionar promedio en vivienda social de 1 piso al agregar aislante térmico en 4 tipos de muro.....	177
Tabla 32. Demanda para calefacción de viviendas sociales en meses más fríos del año.	177
Tabla 33. Niveles de profundidad de la duda: Riesgo, incertidumbre e ignorancia.....	190
Tabla 34. Hoja de cálculo para la estimación del NPV (S_i, A_i) para todas las combinaciones kxm	195
Tabla 35. Hallazgos vinculados a la evaluación de inversiones de eficiencia energética en viviendas.....	200
Tabla 36. Comparación de aspectos de sustentabilidad para BREEAM, LEED y DGNB	206
Tabla 37. Incidencias de las etapas del ACV en viviendas sobre las categorías de impacto GWP (GHG) y CED.	211
Tabla 38. Unidades funcionales aplicadas en el ACV del edificio	212
Tabla 39. Herramientas genéricas y específicas de ACV	216

Tabla 40. Identificación de categorías de impacto frecuentes.....	218
Tabla 41. Principales metodologías de evaluación del impacto en el ACV	220
Tabla 42. Relación de los agentes de la edificación y las fases en la toma de decisiones	222
Tabla 43. Análisis comparativo de energía incorporada en madera, acero y hormigón.....	225
Tabla 44. Comparación de bases de datos de inventario de materiales a partir de 6 características.....	225
Tabla 45. Energía y carbón incorporado en materiales según base BEDEC.....	226
Tabla 46. Resultados energéticos incorporados para diferentes tipos de construcciones residenciales.....	227
Tabla 47. Composición de desechos de construcción y demolición (CDW) generados en un edificio de referencia.	231
Tabla 48. Empresas productoras de materiales importantes en Chile y su decisión de entregar información primaria para desarrollo de base de inventario ambiental.	233
Tabla 49. Energía y carbón incorporados en materiales de construcción.....	235
Tabla 50. Determinación de cargas solares en elementos vidriados en BMTE (junio)	242
Tabla 51. Determinación de cargas solares en elementos opacos en BMTE (junio).....	242
Tabla 52. Tasa de transferencia de calor ($W/^{\circ}C$) a través de la envolvente de BMTE (junio)	243
Tabla 53. U-Value para dar cumplimiento a los casos planteados.....	249
Tabla 54. T_{si} en muros para las T_{im} y T_{rocio} para HR_i de 50% y 70%	252
Tabla 55. T_{si} en muros para temperatura interior igual a $20^{\circ}C$ y T_{rocio} para HR_i de 50% y 70%.	252
Tabla 56. T_{si} en ventanas para temperatura interior igual a $20^{\circ}C$ y T_{rocio} para HR_i de 50% y 70%.....	253
Tabla 57. Elementos considerados en los ACV simplificado para la presente investigación.	261
Tabla 58. Principales características técnicas de los elementos para los modelos VMA y VMM	264
Tabla 59. Mensura de los materiales presentes en las viviendas VMA y VMM	268
Tabla 60. Especificación de zonas y archivos climáticos (.epw) para la modelación en EnergyPlus	269
Tabla 61. Factores de emisión estimados a partir del tipo de energía para calefaccionar.....	269
Tabla 62. Transmitancias térmicas para la vivienda y sus mejoras A y B.	289
Tabla 63. Inversiones iniciales para mejoras en acondicionamiento A y B.	290
Tabla 64. Inversiones, mantenciones y rendimientos para sistemas de climatización geotérmica con bomba de calor.	291
Tabla 65. Demandas de energía para calefaccionar pre y post mejoras	292
Tabla 66. Distribución del combustible utilizado para calefaccionar, promedios ponderados para los rendimientos de los sistemas usados y precio de la energía para calefaccionar por ciudad.	292
Tabla 67. Consumo de energía y ahorros para calefacción frente a mejoras “A” y “B”.....	293
Tabla 68. Consumo de energía y ahorros para calefacción frente a mejoras “C” y “D”.	293
Tabla 69. Tasas de crecimiento anual estimadas para el precio del mix de combustible para calefaccionar por región.	296
Tabla 70. Contraste de variables de interés en vivienda modelada en el caso 1	314
Tabla 71. Contraste de variables de interés en viviendas modeladas en el caso 2	315
Tabla 72. Contraste de variables de interés en viviendas modeladas en el caso 3	316
Tabla 73. Contraste de variables de interés en viviendas modeladas en el caso 4	317
Tabla 74. Demanda y consumo de energía para calefaccionar en las viviendas modeladas en los casos de estudio.	319

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Consumo de energía por usos en hogares de España y UE. Fuente: (IDAE, 2018) ..2	2
Fig. 1.2 Distribución de zonas térmicas a lo largo de Chile. Fuente: (Bustamante, 2009)6	6
Fig. 1.3 Flujo metodológico para el alcance de los objetivos específicos.14	14
Fig. 2.1 Control ambiental, evolución de la arquitectura y tecnología en la vivienda. Fuente: (H. Hernández, 2009)21	21
Fig. 2.2 Evolución y dimensiones de investigación en edificios. Fuente: (Pomponi & Moncaster, 2017).....24	24
Fig. 2.3 Procesos y módulos en los análisis de ciclo de vida de edificaciones. Fuente: (Panagiotis Chastas, Theodosiou, Kontoleon, & Bikas, 2018)27	27
Fig. 2.4 Flujo simplificado de materia y energía en la visión del ecosistema industrial (IE). Fuente: (Korhonen, 2005).....28	28
Fig. 2.5 Contraste de una construcción tradicional versus una propuesta sustentable. Fuente: (Wadel, 2009)30	30
Fig. 2.6 Ejemplo de diagrama de Sankey de uso de energía, desperdicios e ineficiencias para un edificio con proceso de producción. Fuente: (Bjork et al., 2008)31	31
Fig. 2.7 Distribución de categorías de impacto para evaluar el desempeño ambiental de sistemas de gestión RCD en diferentes casos de estudio. Fuente: (Bovea & Powell, 2016) ...32	32
Fig. 2.8 Estrategias aplicadas en la gestión de RCD en diferentes casos de estudio. Fuente: (Bovea & Powell, 2016)33	33
Fig. 2.9 Fases del ciclo de vida de una vivienda y su visión de proceso. Fuente: (Sanz, 2012)34	34
Fig. 2.10 Tasas de crecimiento anual de consumo de energía primaria para países de interés. Fuente: (BP, 2018)36	36
Fig. 2.11 Participación de los tipos de combustibles en el consumo global de energía primaria. Fuente: (BP, 2018)36	36
Fig. 2.12 Consumo de energía primaria por tipo de combustible para países de interés. Fuente: (BP, 2018)37	37
Fig. 2.13 Total del consumo final por sector en Chile y su contraste a nivel global. Fuentes: (CNE, 2017) (Nejat et al., 2015)38	38
Fig. 2.14 Generación de energía eléctrica en el mundo por tipo de energía primaria al año 2040 basado en 2 escenarios. Fuente: (IEA, 2018b)39	39
Fig. 2.15 Generación de energía eléctrica en centro y Sudamérica por tipo de energía primaria al año 2040 basado en 2 escenarios. Fuente: (IEA, 2018b)40	40
Fig. 2.16 Capacidad instalada total para la generación de electricidad en Chile. Fuente: (Asociación de generadoras de Chile, 2019).....41	41
Fig. 2.17 Generación bruta del SEN por fuente entre 01-2018 y 01-2019. Fuente: (Asociación de generadoras de Chile, 2019)41	41
Fig. 2.18 Participación estimada de energías renovables en la matriz eléctrica chilena por escenario. Fuente: (Comité Ejecutivo de Escenarios Energéticos Chile, 2018).....42	42
Fig. 2.19 Escenarios en la predicción de las emisiones de CO ₂ al 2040. Fuente: (IEA, 2018b)43	43
Fig. 2.20 Impactos y riesgos para sistemas naturales y humanos derivados del aumento de la temperatura por sobre los niveles preindustriales. Fuente: (IPCC, 2018).....44	44
Fig. 2.21 Escenarios para limitar el calentamiento por sobre 1,5°C. Fuente: (IPCC, 2018) ...45	45
Fig. 2.22 Emisiones CO ₂ en Chile. Fuente: (IEA, 2018b)45	45
Fig. 2.23 Emisiones por unidad de PIB en Chile. Fuente: (IEA, 2018b)46	46
Fig. 2.24 Capacidad de generación eléctrica instalada en Chile por tipo de tecnología en MW. Fuente: (CNE, 2017).....47	47

Fig. 2.25 Noticia sobre interconexión SIC y SING, dando origen al SEN. Fuente: (NME, 2017).....	47
Fig. 2.26 Incrementos en la temperatura, para el periodo 2031-2050, con respecto al periodo 1961-1990, para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. Fuente: (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).....	50
Fig. 2.27 Porcentaje de consumo energético por los edificios a nivel mundial. Fuente: (Nejat et al., 2015).....	51
Fig. 2.28 Potencial global de los diferentes sectores en la mitigación del CO ₂ al 2030. Fuente: (Nejat et al., 2015)	52
Fig. 2.29 Demandas de fuentes de energía en el sector residencial pronosticadas a nivel global. Fuente: (Exxon Mobil Corporation, 2018)	53
Fig. 2.30 Niveles de inserción del uso de electricidad en calefacción, gestión y acceso en el edificio basado en dos escenarios (NPS y FiES). Fuente: (IEA, 2018b).....	53
Fig. 2.31 Baja correlación entre LCCF (Life Cycle Carbon Footprint) y LCE (Life Cycle Energy). Fuente: (Schwartz et al., 2018)	54
Fig. 2.32 LCCF (Life Cycle Carbon Footprint) para 163 casos de estudio. Fuente: (Schwartz et al., 2018).....	55
Fig. 2.33 Emisiones de dióxido de carbono incorporado (CE) por metro en 95 estudios de caso de edificios residenciales. Fuente: (Panagiotis Chastas et al., 2018).....	56
Fig. 2.34 Consumo y uso de energía en los hogares Chilenos por región. Fuente: (Asociación de generadoras de Chile, 2018)	58
Fig. 2.35 Distribución de los combustible para calefaccionar en Chile Fuente: (MMA, 2014).59	
Fig. 2.36 Tipo de combustible principal usado para calefacción en el hogar por región. Fuente: (CDT, 2015c)	59
Fig. 2.37 Caída en costos tecnológicos asociados a la generación de energía limpia en Chile. Fuente: (Asociación de generadoras de Chile, 2018)	61
Fig. 2.38 Proyecciones de precios para el propano en US. Fuente: (EIA, 2019a)	62
Fig. 2.39 Proyecciones de precios para los destilados del petróleo en US. Fuente: (EIA, 2019a).....	63
Fig. 2.40 Proyecciones de precios para el gas natural en US. Fuente: (EIA, 2019a)	63
Fig. 2.41 Proyecciones de precios para la electricidad en US. Fuente: (EIA, 2019a)	63
Fig. 2.42 Precios por litro de la parafina (kerosene doméstico) en Chile. Fuente: (CNE, 2019a).....	66
Fig. 2.43 Evolución del precio nudo de la energía eléctrica. Fuente: (CNE, 2019b)	67
Fig. 2.44 Transferencia de calor entre una persona y el entorno. Fuente: (Çengel & Boles, 2006).....	72
Fig. 2.45 Formas de transmisión de calor entre el cuerpo y el ambiente. Fuente: (H. Hernández, 2009)	72
Fig. 2.46 Tasa metabólica por nivel de actividad. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2016)	76
Fig. 2.47 Valores representativos de Clo para varios conjuntos de ropa. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2016)	77
Fig. 2.48 Relación entre PMV y PPD. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2016).....	80
Fig. 2.49 Rango aceptable de temperatura y humedad operativa para las zonas de confort térmico. Fuente: (Yang et al., 2014)	80
Fig. 2.50 Correlación entre la temperatura neutra o de confort y la temperatura media interior medida en una serie de estudios de campo. Fuente: (Yang et al., 2014)	82
Fig. 2.51 Rangos de temperatura operativa aceptables (T _o) para espacios naturalmente acondicionados. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2016)	83
Fig. 2.52 Gráfica de Víctor Olgyay. Fuente: (Serra & Coch, 1995)	87
Fig. 2.53. Carta bioclimática de Givoni. Fuente: (Serra & Coch, 1995).....	88
Fig. 2.54 Casos de puentes térmicos en edificaciones habitacionales. Fuente: (H. Hernández, 2009)	92
Fig. 2.55 Puentes térmicos evidenciados en termografía de un edificio. Fuente: (Disate, 2017).....	93
Fig. 2.56 Flujos de calor en una ventana de doble vidriado. Fuente: (H. Hernández, 2009) ..94	

Fig. 2.57 Incidencia solar sobre la vivienda: sol directo, bóveda celeste (difusa) y albedo. Fuente: (Serra & Coch, 1995).....	96
Fig. 2.58 Radiación solar incidente horizontal sobre una superficie en Santiago de Chile. Fuente: (Ministerio de Energía, 2019)	96
Fig. 2.59 Efecto invernadero en una habitación. Fuente: (H. Hernández, 2009)	98
Fig. 2.60 Factor solar y porcentaje global de energía reenviada al exterior. Fuente: (H. Hernández, 2009)	98
Fig. 2.61 Desempeño ventana Low-E y transmisión de calor q_r por radiación en placas paralelas. Fuente: (H. Hernández, 2009)	100
Fig. 2.62 Presiones y depresiones que generan ventilación cruzada en una vivienda. Fuente: (H. Hernández, 2009)	101
Fig. 2.63 Diagrama psicrométrico. Fuente: (Monroy, 2006)	103
Fig. 2.64 Determinación de tasa de ventilación en un espacio habitacional a partir de Ecuación 10. Fuente: (H. Hernández, 2009)	103
Fig. 2.65 Zona de condensación intersticial en un elemento de envolvente. Fuente: (H. Hernández, 2009)	106
Fig. 2.66 Sistema de ventilación con recuperación de calor. Fuente: (Serrano, 2016)	106
Fig. 2.67 Determinación de R_g para tres situaciones distintas. Fuente: (H. Hernández, 2009)	107
Fig. 2.68 Parámetros influyentes en la determinación de la temperatura interior media T_{im} en una vivienda. Fuente. (Lavigne et al., 2003).....	108
Fig. 2.69 Balance energético en diferentes épocas del año en climas templados. Fuente: (TU Delft, 2019)	109
Fig. 2.70 Oscilación de la temperatura interior alrededor de T_{im} . Fuente: (H. Hernández, 2009).....	110
Fig. 2.71 Efusividad y difusividad a partir de analogía con teoría hidráulica. Fuente: Lavigne, Pierre. Arquitectura Climática. Fuente: (Lavigne et al., 2003)	117
Fig. 2.72 Comportamiento térmico de envolvente opaca sin calefacción y sin efecto solar. Fuente: (H. Hernández, 2009)	117
Fig. 2.73 Temperatura en un muro homogéneo a lo largo del día, según su profundidad (x) respecto de la superficie exterior ($x=0$), debido a una excitación sinusoidal. Fuente: (Marincic, 1999).....	118
Fig. 2.74 Iluminación en habitación con coeficientes de reflexión para cielo, muros y piso en a) 0,8; 0,7 y 0,2 respectivamente y, b) nulos. Fuente: (H. Hernández, 2009)	121
Fig. 2.75 Esquematación de una vivienda altamente eficiente. Fuente: (International Energy Agency, 2008).....	121
Fig. 2.76 Indicadores de interés para evaluar la eficiencia energética de una vivienda. Fuente: (H. Hernández, 2017).....	123
Fig. 2.77 Energía perdida derivada de los procesos de transformación y entrega de energía útil a la vivienda. Fuente: (GGF, 2019).....	125
Fig. 2.78 PEF para electricidad para diferentes países. Fuente: (Wilby, Rodríguez González, & Vinagre Díaz, 2014)	126
Fig. 2.79 Energía incorporada (EE) para edificios clasificados según su eficiencia energética. Fuente: (P. Chastas et al., 2017).....	129
Fig. 2.80 Precalificación energética del SCEV. Fuente: (MINVU, 2018a)	133
Fig. 2.81 Simulación de comportamiento térmico de una vivienda en programa CTE_CL. Fuente: (H. Hernández, 2009)	133
Fig. 2.82 Esquematación general del programa de simulación EnergyPlus. Fuente: (DOE, 2019).....	135
Fig. 2.83 Simulación energética de Edificio con EnergyPlus partir de interface Euclid. Fuente: (Levitt, 2017).....	135
Fig. 2.84 Interface EP-Launch de EnergyPlus. Fuente: EnergyPlus Software.....	136
Fig. 2.85. Interface Edit – IDF Editor de EnergyPlus. Fuente: EnergyPlus Software.	138
Fig. 2.86 Ventana de EnergyPlus una vez corrida la simulación. Fuente: EnergyPlus Software.....	138

Fig. 3.1 Temperaturas a lo largo del año en la ciudad de Santiago. Fuente: (Weather Spark, 2019).....	144
Fig. 3.2 Variación de la temperatura durante el día por mes en Santiago. Fuente: (Weather Spark, 2019)	144
Fig. 3.3 Radiación solar a largo de Chile. Fuente: (Ministerio de Energía, 2019)	146
Fig. 3.4. Interfaz de inicio de un proyecto de análisis con Climate Consultant. Fuente: (UCLA, 2018).....	152
Fig. 3.5 Rango de temperaturas para Santiago a partir del Climate Consultant 6.0.	153
Fig. 3.6 Gráfico de sombreado solar ("Sun Shading Chart") para Santiago a partir del Climate Consultant 6.0.....	154
Fig. 3.7 Gráfico de temperatura del suelo ("Ground Temperature") para Santiago a partir del Climate Consultant 6.0.	155
Fig. 3.8 Gráfico Psicrométrico ("Psychrometric Chart") para Santiago a partir del Climate Consultant 6.0.....	156
Fig. 3.9 Gráfico Psicrométrico con buenas estrategias de diseño bioclimático que permiten alcanzar 99,7% de horas de confort térmico para Santiago.....	157
Fig. 3.10 Pautas o guías de diseño ("Design guidelines") a partir de la gráfica Psicrométrica con buenas estrategias de diseño bioclimático que permiten alcanzar 99,7% de horas de confort térmico para Santiago en Fig. 3.9.....	157
Fig. 3.11 Explicación de una de las pautas o guías listada en la Fig. 3.10	158
Fig. 3.12 Etapas de la reglamentación térmica en Chile. Fuente: (Blender, 2015)	161
Fig. 3.13 Zonificación térmica propuesta por NTM 011/2/2014. Fuente: (MINVU, 2014a)..	163
Fig. 3.14 Distribución de viviendas de norte a sur en Chile. Fuente: (INE, 2017)	166
Fig. 3.15 Distribución de materialidades en muros de norte a sur en Chile. Fuente: (INE, 2017).....	166
Fig. 3.16 Materialidad de muros en viviendas chilenas. Fuente: (INE, 2017)	167
Fig. 3.17 Número de dormitorios en viviendas chilenas. Fuente: (INE, 2017)	167
Fig. 3.18. Contraste de demanda para calefacción en departamentos semejantes dentro de un mismo edificio. Fuente: (H. Hernández, 2009)	170
Fig. 3.19 Porcentaje de viviendas que declaran el uso de leña para la calefacción de espacios y el consumo promedio anual en kilogramos por región geográfica. Fuente: (Bunster & Noguchi, 2015)	179
Fig. 3.20 Porcentaje de viviendas que declaran el uso de leña para la calefacción de espacios y el consumo promedio anual en kilogramos por zona climática. Fuente: (Bunster & Noguchi, 2015).....	179
Fig. 3.21 Principales materiales de construcción de muros en viviendas sociales por zona térmica. Fuente: (Bunster & Noguchi, 2015)	180
Fig. 3.22 Principales materiales de construcción en cubiertas de viviendas sociales por zona térmica. Fuente: (Bunster & Noguchi, 2015)	181
Fig. 3.23 Edificio de estudio en madera y mediana altura. Fuente: (CNN Chile, 2019)	182
Fig. 3.24 CLT usado en la construcción de vivienda chilena. Fuente: (Rehbein, 2018).....	182
Fig. 3.25. Vivienda social materializada en panel SIP. Fuente: (H. Hernández, 2016)	182
Fig. 3.26 sistema constructivo en madera AIW. Fuente: (CORMA, 2019a)	182
Fig. 3.27 Sistema constructivo VAP (previo al recubrimiento con placas de OSB). Fuente: (CORMA, 2019b).....	182
Fig. 4.1 Distribución del gasto mundial en inversiones de eficiencia energética. Fuente: (IEA, 2018b).....	183
Fig. 4.2 Tridimensionalidad para la contextualización de inversiones en eficiencia energética. Fuente: (Verbruggen, 2012)	187
Fig. 4.3 Costos de reversión sobre el tiempo como medida de irrevocabilidad. Fuente: (Verbruggen, 2012).....	192
Fig. 4.4 Estructura de evaluación secuencial de decisión. Fuente: (Kumbaroglu & Madlener, 2012).....	196
Fig. 5.1 Ponderación de las necesidades energéticas para LEED, BREEAM y DGNB Fuente: (Romano & Riediger, 2020)	206

Fig. 5.2 Estructura de los ACV en edificaciones. Fuente: (Abd Rashid & Yusoff, 2015).....	209
Fig. 5.3 Límites del sistema para los ACV en viviendas. Fuente: (Oregi et al., 2017).....	210
Fig. 5.4 Vida útil considerada en 95 casos de estudio (CS) de edificios residenciales (NS: No se indica). Fuente: (P. Chastas et al., 2017)	214
Fig. 5.5 Categorías de impacto intermedio (Midpoint) y final (Endpoint). Fuente: (Hernandez et al., 2018).....	218
Fig. 5.6 Esquema de multiproductos en un edificio. Fuente: (Claudia Muñoz, 2013)	223
Fig. 5.7 Determinación del impacto ambiental por categoría de impacto ambiental. Fuente: (Gregory, 2017).	224
Fig. 5.8 Límites del sistema de la fase de término de la vida útil para un edificio de referencia. Fuente: (Vitale et al., 2017)	230
Fig. 6.1 Interface para definir el nombre y la ubicación geográfica del proyecto en Software CCTE.....	238
Fig. 6.2 Panel SIP 75mm de espesor. Fuente: (Termocret, 2019)	238
Fig. 6.3 Biocasa Modular Termo Estructural.	239
Fig. 6.4 Biocasa Modular Termo Estructural en proceso de construcción y vistas de la modelación 3D en software CCTE_v2.0.....	240
Fig. 6.5 Resultados para calefacción y refrigeración de BMTE en CCTE.	241
Fig. 6.6 Demanda de energía de calefacción y enfriamiento para BMTE bajo análisis estacionario.	241
Fig. 6.7 Vivienda social tipo (caso base CB).	249
Fig. 6.8 Temperatura interior media (T_{im}) para casos CB, CMPN y CMPH.....	250
Fig. 6.9 Demanda de energía mensual para casos CB, CMPN y CMPH.....	251
Fig. 6.10 Contraste de energías demandas para calefacción y refrigeración en los casos analizados.....	251
Fig. 6.11 Diferencias entre las T_r para humedades de 50% y 70% en los casos CB, CMPN y CMPH sin calefaccionar.	252
Fig. 6.12 Diferencias entre la T_{si} en muro y $T_{rocío}$ para humedad de 70% y temperatura interior igual a 20°C.	253
Fig. 6.13 Diferencias entre la T_{si} en ventana y $T_{rocío}$ para humedad de 70% y temperatura interior igual a 20°C	253
Fig. 6.14 Flujo metodológico para la obtención los indicadores de evaluación ambiental y confort térmico.	262
Fig. 6.15 Planta de la vivienda de estudio, muros achurados en negro corresponden a la albañilería y en color claro a la tabiquería interior.	263
Fig. 6.16 Elevación estructural de un muro de albañilería en la vivienda de estudio.	264
Fig. 6.17 Modelación tridimensional de la vivienda para simulación energética con EnergyPlus	268
Fig. 6.18 Cargas ambientales de los materiales presentes en las viviendas VMA y VMM ...	270
Fig. 6.19 Cargas ambientales de los elementos o subsistemas presentes en VMA y VMM.	271
Fig. 6.20 Cargas ambientales de los principales recursos usados durante la construcción de las viviendas VMA y VMM.	271
Fig. 6.21 Cargas ambientales en la fase de uso para casos modelados VMA y VMM	272
Fig. 6.22 Horas y proporción de tiempo no confortable para casos modelados VMA y VMM	272
Fig. 6.23 CED y GWP por m ² para los casos modelados VMA y VMM.....	273
Fig. 6.24 Incidencia de las fases del ACV en la categoría CED	273
Fig. 6.25 Incidencia de las fases del ACV en la categoría GWP	274
Fig. 6.26 Patrones de conciencia climática supuestos para los próximos 30 años. Fuente: Adaptada para el presente caso de estudio de (Verbruggen et al., 2011).	288
Fig. 6.27 Propuestas de cambios en muros, cielo y ventanas para mejora A.....	290
Fig. 6.28 Modelación para precios esperados de los combustibles para calefaccionar.	294
Fig. 6.29 Modelación de precios para gas licuado de petróleo	294
Fig. 6.30 Modelación de precios para electricidad	295
Fig. 6.31 Modelación de precios para Leña.....	295

Fig. 6.32 Modelación de precios para Kerosene	295
Fig. 6.33 Contraste del NPV para las alternativas de mejoramiento en la envolvente A y B para diferentes horizontes de análisis, considerando un crecimiento mínimo en los precios de la energía y costo de capital igual a 3,5%.	296
Fig. 6.34 Contraste del NPV para las alternativas de mejoramiento en la envolvente A y B para diferentes horizontes de análisis, considerando un crecimiento esperado en los precios de la energía y costo de capital igual a 3,5%.	297
Fig. 6.35 Contraste del NPV para las alternativas de mejoramiento en la envolvente A y B para diferentes horizontes de análisis, considerando un crecimiento máximo en los precios de la energía y costo de capital igual a 3,5%.	297
Fig. 6.36 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\min.}$, $h=20$ y $r=3,5\%$	298
Fig. 6.37 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\text{esp.}}$, $h=20$ y $r=3,5\%$	298
Fig. 6.38 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\max.}$, $h=20$ y $r=3,5\%$	299
Fig. 6.39 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\min.}$, $h=20$ y $r=7,5\%$	299
Fig. 6.40 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\text{esp.}}$, $h=20$ y $r=7,5\%$	300
Fig. 6.41 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\max.}$, $h=20$ y $r=7,5\%$	300
Fig. 6.42 NPV para alternativa de inversión "D" bajo escenarios futuros inciertos plausibles y diferentes momentos para invertir en la bomba de calor geotérmica ($r=3,5\%$, $P_{\text{esp.}}$ y $h=30$ años).....	302
Fig. 6.43 NPV para alternativa de inversión "D" bajo escenarios futuros inciertos plausibles y diferentes momentos para invertir en la bomba de calor geotérmica ($r=7,5\%$, $P_{\text{esp.}}$ y $h=30$ años).....	302
Fig. 6.44 NPV para alternativa de inversión "D" bajo escenarios futuros inciertos plausibles y diferentes momentos para invertir en la bomba de calor geotérmica ($r=3,5\%$, $P_{\max.}$ y $h=30$ años).....	303
Fig. 6.45 NPV para alternativa de inversión "D" bajo escenarios futuros inciertos plausibles y diferentes momentos para invertir en la bomba de calor geotérmica ($r=7,5\%$, $P_{\max.}$ y $h=30$ años).....	303
Fig. 6.46 Relación transmitancia térmica de envolvente v/s demanda para calefaccionar en las viviendas modeladas en los casos de estudio.	319

ACRÓNIMOS

ACS	Agua Caliente Sanitaria
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
AEO	Annual Energy Outlook
AFEC	Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización
AIW	All in Wall System
ANNs	Artificial Neural Networks
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning
AT	Alta Tensión
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
BLCC	Building Life Cycle Cost
BMTE	Biocasa Modular Termo Estructural
BP	British Petroleum
BT	Baja Tensión
CB	Caso Base
CBE	Center for the Built Environment
CDT	Corporación de Desarrollo Tecnológico
CDT	Corporación de Desarrollo Tecnológico
CE	Circular Economy
CEB	Conventional Energy Building
CED	Cumulative Energy Demand
CMPH	Caso Mejorado Passive House
CMPN	Caso Mejorado Propuesta Normativa
CNE	Comisión Nacional de Energía
CPR	Comercial, Público y Residencial
DAP	Declaración Ambiental de Producto
DECON	Departamento de Construcción
DHW	Domestic Hot Water
DOE	Department of Energy
DPP	Discounted Payback Period
EDP	Environmental Product Declaration
EE	Embodied Energy

EFIP	Escenario Futuro Incierto Plausible
EIA	Energy Information Administration
EIFS	Exterior Insulation and Finish System
ELCD	European reference Life Cycle Database
EPE	Energy Performance Endowment
EPS	Expanded Polystyrene
EPW	EnergyPlus Weather
ERNC	Energía Renovable No Convencional
EU	European Union
FiES	Future is Electric Scenario
FIN	Factor de Iluminación Natural
FS	Factor Solar
GDc	Grados Días calefacción
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GHG	Greenhouse Gas
GLP	Gas Licuado del Petróleo
GWP	Global Warming Potential
HVAC	Heating, ventilation, and air conditioning
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
IEA	International Energy Agency
IEE	Initial Embodied Energy
INE	Instituto Nacional de Energía
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVA	Impuesto al Valor Agregado
LCA	Life-Cycle Assessment
LCC	Life-Cycle Cost
LCEE	Life-Cycle Embodied Energy
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LEB	Low Energy Building
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo
NIST	National Institute of Standards and Technology
NPS	New Policies Scenario
NPV	Net Present Value

NTM	Normas Técnicas MINVU
nZEB	nearly Zero Energy Building
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OGUC	Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones
ORR	Overall Rate of Return
OSB	Oriented Strand Board
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEB	Plus Energy Building
PEF	Primery Energy Factor
PELP	Planificación Energética de Largo Plazo
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
RIR	Radiación Infrarroja
RITCH	Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios en Chile
RPC	Representative Concentration Pathways
RS	Radiación Solar
SCBCG	Sistema de Climatización con Bomba de Calor Geotérmica
SCEV	Sistema de Calificación Energética de Viviendas en Chile
SDS	Sustainable Development Scenario
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SIC	Sistema Interconectado Central
SING	Sistema Interconectado Norte Grande
SIP	Structural Insulated Panel
SPP	Simple Payback Periodo
SVMs	Support Vector Machines
TNC	Tiempo No Confortable
UF	Unidad de Fomento
ULEB	Ultra Low Energy Building
UTFSM	Universidad Técnica Federico Santa María
US	United States
VAP	Viga Aislación Pilar
VMA	Vivienda Muro Albañilería
VMM	Vivienda Muro Madera

WEO	World Energy Outlook
WLCC	Whole Life Cycle Cost

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El calentamiento global y sus efectos han repercutido negativamente en la sociedad moderna, por lo que todos los sectores productivos deberían minimizar el uso de energías de origen fósil. La industria de la construcción no está exenta de esta preocupación, sobre todo el sector residencial que juega un rol fundamental al momento de analizar el potencial en la reducción del consumo de energía y emisiones de CO₂ al ambiente. De acuerdo a investigaciones en torno al confort térmico y a las implicaciones del consumo de energía en edificios, las edificaciones representan alrededor del 40% del consumo mundial de energía y contribuyen con más del 30% de las emisiones de CO₂, donde una gran parte de esta energía es utilizada para generar condiciones de confort térmico (Yang, Yan, & Lam, 2014).

Resulta relevante conocer cómo las edificaciones logran reducir su consumo energético y, por tanto, minimizar las emisiones CO₂ al ambiente, aportando a estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero (GHG) en la atmósfera y a frenar el cambio climático antropogénico. Desafío que no es fácil, pues si se desea mitigar con éxito el cambio climático, se tienen que reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en aproximadamente un 80-90% en los próximos 50 años (Leemans, 2016).

Consecuentemente, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es transversal a cualquier tipo de industria, siendo relevante avanzar en aspectos que aporten a minimizar los impactos ambientales asociados a la contaminación atmosférica. Sobre todo en el sector residencial donde el calentamiento global ha afectado seriamente el desempeño y sustentabilidad de las edificaciones, especialmente en términos de demanda de energía, para los que se espera el

consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono aumenten drásticamente durante la vida operacional de los mismos en el futuro (Yau & Hasbi, 2013).

Lo anterior justifica la necesidad de construir viviendas más eficientes, evidenciando el potencial de las inversiones de eficiencia energética en viviendas para reducir el uso de la energía y las emisiones contaminantes al medio ambiente, tanto para el acondicionamiento térmico pasivo en viviendas nuevas como para el reacondicionamiento térmico de viviendas ya construidas (Mohammadpourkarbasi & Sharples, 2013). Lo anterior debido, principalmente, a que la demanda de energía para generar las condiciones de confort térmico representa una proporción importante del consumo total de energía en la vivienda, especialmente en aquellas áreas geográficas que presentan mayor severidad climática. A modo de ejemplo, tal como se aprecia en la Fig. 1.1, se puede citar la diferencia que presenta el consumo de energía para calefaccionar viviendas en España versus el requerido para la Unión Europea (UE), los que se estiman en 43,1% y 65,1% del total de energía consumida para el sector residencial respectivamente (IDAE, 2018).

Fig. 1.1 Consumo de energía por usos en hogares de España y UE. Fuente: (IDAE, 2018)

Si a mejoras en reacondicionamiento térmico de la envolvente de una vivienda se suma la modernización de los sistemas de instalaciones, que utilicen energías limpias y con altos rendimientos (bombas de calor, intercambiadores de calor, etc.), se

lograrán edificaciones altamente eficientes (Low Energy Building “LEB”, Ultra Low Energy Building “ULEB” o Passive House); o bien, en los casos más favorables, edificaciones cero energía (edificio energía neta cero o nearly Zero Energy Building “nZEB”) o que aportan energía al sistema de suministro (Plus Energy Building “PEB”) (Moore, Thomas, & Schüwer, 2013). Lograr edificaciones con estas características es un desafío para quienes proyectan edificios, donde la edificación sustentable ha sido abordada con profundidad en países desarrollados pero de manera incipiente en países menos desarrollados (Anand & Amor, 2017). Chile es un país que debe aprender de la experiencia de países desarrollados, comenzando por evaluar sus construcciones habitacionales a partir de parámetros de eficiencia energética más restrictivos, teniendo siempre en consideración que los consumos de energía dependen de aspectos que varían en el tiempo, como lo son el clima, los hábitos de las personas o las características propias de las edificaciones y su tecnología (H. Hernández & Meza, 2010). Así, siempre serán necesarias nuevas investigaciones a nivel local en materia de energía y sustentabilidad en viviendas, especialmente en un país en vías de desarrollo como lo es Chile.

Chile presenta edificaciones y condiciones habitacionales diversas. Esto se explica, en gran parte, por la diversidad climática presente en un espacio geográfico que definen a un país esbelto de aproximadamente 4.300 km de extensión (Ver Fig. 1.2) (Moreira-Muñoz, 2011). Pese a esta diversidad, la investigación en torno a la evaluación del desempeño ambiental de viviendas en Chile es incipiente (Oyarzo & Peuportier, 2014). A lo anterior se suma la inexistencia de una normativa de eficiencia energética habitacional, como también la falta de una reglamentación térmica que realmente logre mejorar la calidad de vida de la población y dar respuesta a los ahorros energéticos potenciales para las viviendas chilenas (Blender, 2015) (H. Hernández, 2017) (Senado de Chile, 2018). Esto hace de la presente investigación un aporte al conocimiento en materia de evaluación de viviendas chilenas, particularmente, sobre una vivienda social característica en términos de eficiencia energética y sustentabilidad.

Así, resulta fundamental analizar el impacto ambiental que presentan las edificaciones, donde el análisis de ciclo de vida (ACV) se muestra como una metodología útil e internacionalmente aceptada para evaluar el desempeño ambiental

en ellas (Fouquet et al., 2015). Al igual que en otros países menos desarrollados de la orbe, la aplicación de los ACV en edificaciones es relativamente reciente y los trabajos se han enfocado, principalmente, a incorporar el concepto de energía incorporada (Embodied Energy o EE) (Cárdenas, Muñoz, Riquelme, & Hidalgo, 2015) (Anand & Amor, 2017). En Chile recién se están discutiendo aspectos normativos asociados a la certificación energética de viviendas (Senado de Chile, 2018), siendo los análisis de sustentabilidad con un enfoque basado en la metodología ACV (Life Cycle Assessment o LCA) un tema recientemente abordado (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Cárdenas et al., 2015)(H. Hernández, 2017). Lo anterior abre desafíos y oportunidades de investigación en torno a la aplicación de metodologías asociadas a los análisis del desempeño sustentable de viviendas, particularmente a la evaluación de los beneficios económicos, ambientales y de habitabilidad asociados a las mejoras en el acondicionamiento térmico de una vivienda social característica en Chile.

Es claro que a mayor severidad climática y peor acondicionamiento térmico en la vivienda el consumo de energía aumenta, de ahí la importancia de reacondicionar las viviendas que no presentan una dotación de rendimiento energético (Energy Performance Endowment EPE) adecuado. El EPE hace referencia a un amplio rango de atributos (tamaño, compacidad, etc.) y elementos (componentes, equipamiento, etc.) que tienen un impacto sobre el consumo de energía posterior en el edificio (Verbruggen, Marchohi, & Janssens, 2011). Estos aspectos definen la magnitud de las inversiones de eficiencia energética en la vivienda, montos que habitualmente se contrastan con los ahorros en energía para evaluar la viabilidad económica de dichas inversiones bajo un escenario determinístico para el costo de energía en la determinación del valor presente neto (NPV) (Ma, Cooper, Daly, & Ledo, 2012). Sin embargo, tomar decisiones basadas en métodos que no consideren aspectos no monetarios, el tiempo futuro, la incertidumbre, la irrevocabilidad, o los relacionados con la calidad de la energía, pueden llevar a conclusiones engañosas (Verbruggen et al., 2011). En este contexto, la presente investigación será un aporte al reconocimiento de las diferencias entre los métodos de evaluación económica para inversiones de eficiencia energética dinámico y estático, pues se analizarán sus limitaciones al evaluar un caso de estudio, particularmente el reacondicionamiento térmico en una vivienda social chilena característica.

En Chile existen propuestas de actualización normativa para el acondicionamiento higrotérmico en viviendas (propuesta NTM 011/2 año 2014). Sin embargo, y como se ha referenciado previamente, aún está vigente una reglamentación térmica que no propicia la eficiencia energética (Blender, 2015) (H. Hernández, 2017). Regulación que al día de hoy divide el territorio chileno en 7 zonificaciones térmicas, las que van desde la zona Z1 a la zona Z7 (Ver Fig. 1.2). Esta clasificación se definió a partir de la mensura de Grados-Día de calefacción anuales (GDc), donde Z1 y Z7 representan las zonas con menor y mayor cantidad de GDc respectivamente (Bustamante, Cepeda, Martínez, & Santa María, 2013) (MINVU, 2018c).

La Fig. 1.2 muestra una distribución de estas zonas a lo largo del país. Así resulta importante establecer, desde una perspectiva de confort térmico en la vivienda, las diferencias entre la propuesta de cambio normativo y la reglamentación vigente, lo que también será abordado en la presente investigación.

Fig. 1.2 Distribución de zonas térmicas a lo largo de Chile. Fuente: (Bustamante, 2009)

Las nuevas políticas energéticas para Chile buscan conseguir al año 2050 que la generación eléctrica provenga en gran parte de energías renovables (>70%) y, que el 100% de las nuevas edificaciones presenten altos estándares de construcción eficiente y cuenten con sistemas de control de energía (Ministerio de Energía, 2015). Sin embargo, a pesar de todos los avances existentes desde el 2000 en eficiencia energética y sustentabilidad en viviendas, la presente investigación evidenciará el bajo impacto de la normativa vigente (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones de Chile – OGUC) en propiciar la eficiencia energética en viviendas, en un contexto donde el ahorro energético que se podría alcanzar en el sector edificación al año 2050 es importante. Lo anterior, considerando que la edificación comercial, pública y residencial representan el 22% del consumo de energía en Chile (CNE, 2017).

La reglamentación térmica en Chile se implementó por etapas y centrada en los elementos de la envolvente de la vivienda (cielo y resto de envolvente). La primera etapa comenzó a regular la transmitancia térmica en el cielo de la vivienda el año 2000. Luego, a partir del año 2007, el resto de los elementos de la envolvente. Basado en este escenario, y sin considerar que dicha reglamentación no propicia la eficiencia energética, gran parte de las viviendas en Chile no cumplen con los requerimientos mínimos de aislamiento térmico definidos por esta normativa (OGUC Art. 4.1.10), pues cerca del 86% de las viviendas fueron construidas antes de que entrara en vigencia la primera etapa de la reglamentación térmica el año 2000 (CDT, 2010). De este modo, es de esperar que al día de hoy muchas de estas viviendas no cumplan con estándares de aislación adecuados que permitan minimizar el consumo de energía o las emisiones de CO₂ al ambiente. En este universo de casos destacan las viviendas de las familias más vulnerables, específicamente viviendas sociales en Chile, las que muestran segregación social y emplazamientos distantes de los centros de las ciudades (Borsdorf, Hildalgo, & Vidal-Koppmann, 2016). Estos hogares exhiben los peores estándares urbanos y cuyas viviendas, que pueden ir desde los 23m² a los 62m², no suelen refrigerarse en verano, pero sí suelen calefaccionarse en invierno (Oyarzo & Peuportier, 2014). Esto significa un gasto relativo considerable

para familias que perciben los menores ingresos de la sociedad (Brain Valenzuela & Mora, 2010). Por consiguiente, es fundamental hacer de estas viviendas espacios más confortables, eficientes y sustentables, aspectos que son abordados en la presente investigación y pueden servir de referencia para quienes toman decisiones en torno a establecer los atributos de las viviendas sociales.

Los materiales y su disposición en las soluciones constructivas definen la transmitancia térmica de los elementos en la envolvente de una vivienda, parámetro sobre el que se establecen las restricciones normativas sobre aislamiento en Chile. Sin embargo, dos soluciones constructivas con igual resistencia térmica no presentan igual desempeño ambiental o térmico, pues en esto no se consideran la inercia térmica, la energía incorporada, los residuos, o bien, las necesidades de mantenimiento o rehabilitación futura. En este contexto, la madera es un material que presenta ventajas medioambientales importantes de evidenciar en contraste con la albañilería y sus elementos de refuerzo en hormigón armado tradicionales en la construcción chilena (INE, 2017). Chile está dentro del grupo de países que más produce madera, sin embargo, la construcción de viviendas en madera – generalmente de 1 o 2 pisos– es baja en relación a otras soluciones constructivas como lo es la albañilería o el hormigón armado (CDT, 2010) (Ugarte & Acevedo, 2016). En cuanto a viviendas sociales, la madera se presenta como material predominante en la estructura de techumbre en todas las zonas térmicas (ver zonas térmicas en Fig. 1.2). Sin embargo, su uso en muros solo predomina en las zonas térmicas con menor población (zonas 5, 6 y 7), siendo la albañilería (con mayor transmitancia) una solución constructiva predominante en las zonas térmicas con mayor población y proporción de vivienda social (Zonas 1, 2, 3 y 4) (Bunster & Noguchi, 2015). Esto muestra cuán importante es evidenciar los beneficios medioambientales y de confort térmico que brindaría el uso de muros estructurados en madera y aislados térmicamente por sobre los muros de albañilería en viviendas sociales chilenas, sobre todo en aquellas zonas térmicas donde no prevalece su uso, aspectos que se abordarán en la presente investigación a partir de un caso de estudio.

Consecuentemente, la presente investigación buscar dar respuesta a interrogantes como: ¿Cuáles son las variables técnicas y económicas que deben ser consideradas

en la evaluación del desempeño térmico y ambiental de una vivienda? ¿Qué metodologías existen para mensurar estas variables? ¿Cuáles son los requerimientos energéticos para lograr condiciones de confort térmico en viviendas sociales chilenas? ¿Cuál es la carga energética y medioambiental asociada a una vivienda social chilena característica? ¿Cuánto más sustentable resulta ser el uso de muros estructurados en madera aislados versus el uso de la albañilería reforzada con elementos de hormigón armado en una vivienda social característica? Para responder a estas interrogantes se iniciará con un estudio bibliográfico en torno a los análisis de eficiencia energética en viviendas, a la evaluación económica de inversiones de eficiencia energética y la metodología de análisis de ciclo de vida en edificaciones. Luego se analizarán cuatro casos de estudios, los que se presentan en el apartado 6 del presente documento.

Finalmente, las pocas investigaciones con aportes vinculados a la evaluación de consumos de energía y emisiones de CO₂ basados en la metodología ACV en viviendas sociales chilenas, sumado a una reglamentación térmica deficiente y a una certificación energética en viviendas de carácter voluntario e incipiente, justifican la presente investigación.

1.2. Objetivos

Objetivo General:

Estudiar variables técnicas y económicas asociadas al acondicionamiento térmico de viviendas que permitan evaluar el desempeño energético y ambiental de viviendas sociales unifamiliares en Chile bajo condiciones climáticas y de dotación de rendimiento energético que son disímiles.

Objetivos Específicos:

- OE1: Estudiar las variables técnicas asociadas al acondicionamiento térmico en viviendas y la relación existente entre las variables asociadas al confort térmico, el requerimiento de energía y el impacto medioambiental.
- OE2: Estudiar los métodos cuantitativos estacionario y dinámico para determinar la demanda y el consumo de energía asociado al acondicionamiento térmico en viviendas.
- OE3: Estudiar los requerimientos energéticos para calefaccionar y refrigerar edificaciones a partir de la modelación de viviendas sociales unifamiliares en Chile (viviendas más expuestas y vulnerables), que permita evidenciar las oportunidades de mejora en el acondicionamiento térmico tomando como referencia la reglamentación térmica vigente.
- OE4: Estudiar metodologías para la evaluación económica de inversiones de eficiencia energética en viviendas, especialmente las asociadas al reacondicionamiento térmico de edificaciones que presenten una dotación de rendimiento energético bajo.
- OE5: Estudiar la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) en edificaciones para evaluar el desempeño ambiental de viviendas sociales en Chile, considerando las restricciones locales en cuanto a inventario ambiental y

el acondicionamiento térmico que deriva de una dotación de desempeño energético disímil.

- OE6: Evaluar el desempeño energético, medio ambiental y económico asociado al reacondicionamiento térmico de una vivienda social unifamiliar característica en Chile.

1.3. Metodología

A continuación se muestra la metodología de trabajo adoptada para concretar cada uno de los objetivos específicos declarados en el apartado 1.2 más atrás. Esto a través de la vinculación de la estructura definida previamente y el cumplimiento o concreción de cada uno de los objetivos específicos.

a. Objetivo Específico OE1

El análisis de las variables técnicas asociadas al acondicionamiento térmico en viviendas y la relación existente entre las variables asociadas al confort térmico, el requerimiento de energía y el impacto medioambiental se abordará a partir de la revisión bibliográfica. Esto se presenta en el título 2 del presente documento, apartado denominado “ VIVIENDA, CONFORT Y ENERGÍA”. En este capítulo se derivan las variables de interés para la investigación y cómo estas deben ser analizadas en el estudio de las viviendas.

b. Objetivo Específico OE2

El estudio de los métodos cuantitativos para determinar la demanda y el consumo energético asociado al acondicionamiento térmico de una vivienda se abordará a partir de una recopilación bibliográfica. En esto se estudiarán los métodos estacionario y dinámico en la modelación de edificaciones (apartado 2.5 “Confort térmico y demanda de energía” más adelante). Los primeros centrados parámetros promedios y el principio físico de superposición de fenómenos y, el segundo, a partir de parámetros variables en el tiempo simulados por computadora (herramientas computacionales). En esto se seleccionó un caso de estudio para modelarlo bajo cada uno de estos escenarios. El caso de estudio, denominado “Caso 1: Contraste

de la demanda de energía para calefaccionar una vivienda con baja inercia por absorción a partir de un análisis estacionario y dinámico”, es abordado en apartado 6.1 más adelante.

c. Objetivo Específico OE3

El estudio de los requerimientos energéticos para climatizar la vivienda social chilena, que permitan parametrizar las condiciones de confort térmico e identificar oportunidades de mejora con base a la reglamentación térmica vigente en Chile, se realizará a través del estudio de casos y un estudio bibliográfico, donde destaca la revisión de las siguientes publicaciones: “Eficiencia Energética en Vivienda Social: Un desafío posible” (Bustamante et al., 2013), “Profiling space heating behavior in Chilean social housing: Towards personalization of energy efficiency measures” (Bunster & Noguchi, 2015), “Hygrothermal comfort within the context of social housing and the perceptions of dwellers” (Espinosa & Fuentes, 2015), “El dilema de la leña, ¿cómo reducir la contaminación del aire sin incrementar el costo en calefacción?” (Reyes, Nelson, Navarro, & Retes, 2015) y “Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera” (CDT, 2015c). Esto es abordado en el título 3 “CLIMA, REGLAMENTACIÓN TÉRMICA Y VIVIENDA SOCIAL EN CHILE” más adelante. Luego, y tomando en consideración la revisión bibliográfica, fueron abordados los siguientes casos de estudio: Caso “Caso 1: Contraste de la demanda de energía para calefaccionar una vivienda con baja inercia por absorción a partir de un análisis estacionario y dinámico” en apartado 6.1, caso “Caso 2: Eficiencia energética en una vivienda social – Análisis de mejoras en aislamiento térmico a partir de la reglamentación térmica” en apartado 6.2 y caso “Caso 3: Análisis de ciclo de vida en viviendas, caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social” en apartado 6.3.

d. Objetivo Específico OE4

El estudio de las metodologías de evaluación económica, que permitan evaluar las inversiones de eficiencia energética asociadas al reacondicionamiento térmico de

viviendas, también se abordará a partir de una revisión bibliográfica. Esto redundará en un análisis de estudio de caso, en el que se estudiarán las principales dimensiones asociadas a la evaluación de inversiones de eficiencia energética para el reacondicionamiento térmico de una vivienda social chilena característica (dimensiones de tiempo, desconocimiento e irrevocabilidad). Dentro de la bibliografía que se estudiará destacan las siguientes publicaciones: “Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings” (Kumbaroglu & Madlener, 2012), “The anatomy of investing in energy efficient buildings” (Verbruggen et al., 2011) y “Financial appraisal of efficiency investments: Why the good may be the worst enemy of the best” (Verbruggen et al., 2011). Esto es abordado en el título 4 “EVALUACIÓN DE INVERSIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VIVIENDAS” más adelante. Finalmente, y conforme a la revisión bibliográfica, fue analizado un caso denominado “Caso 4: Evaluación económica de inversiones de eficiencia energética para disminuir el consumo de energía para calefaccionar una vivienda social materializada en albañilería” en el apartado 6.4 más adelante.

e. Objetivo Específico OE5

El estudio de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), útil para contrastar el desempeño ambiental de viviendas con acondicionamiento térmico disímil, se abordará a partir del análisis de un caso de estudio y revisión bibliográfica sobre el ACV en viviendas. Entre los trabajos que se estudiarán destacan los siguientes: “Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - A review” (Islam, Jollands, & Setunge, 2015), “A review of life cycle assessment method for building industry” (Abd Rashid & Yusoff, 2015), “Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review” (Anand & Amor, 2017), “Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review” (Vilches, Garcia-Martinez, & Sanchez-Montañes, 2017), “Life-cycle assessment of buildings” (Hernandez, Oregi, Longo, & Cellura, 2018) y “Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification” (Zabalza Bribián, Aranda Usón, & Scarpellini, 2009). Esto ha sido abordado en el título 5 más adelante, conocimiento útil para el

análisis de un caso de estudio denominado “Caso 3: Análisis de ciclo de vida en viviendas, caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social” en el apartado 6.3 más adelante.

f. Objetivo Específico OE6

El cumplimiento de este objetivo resulta del estudio de la bibliografía y de su aplicación en el análisis de los casos de estudio descritos en los apartados 6.3 y 6.4 más adelante. La secuencia metodológica para el logro de los objetivos se describe en la Fig. 1.3, la que además evidencia la relación existente entre los objetivos específicos (OE1, OE2, OE3, OE4, OE5 y OE6) y la estructura de la presente tesis.

Fig. 1.3 Flujo metodológico para el alcance de los objetivos específicos.

1.4. Estructura de la Tesis

La tesis se estructura en 8 títulos. En el título 1 se aborda el problema de investigación, su justificación y los objetivos para la investigación. Luego le sigue el título 2 en el que se tratan aspectos energéticos y ambientales asociados a la vivienda y el confort térmico, recorriendo conceptos desde la necesidad humana por controlar el entorno ambiental hasta la simulación de viviendas para determinar el requerimiento de energía e impacto ambiental en la generación de las condiciones de confort térmico.

En el título 3 se aborda la incidencia del clima en la definición de viviendas eficientes y sustentables. Particularmente, se estudian los aspectos climáticos y reglamentarios para la edificación en Chile. Esto a partir de datos estadísticos, tipologías constructivas y parámetros que permiten predecir el desempeño de las viviendas chilenas, especialmente la vivienda social en términos de confort, eficiencia y sustentabilidad.

En el título 4 se estudian las metodologías de evaluación económica de inversiones de eficiencia energética que apuntan a mejorar el desempeño de la edificaciones en términos de dotación de rendimiento energético. Poniendo atención en aspectos de tiempo futuro, incertidumbre e irrevocabilidad económica definidos por Verbruggen et al (2011) en la evaluación económica dinámica, diferenciándola de las evaluaciones económicas habituales basadas en la simple determinación del NPV a partir de parámetros, en general, determinísticos.

En el título 5 se aborda el análisis de ciclo de vida en viviendas derivado de la norma ISO14040 (Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework). Este corresponde a la metodología internacionalmente aceptada para evaluar el desempeño ambiental de las edificaciones. En esto se ha considerado una variante simplificada a partir de la exclusión de las fases o elementos menos incidentes y categorías de impacto ambiental analizadas con menor frecuencia en publicaciones científicas. Lo anterior sustentado en la carencia de inventario

ambiental para ciertas fases del ciclo de vida para las edificaciones en países menos desarrollados como lo es Chile.

En el título 6 se analizan 4 casos de estudio que muestran el desempeño energético o ambiental de la vivienda social chilena característica y aspectos económicos para su reacondicionamiento térmico. Esta vivienda, frecuentemente materializada a partir de una albañilería reforzada con vigas y pilares de hormigón armado, muestra ser poco eficiente, confortable y sustentable.

Los análisis y conclusiones que derivan de la revisión bibliográfica y de los análisis y conclusiones específicos para cada caso de estudio, se compendian en el título 7. Finalmente, en títulos 8 se muestran las líneas de investigación futura.

1.5. Alcances y limitaciones

- El estudio se centrará en la vivienda unifamiliar, con énfasis en la vivienda social chilena característica que da cumplimiento a la reglamentación térmica vigente en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones - OGUC con fecha de actualización 22/02/18 (MINVU, 2018c) .
- Se considerará solo la demanda energética asociada a la generación de confort térmico y no la requerida para cubrir necesidades de iluminación, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos o uso de electrodomésticos.
- Se privilegiará el uso de datos o parámetros físicos, estadísticos, energéticos, económicos, energéticos, reglamentarios o medioambientales vinculados a la realidad chilena. Frente a la usencia o carencia de datos o información se adoptarán valores ajustados o parámetros promedios provenientes de la teoría o de bases de datos internacionalmente aceptadas.
- La investigación se centra en la medición de la energía y emisiones contaminantes en las fases de materiales y operación, las que se muestran con mayor incidencia en la mayoría de los análisis de ciclo de vida (ACV) para edificaciones.
- No se considerará el comportamiento de las personas o la gestión en el uso de la energía. Estos aspectos se estandarizarán a partir de valores promedios para viviendas chilenas.
- En los casos de estudio se trabajará con un modelo de vivienda social aislada de tipología frecuente, sin embargo, este tipo de vivienda solo representa una fracción del universo que contiene además viviendas, pareadas, continuas (en fila) o colectivas (departamentos).
 - En general se presentan datos e información vinculada a viviendas chilenas para las regiones en Chile antes de septiembre de 2018 (15 regiones). Es decir, no se considera la reciente incorporación de la región de Ñuble, la que antes estaba incluida en la región de Biobío.

2. VIVIENDA, CONFORT Y ENERGÍA

2.1. Control ambiental y evolución arquitectónica hacia la economía circular.

Desde antaño el hombre ha intervenido el medio ambiente para satisfacer sus necesidades habitacionales. Intervenciones que fueron evolucionando conforme al dominio de nuevos conocimientos (físicos, hidráulicos, termodinámicos, etc.), nuevas tecnologías (hormigón armado, vidrio, etc.) o nuevas motivaciones sociales presentes a lo largo de la historia de la humanidad (ver Fig. 2.1).

Las personas requieren de una condición energética (calor/frío) favorable para desarrollar sus actividades diarias, condición que es proveída por la vivienda que, por principios termodinámicos, intercambia energía (calor/frío) continuamente con el medio que le rodea. Este intercambio depende básicamente del clima (diferencias de temperaturas entre el interior y el exterior, radiación solar, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, etc.), de las personas (actividad metabólica, sensación de confort, etc.) y de las características de la vivienda (transmitancias térmicas, inercia térmica, sistemas activos o pasivos de climatización, emplazamiento, etc.). En la Fig. 2.1 se aprecian diversas viviendas que se abordarán a continuación para evidenciar la relación existente entre el entorno humano, el clima y la energía.

Las primeras viviendas surgieron motivadas por la necesidad de protección frente a un entorno ambiental cambiante (frío en invierno o durante la noche, o bien, calor en el día o durante el verano). El hombre primitivo buscó guarecerse de las lluvias, del viento, del calor y del frío. El cazador nómada, vivía en grutas naturales que le permitían satisfacer esta primera necesidad. Posteriormente, motivado por nuevas necesidades, en una etapa más sedentaria, surgida por desarrollo de la agricultura y el fuego, el hombre construye los primeros refugios elementales fuera de las cavernas e intenta acondicionarlos para una vida familiar. Estas viviendas elementales, como

las viviendas yamanas o alacalufes en Chile (ver Fig. 2.1), responden a una etapa donde el hombre identifica y dispone de los dos elementos fundamentales para el control ambiental: *El estructural*, por un lado, al idear sus primeras viviendas y *el energético*, por otro, a partir del uso y dominio del fuego. (Serra & Coch, 1995) En adelante, la disponibilidad de materiales para la construcción de las estructuras habitacionales y los aportes energéticos, naturales o artificiales, determinarán las características de las viviendas.

En el momento en que el hombre abandona la prehistoria y comienza a registrar con la escritura sus experiencias, las viviendas van evolucionando y se hacen cada vez más complejas en función del surgimiento de nuevas necesidades habitacionales. Así, la historia borra el lento pasar de la choza al poblado y de éste a la ciudad. Surge el trabajo y las clases sociales que hacen cambiar la percepción que se tiene de las viviendas. Las necesidades cambian, se busca el reconocimiento, la majestuosidad, el dominio de los espacios geográficos y la pertenencia a grupos sociales pudientes. Surge así la arquitectura de estilo, los palacios, los templos, entre otros. La necesidad de control ambiental pasa a ser menos crítico y lo que prima es la contemplación de las edificaciones. Sin embargo, satisfacer esta nueva necesidad pasará primero por satisfacer las necesidades de confort. Es así como, en la búsqueda de ejemplos, se aprecia que las civilizaciones antiguas respondieron a esta necesidad a partir de diseños arquitectónicos que consideraban las condiciones climáticas imperantes. Estas consideraciones definieron las formas de sus edificaciones y la configuración de sus poblados. Como ejemplo se pueden tomar las ciudades de la antigua Grecia, ordenadas en cuadrícula, donde los espacios habitables eran orientados al sur para aprovechar la energía del sol y la luz natural (ver vivienda griega en Fig. 2.1). El control de la radiación solar se lograba con la incorporación de un patio anterior que, a través de un pórtico, les protegía del sol alto en verano y les permitía el paso directo de la radiación baja en invierno (Serra & Coch, 1995). Muchas eran las culturas que ya habían descubierto este principio elemental de la arquitectura bioclimática o pasiva en el aprovechamiento de la energía y luminosidad de sol.

La arquitectura romana, considerada por muchos como heredera de la cultura griega, toma las técnicas griegas y conocimientos de otras culturas con los que

desarrolla diseños arquitectónicos ricos en innovaciones (teatros, basílicas, termas, etc.). Destaca el hipocausto romano (ver Fig. 2.1), el que aplicaba conceptos termodinámicos para la calefacción de termas o casas particulares de familias adineradas. Consistía en la construcción de un horno en el exterior de los edificios donde el aire caliente producido era llevado por canalizaciones situadas bajo el suelo a las distintas zonas termales. Los pavimentos se sustentaban sobre pilas de ladrillos y en los muros, para aumentar la temperatura de los espacios, se integraban conductos de barro cocido que daban salida a los humos y aire caliente. Es acá donde se puede hablar de los primeros sistemas calefacción de los espacios habitacionales (H. Hernández, 2009)

Otro ejemplo importante de citar, para evidenciar cómo la arquitectura se adapta al entorno, fueron las antiguas ciudades mesopotámicas donde la arquitectura popular evidencia el uso de muros de adobe de gran espesor, con reducidas aberturas y viviendas cerradas hacia el exterior con habitaciones que abren a un patio central único en respuesta a un clima cálido en extremo y con una alta oscilación térmica. Estructuras que buscaban la conservación de temperaturas agradables al interior de las viviendas durante el día y la noche. Logro alcanzado producto de la gran inercia térmica que se conseguía con los gruesos muros y el frescor que generaban los patios centrales (Serra & Coch, 1995).

Fig. 2.1 Control ambiental, evolución de la arquitectura y tecnología en la vivienda. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Otra tipología de vivienda que se adapta al clima es la vivienda malaya. Estas viviendas responden a un clima cálido húmedo durante todo el año. Por tanto, desde que la inercia térmica no presenta ventajas debido a la reducida oscilación térmica, se propician estructuras livianas que posean elementos generadores de sombras y que permitan la ventilación cruzada para disipar el calor y la humedad al interior de la vivienda. En la vivienda malaya (ver Fig. 2.1) se aprecia el uso de materiales livianos, que está elevada por sobre el nivel de suelo para generar una zona de sombra con permisividad al paso del viento y con ventanas pequeñas que permiten el ingreso de la luz y propician la ventilación cruzada, pero que restringen la radiación solar directa al interior de la vivienda.

La llegada de la revolución industrial (entre mediados del siglo XVIII y mediados del XIX), caracterizada por la intensificación en el uso de nuevas tecnologías, en especial el desarrollo del proceso del hierro para obtener acero y la máquina de vapor que generalizó el uso del carbón y petróleo, dieron al hombre nuevas herramientas que le permitieron intervenir el entorno de manera masiva, donde la extracción indiscriminada de recursos naturales y el surgimiento de la ciudad industrial llevaron a

bruscos cambios en la sociedad y el medio ambiente. Las viviendas comenzaron a incorporar innovaciones tecnológicas, como por ejemplo, calderas, chimeneas centrales, galerías vidriadas, entre otros. Sin embargo, estas viviendas poseían muy pocas consideraciones de arquitectura bioclimática y, por tanto, requerían de gran consumo de energía contaminante para hacerlas confortables (H. Hernández, 2009). Esta realidad, sumado a la aparición de nuevos materiales de construcción como el hormigón armado a fines de siglo XIX y el desarrollo de los sistemas de climatización e iluminación artificial, dieron paso a que los diseñadores pudieran prescindir de las estrategias de control ambiental pasivo. Dando paso a diseños poco eficientes y no sustentables, los que demandaban gran cantidad de energía durante el ciclo de vida de las viviendas. Como ejemplo se pueden citar las viviendas The Mobius House y The glass house (ver Fig. 2.1) íconos arquitectónicos del siglo XX. (H. Hernández, 2009). Claramente estos diseños presentan cargas ambientales importantes, bastará con mencionar la energía incorporada y la energía requerida para generar las condiciones de confort térmico durante su uso; por lo que, claramente, estas viviendas no responden a requerimientos para diseños sustentables. Con el aumento de la contaminación y el cambio climático, un estándar térmico que ignora la sostenibilidad será, en el mejor de los casos, desprestigiado y, en el peor, compartirá la responsabilidad de los edificios insostenibles (Nicol, 2002).

Debido al calentamiento global y al potencial del sector edificación en la reducción de sus efectos, hoy los diseñadores habitacionales han retomado la arquitectura bioclimática como base para sus diseños y han utilizado la tecnología para reducir el uso de energía y las emisiones contaminantes, como ejemplo se puede citar el primer plan de vivienda social con protección de la tierra en el Reino Unido (ver vivienda Honingham en Fig. 2.1), cuyos diseños brindan un entorno de vida más seguro, son más eficientes energéticamente en comparación con las viviendas tradicionales, presentan eficiencia en la construcción y menores costos de mantenimiento y operación. Además de un impacto visual mínimo, uso doble del suelo y menor ruido (Dorra, Farroh, & Amer, 2018). Estos aspectos han sido abordados ampliamente, poniendo atención hoy no solo a conseguir edificios cero energía, sino también, viviendas diseñadas con base a los principios de economía circular (Circular Economy o CE). Esta nueva visión ha cambiado el patrón lineal para el diseño, construcción, uso y desuso de los edificios de a uno que cierra bucles al reutilizar los desperdicios y

los recursos de cada fase del ciclo de vida de la vivienda conforme a su interacción con el medio social, económico y ambiental. (Leising, Quist, & Bocken, 2018).

Las edificaciones que responden a los principios de economía circular – 3 principios pueden citarse: 1) Diseñar en desechos y contaminación para reducir las emisiones de GEI en toda la cadena de valor. 2. Mantener los productos y materiales en uso para retener la energía incorporada en los productos y materiales y 3. Regenerar los sistemas naturales para secuestrar carbono en el suelo y los productos, es decir, favorecer el uso de recursos renovables (sol, madera, etc.) con el objetivo de mejorar los sistemas naturales al devolver nutrientes valiosos al suelo, ofreciendo oportunidades para el secuestro de carbono. (Ellen MacArthur Foundation, 2019) – se caracterizan por incorporar innovaciones al modelo de negocio inmobiliario que propician: a) la eficiencia en el uso de materiales y energía, b) la creación de valor para el desperdicio, c) la sustitución de la energía no renovable por renovable, e) la entrega de funcionalidad, f) la adopción de un rol de gestión integrador, g) la promoción de la suficiencia, h) la creación de valor inclusivo, i) la reutilización para diferentes propósitos sociales y j) el desarrollo de soluciones que escalen o se repliquen (Leising et al., 2018).

En la evaluación de la sustentabilidad de las edificaciones, el ACV es la técnica internacionalmente aceptada para evaluar los impactos ambientales de las viviendas, lo que es relativamente nuevo y se ha extendido en el último tiempo a la investigación de la economía circular en la edificación (Fouquet et al., 2015) (Pomponi & Moncaster, 2017). Por otro lado, al encuadrar la investigación de edificios desde una perspectiva de la economía circular, se evidencia una carencia de investigación y una falta de enfoque en la vivienda, con la mayoría de las investigaciones diseñadas en torno a ciudades y vecindarios o materiales de construcción. Desde esta perspectiva, se puede estructurar la investigación en tres niveles: *nivel macro* (ciudades y vecindarios), *nivel meso* (edificios) y *nivel micro* (ensamblajes, componentes y materiales) (Pomponi & Moncaster, 2017). Por otro lado, se pueden establecer seis dimensiones para el estudio de la edificación en economía circular (medioambiental, tecnológico, económico, social, gubernamental y conductual). Esto permite estructurar el desarrollo de la investigación de los edificios en el tiempo, desde la edificación verde, edificación sustentable a la edificación circular, lo que se puede

apreciar en la Fig. 2.2. Consecuentemente, es necesario ir completando los vacíos de conocimiento para edificaciones sustentables que permitan pasar a la dimensión que abordan las edificaciones circulares, sobre todo lo vinculado a la fase de desuso de la edificación.

Fig. 2.2 Evolución y dimensiones de investigación en edificios. Fuente: (Pomponi & Moncaster, 2017)

La edificación es un actor importante dentro del sector construcción, sector que es responsable de enormes cargas ambientales en términos de consumos de recursos naturales y de energía. El sector consume alrededor del 60% de los minerales extraídos de la litosfera, es decir, el 24% de las extracciones globales (Vitale, Arena, Di Gregorio, & Arena, 2017). Estas cifras indican la necesidad de mejorar la sostenibilidad de los edificios mediante la adopción de soluciones de diseño y procedimientos constructivos dirigidos a optimizar la utilización de los recursos y la minimización de residuos. Esto es un problema crucial del sector de la construcción, que requiere de una gestión rápida y adecuada debido a la gran cantidad de residuos de construcción y demolición (RCD). La importancia de esta preocupación también es destacada por el enfoque del metabolismo urbano, que sugiere investigar la dinámica en los depósitos de construcción e infraestructura, con el objetivo de desarrollar

tecnologías para reutilizar grandes cantidades de minerales almacenados en la sociedad y reducir el mineral extracción (Vitale et al., 2017). Aspecto que deben ser abordados por las dimensiones gubernamental y conductual para pasar de un nivel meso a un nivel macro a partir de la creación de valor para el desperdicio. Hoy el valor del desperdicio es inherente al tipo de desperdicio, es decir, no es lo mismo un desperdicio de ladrillo que una pieza de madera, donde este último resulta ser sustituyente de combustible fósil en la generación de energía calórica sin necesidad, en general, de pasar por un proceso de transformación para reutilizarlo como materia prima para obtener nuevos productos como sería moler un ladrillo para incorporarlo como material colorante o adición a productos de mortero u hormigón.

Aunque la economía circular va más allá del reciclaje y se basa en un sistema de restauración industrial enfocado a tratar los desechos como un recurso (Ghosh, 2020), un buen primer paso para hacer al edificio más sustentable es conceptualizarlo más eficiente, buscando reducir el consumo de recursos y que los recursos consumidos (materiales, productos de construcción, energía, otros) asocien menor carga ambiental y mayor potencial de recuperación, reciclaje y reutilización. En este sentido, el consumo circular en la práctica debiera abordarse más allá de incorporar los principios habituales de reducción, reciclaje y reutilización (3R), sino prestando también atención al potencial de recuperación del desecho (energía residual, desechos, etc.), puesto que la recuperación de ser costosa y compleja haría poco atractivo el reciclaje o la reutilización desde el punto de vista económico.

Desde la filosofía de la economía circular, es clave considerar los materiales involucrados en los procesos de generación de un edificio (vista de proceso que se será abordado en el siguiente apartado) como nutrientes o alimentos que resultan ser el desperdicio de otro procesos al igual como sucede en la naturaleza (Waste=food, la naturaleza opera de acuerdo con un sistema de nutrientes y metabolismos en el que no existen desechos, es decir, de la cuna a la cuna), en los cuales dos categorías principales son los actores: (a) biológicos y (b) técnicos (Ellen MacArthur Foundation, 2019). El modelo distingue los ciclos técnicos y biológicos. El consumo ocurre solo en ciclos biológicos, donde los alimentos y los materiales de base biológica (como el algodón o la madera) están diseñados para retroalimentar el sistema a través de procesos como el compostaje y la digestión anaerobia. Estos ciclos regeneran los

sistemas vivos, como el suelo, que proporcionan recursos renovables para la economía. Los ciclos técnicos recuperan y restauran productos, componentes y materiales a través de estrategias como la reutilización, reparación, remanufactura o (en última instancia) reciclaje (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

El marco de la cuna a la cuna (Cradle to Cradle en inglés) se centra en el diseño para la efectividad en términos de generar productos de construcción, como un edificio, con impacto positivo y reducción de los impactos negativos a través de la eficiencia. Los procesos seguros y productivos del "metabolismo biológico" de la naturaleza se han recibido en el diseño de la cuna a la cuna que conducen a un modelo para desarrollar un flujo de "metabolismo técnico" de materiales y productos de construcción. Esto requiere el productos y elementos que puedan diseñarse para la recuperación y reutilización de forma continua como nutrientes biológicos y técnicos dentro de estos metabolismos (Ghosh, 2020).

2.2. El ciclo de vida de la edificación y su visión de proceso

La revisión bibliográfica evidencia que no existe un consenso para estructurar las etapas del ciclo de vida de una vivienda. Algunos investigadores, en los estudios del ciclo de vida en edificaciones, estructuran los estudios a partir de tres etapas: fase de pre-uso, fase de uso y fase de desuso (Vitale et al., 2017) (Asdrubali, Baldassarri, & Fthenakis, 2013). Sin embargo, la estructuración frecuente se presenta en cuatro etapas: etapa de producto o materiales, etapa de construcción, etapa de uso y etapa de desuso o término de vida útil de la vivienda conforme a la norma EN 15804 "Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products" (Mangan & Oral, 2016) (Oregi, Hernandez, & Hernandez, 2017) (Vilches et al., 2017).

Fig. 2.3 Procesos y módulos en los análisis de ciclo de vida de edificaciones. Fuente:
(Panagiotis Chastas, Theodosiou, Kontoleon, & Bikas, 2018)

La Fig. 2.3 muestra los procesos (fases) y los módulos en las evaluaciones del ciclo de vida de edificios, según las reglas de categorización para productos de construcción (EN 15804:2012). En ella se puede identificar un módulo (D) que va más allá de las cuatro etapas definidas previamente para el ciclo de vida del edificio (de A hasta C), módulo vinculando los principios de economía circular a partir del re- uso, recuperación y reciclaje de materiales o elementos componentes del edificio (Ghosh, 2020). En esto, y en congruencia con la visión de economía circular, existen factores económicos asociados a los diferentes actores que utilizan los flujos de materiales de desecho y los flujos de energía de desecho, así como los recursos naturales renovables locales/regionales, que reducen la entrada de recurso virgen y la producción de residuos y emisiones del sistema industrial en su conjunto (Korhonen, 2005). En este contexto, la edificación debe ser entendida como un proceso de producción con visión de ecosistema industrial (ver Fig. 2.4), donde actores tales como productores de materiales de construcción (o de elementos componentes de edificios), usuarios de las edificaciones, recicladores, entre otros actores sociales y económicos, participen de un sistema de producción que busque minimizar la generación de residuos y emisiones en la construcción de los edificios en su conjunto.

Fig. 2.4 Flujo simplificado de materia y energía en la visión del ecosistema industrial (IE).

Fuente: (Korhonen, 2005)

Dado lo anterior se evidencia una visión de flujos de procesos en el ciclo de vida de la edificación, de modo que si se fija la atención en la fase de construcción, se pueden definir procesos previos y posteriores a la construcción como aguas arriba y aguas abajo conforme se evidencia en la Fig. 2.3. De esta forma, y siguiendo los principios de modelación de procesos para el desarrollo de la industria ecológica, para cada proceso (etapas) se definen entradas de recursos materiales, energéticos o de otro tipo (inputs) que, conjugados a partir de un flujo de transformación, generan subproductos o salidas (outpus) que alimentan las etapas siguientes. En estas etapas de producción se generan residuos y emisiones contaminantes que deben minimizarse. Desecho que puede ser clasificado en las siguientes categorías de impacto: ser categorizados en: Potencial de calentamiento global o efecto invernadero (GWP), agotamiento de la capa de ozono (AO), acidificación terrestre (AT), eutrofización de agua dulce (EFAD), eutrofización marina (EFM), formación de oxidantes fotoquímico (FOF), agotamiento de recursos hídricos (ARH), agotamiento de recursos abióticos-metales (ARA-M) y agotamiento de recursos abióticos-combustibles fósiles (ARA-F).

A continuación se describe cada uno de las etapas del ciclo de vida de la vivienda en conformidad a la Fig. 2.3

- Etapa de productos (A1-3): Corresponde al proceso en el que se generan los productos o materiales para la construcción, los que corresponden recursos de

entrada para el proceso de construcción de la edificación. Esta etapa consta de los procesos de abastecimiento de materia prima (módulo A1), de transporte al lugar de fabricación (A2) y de la fabricación del producto (A3). Productos que por el solo hecho de ser escogidos por el diseñador, asocian un impacto medioambiental que es incorporado a la edificación, especialmente los gases de efecto invernadero (Greenhouse Gases – GHG) y la energía incorporada en los materiales (Embodied Energy – EE). La Tabla 1 muestra la evaluación del impacto ambiental para algunas categorías de impacto para materiales de construcción frecuente, desprendiéndose de su lectura que la madera debiera ser un material preferido.

Tabla 1. Evaluación del impacto ambiental de materiales de construcción frecuentes.

Material	Efecto invernadero	Acidificación	Contaminación atmosférica	Ozono	Metales pesados	Energía	Residuos sólidos
Cerámica	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+
Piedra	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+
Acero	++	++	+	+++	++	++	+++
Aluminio	+	+	++	+++	+	+	+++
PVC	++	++	+	+++	++	++	++
Poliestireno	++	+	+	++	+	+	++
Poliuretano	+	++	+	+	++	++	+++
Pino	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
+++ impacto pequeño; ++ impacto medio; + impacto elevado.							

Fuente: (Baño Nieva & Vigil-Escalera del Pozo, 2005)

- Etapa de construcción (A4-5): Corresponde al proceso que utiliza los materiales o productos elaborados en la etapa previa (ladrillos, madera, hormigón, ventanas, puertas, prefabricados, extractor de aire, etc.), los que conjugados a partir de un proceso o técnica constructiva con otros recursos productivos (maquinarias, humanos y espacio geográfico) se logra construir el edificio. En este contexto, la etapa de construcción incluye el proceso de transporte de los materiales o productos a la obra (A4), y los procesos de construcción propia de la obra y de las estructuras auxiliares para la construcción y bodegaje (A5). Al igual que en las otras fases, en esta también se producen emisiones y residuos que repercuten negativamente en el ambiente y que deben ser reducidos o eliminados. En la Fig. 2.5 se contrasta una construcción tradicional con una

propuesta de construcción sustentable, en la que se incorporan elementos de reutilización, rehabilitación y reciclaje en la construcción modular en base a edificios desmontables y de alquiler. En ella se evidencia el principio de economía circular donde los desperdicios se transforman en recursos de entrada para otras fases del ciclo de vida de la edificación (“waste = food”).

CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL

PROPUESTA DE CONSTRUCCIÓN MODULAR EN BASE A EDIFICIOS DESMONTABLES Y DE ALQUILER

Fig. 2.5 Contraste de una construcción tradicional versus una propuesta sustentable. Fuente:
(Wadel, 2009)

- Fase de uso u operación (B1-7): Corresponde al período de puesta en servicio del edificio y a la etapa más extensa en el horizonte temporal del ciclo de vida de la edificación. En la fase de uso el edificio deberá brindar condiciones de funcionalidad y confort a sus usuarios, procesos que demandarán recursos energéticos y materiales para cumplir con estos objetivos y, por lo cual, se generarán emisiones y desechos que podrían afectar el aire, el agua y la tierra. Lo anteriormente expuesto se ve reflejando en la edificación diagramada en la Fig. 2.6. Esta etapa, y como se verá en el apartado 5.2 más adelante, corresponde a una de las fases con mayor incidencia en el ACV. Esto en términos de consumo de energía y emisiones de CO₂e al medio ambiente. En esta etapa se incluyen los procesos de uso previsto para el edificio, los que vinculan impactos ambientales y aspectos derivados de los componentes del edificio durante su uso normal (B1), operaciones de mantenimiento (B2), procesos de reparación (B3) o reemplazo de piezas o

elementos del edificio (B4), procesos de renovación o reacondicionamiento del edificio (B5), uso de energía operacional – energía para calefacción, enfriamiento, ACS, ventilación, iluminación, energía auxiliar para bombas o sistemas de control y automatización en el edificio, otros – (B6) y el uso de agua en la edificación (B7). El uso de energía operacional (B6) corresponde al proceso más incidente dentro de esta fase. Específicamente para las categorías de impacto que son evaluadas con mayor frecuencia en los ACV para edificaciones, es decir, GWP (Global Warming Potential) y CED (Cumulative Energy Demand) (Anand & Amor, 2017) (Islam et al., 2015) (Pomponi & Moncaster, 2017). Esta mayor incidencia es debida, básicamente, a la duración de la fase, a la intervención humana, al gran número de variables involucradas y a la gran cantidad de emisiones y recursos que se le asocian.

Fig. 2.6 Ejemplo de diagrama de Sankey de uso de energía, desperdicios e ineficiencias para un edificio con proceso de producción. Fuente: (Bjork et al., 2008)

- Fase de término de vida útil o desuso (C1-4): Corresponde a la última fase del ciclo de vida de la vivienda. La llegada del término de vida del edificio puede originarse por varias razones, pero sin importar la razón, los impactos ambientales originados del proceso de deconstrucción y/o demolición (C1) deben ser minimizados. En esta etapa además se consideran los procesos de transporte a los lugares de tratamiento de desperdicios (C2), el proceso de tratamiento del desperdicio (C3) y la eliminación del residuo (C4). En esta etapa cobra gran relevancia qué hacer con los residuos de construcción y demolición (RCD). Los resultados de investigaciones en torno al ACV de proyectos, muestran que una gran proporción de los desechos va a botaderos y que las categorías de impacto GWP y energía resultan ser las más frecuentes en la evaluación del desempeño ambiental de los sistema de gestión RCD, seguidas por la acidificación potencial, eutrofización potencial, oxidación fotoquímica potencial y agotamiento potencial de la capa de ozono (ver Fig. 2.7) (Vitale et al., 2017) (Bovea & Powell, 2016). En la Fig. 2.8 se muestra la distribución de las diferentes estrategias aplicadas en la gestión de los RCD considerando 66 casos de estudios, evidenciando que el re-uso y reciclaje in-situ corresponde a la menor proporción en los tratamientos de desecho.

Fig. 2.7 Distribución de categorías de impacto para evaluar el desempeño ambiental de sistemas de gestión RCD en diferentes casos de estudio. Fuente: (Bovea & Powell, 2016)

Fig. 2.8 Estrategias aplicadas en la gestión de RCD en diferentes casos de estudio. Fuente:
(Bovea & Powell, 2016)

- Beneficios y cargas más allá de los límites del sistema (D): No corresponde a una etapa del ciclo de vida de la vivienda. Corresponde a un módulo que puede reportar información adicional voluntaria sobre la vivienda, en la que se reflejan los beneficios y cargas más allá de los límites del ciclo de vida del edificio, incorporando aspectos de economía circular que reflejan la reutilización, la recuperación y el reciclaje de elementos o materiales para generar energía o conformar nuevos productos. Esta información se muestra en el módulo D y se basa en los procesos del ciclo de vida informados para el módulo C. Los componentes para la reutilización y los materiales para el reciclaje y la recuperación de energía se consideran recursos potenciales para su uso futuro. Por lo tanto, el módulo D cuantifica los beneficios o cargas ambientales netas resultantes de la reutilización, el reciclaje y la recuperación de energía resultante de los flujos netos de materiales y la energía exportada que sale del límite del sistema (Ghosh, 2020).

Consecuentemente, la evaluación ambiental de una edificación a partir del análisis del ciclo de vida se sustenta en la teoría de procesos de producción industriales ecológicos. Es decir, un proceso que toma y conjuga recursos de entrada (“inputs”) a partir de un flujo que redunde en productos, subproductos, desechos y emisiones al medio ambiente (“outputs”), tal como se refleja en la Fig. 2.9. Por consiguiente, y en términos de eficiencia y sustentabilidad, interesa reducir los recursos de entrada (energía, agua, materiales, etc.) y minimizar o eliminar los desechos y emisiones contaminantes al medioambiente durante el ciclo de vida de la edificación.

Fig. 2.9 Fases del ciclo de vida de una vivienda y su visión de proceso. Fuente: (Sanz, 2012)

2.3. Energía y emisiones

2.3.1. Consumo de Energía primaria

El consumo mundial de energía primaria creció un 2,2% en 2017, frente al 1,2% en 2016 y el más alto desde 2013. El crecimiento fue inferior al promedio en Asia Pacífico, Oriente Medio y Sur y Centro América, pero por encima del promedio en otras regiones. Todos los combustibles, excepto el carbón y la hidroelectricidad, crecieron a tasas superiores a la media. El gas natural proporcionó el mayor incremento en el consumo de energía con 83 millones de toneladas de petróleo equivalente (mtoe), seguido de la energía renovable (69 mtoe) y el petróleo (65 mtoe). (BP, 2018)

A nivel mundial el consumo de energía primaria ascendió a 13511,2 millones de toneladas de petróleo equivalente el año 2017, donde Chile presenta una participación de tan solo 0,3%, lejos de los principales consumidores como China o Estados Unidos con 23,2% y 16,5% respectivamente.

Las tasas de crecimiento anual para el consumo de energía primaria en Chile, España y la OCDE, se muestran en la Fig. 2.10 en las últimas décadas. Chile ha crecido a una tasa promedio de 2,5% anual los últimos 20 años, superior a como lo ha hecho España (1,1%) y los países de la OCDE (0,4%). (BP, 2018)

El petróleo sigue siendo el combustible dominante del mundo, que representa poco más de un tercio de la energía consumida. En el 2017, la cuota de mercado del petróleo disminuyó ligeramente, luego de dos años de crecimiento. La participación de mercado del carbón cayó a 27,6%, el nivel más bajo desde 2004. El gas natural representó un récord del 23,4% del consumo mundial de energía primaria, mientras que la energía renovable alcanzó un nuevo máximo del 3,6% y se mantiene su alza en el tiempo (ver Fig. 2.11). Los valores para Chile, España y los países de la OCDE se muestran en la Fig. 2.12. (BP, 2018)

Fig. 2.10 Tasas de crecimiento anual de consumo de energía primaria para países de interés.

Fuente: (BP, 2018)

Fig. 2.11 Participación de los tipos de combustibles en el consumo global de energía primaria.

Fuente: (BP, 2018)

Fig. 2.12 Consumo de energía primaria por tipo de combustible para países de interés. Fuente: (BP, 2018)

La distribución del consumo final de energía por sectores a nivel global y, en específico, los consumos distribuidos por sector para Chile los años 2006 y 2016 se muestran en la Fig. 2.13. Se aprecia para el año 2016 que los sectores que demandan más energía en Chile son el sector Transporte (35%), seguido por la Industria y Minería (39%) y el Consumo Comercial, Público y Residencial (CPR) (22%), donde el sub sector residencial representa aproximadamente el 70% del sector CPR, valores que pueden ser contrastados con la distribución a nivel mundial que muestran para el sector CPR una proporción mayor. (Nejat, Jomehzadeh, Taheri, Gohari, & Mueh, 2015)

Fig. 2.13 Total del consumo final por sector en Chile y su contraste a nivel global. Fuentes: (CNE, 2017) (Nejat et al., 2015)

El carbón sigue siendo la fuente de energía dominante en el mundo para producir electricidad, con una participación del 38,1% en 2017, casi tanto como el gas natural (23,2%) y la hidroelectricidad (15,9%) combinados, que ocupan la segunda y tercera posición. La participación de las fuentes renovables en la generación de energía fue de 8,4% en 2017, con un aumento de 6,1 puntos porcentuales desde 2007. En el mismo período, la participación de la energía nuclear disminuyó en 3,4 puntos porcentuales, mientras que el carbón perdió 31 puntos porcentuales (BP, 2016).

Hacia el 2030 se espera que la electricidad sea la principal fuente de energía consumida en las ciudades en el mundo (Asociación de generadoras de Chile, 2018). La generación de electricidad es un sector que demanda una gran cantidad de recurso energéticos primarios, demanda que crecerá al año 2040 con aumentos en la proporción de componentes renovables (Exxon Mobil Corporation, 2018). La generación de electricidad crecerá conforme a escenarios previstos en torno a decisiones energéticas. El World Energy Outlook 2018 (WEO2018) presenta un escenario basado en las políticas energéticas existentes NPS (New Policies Scenario) y otro denominado SDS (Sustainable Development Scenario) de desarrollo sostenible para lograr objetivos acordados internacionalmente sobre el cambio climático, calidad del aire y acceso universal a la energía moderna. Conforme a estos escenarios, la generación de energía y la demanda de energía primaria limpia para su producción

varían sustancialmente, esto se aprecia en las Fig. 2.14 y Fig. 2.15 para el mundo y para las zonas centro y sur de América. Evidenciando que en las zonas centro y sur de América predominarán las energías limpias.

Fig. 2.14 Generación de energía eléctrica en el mundo por tipo de energía primaria al año 2040 basado en 2 escenarios. Fuente: (IEA, 2018b)

Fig. 2.15 Generación de energía eléctrica en centro y Sudamérica por tipo de energía primaria al año 2040 basado en 2 escenarios. Fuente: (IEA, 2018b)

En Chile, al mes de enero 2019, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) presentó una potencia instalada de generación igual a 24.617 MW, los que corresponden aproximadamente al 99% de la capacidad instalada total en Chile (sistemas medianos como Aysén y Magallanes y sistemas aislados son menos del 1%). Del total de capacidad instalada en el SEN, el 46,4% corresponde a tecnología de generación en base a recursos renovables (hidroeléctrica, solar FV, eólica, biomasa y geotermia). El 53,6% corresponde a centrales termoeléctricas a gas natural, carbón o derivados del

petróleo (Asociación de generadoras de Chile, 2019). Esto se aprecia en la Fig. 2.16. Con respecto a la generación bruta en el SEN, la Fig. 2.17 muestra producción del orden de los 6.500GWh de energía, donde en enero de 2019 el 48,3% provino de fuentes renovables.

Fig. 2.16 Capacidad instalada total para la generación de electricidad en Chile. Fuente: (Asociación de generadoras de Chile, 2019)

Fig. 2.17 Generación bruta del SEN por fuente entre 01-2018 y 01-2019. Fuente: (Asociación de generadoras de Chile, 2019)

La planificación energética de largo plazo (PELP) en Chile proyecta que el consumo de electricidad crecerá entre 2 y 3 veces al año 2050 (Asociación de generadoras de Chile, 2018) y se prevé que la generación eléctrica en el futuro será renovable. Esto debido al impulso normativo derivado de las leyes de energías renovables el año 2010 (Leyes 20.257 y 20.698), a que Chile posee un gran y muy diverso potencial de energía renovable en todo su territorio y a la disminución del precio de las tecnologías asociadas a la generación de energía (Asociación de generadoras de Chile, 2018). En términos de proyección, durante el año 2017 la PELP observó que para distintos escenarios modelados (A-E) una tendencia que al año 2035 más del 60% de la energía generada sería de origen renovable (llegando a un 75% en el mejor de los casos) y aproximadamente un 70% al año 2050 (llegando a casi 90% en el mejor de los casos). Los rangos para dichas modelaciones se aprecian en la Fig. 2.18

Fig. 2.18 Participación estimada de energías renovables en la matriz eléctrica chilena por escenario. Fuente: (Comité Ejecutivo de Escenarios Energéticos Chile, 2018)

2.3.2. Emisiones e incremento de temperaturas

Las emisiones de gases de efecto invernadero alcanzaron aproximadamente las 32.500Mt el 2017, las que seguirán aumentado al año 2040 pero un ritmo menos acelerado de lo que ha sido en las pasadas décadas. Las plantas de carbón representan un tercio de las emisiones de CO₂ en la actualidad y la mitad tiene menos de 15 años. Escenario con poca sintonía para mitigar los efectos del calentamiento global conforme a la comunidad científica. La Fig. 2.19 muestra las predicciones al año 2040 basados en los escenarios NPS y SDS según el WEO2018. (IEA, 2018b)

Fig. 2.19 Escenarios en la predicción de las emisiones de CO₂ al 2040. Fuente: (IEA, 2018b)

El incremento en gases de efecto invernadero y la variabilidad del clima en diferentes escalas de tiempo han derivado en un aumento gradual de las temperaturas medias globales. Las temperaturas alcanzaron 1°C por encima de los niveles preindustriales el 2015 producto de las actividades humanas (IPCC, 2018). Los riesgos relacionados con el calentamiento global por sobre los 1,5°C son altos para los sistemas naturales y humanos (ver Fig. 2.20), por lo que lograr un nivel de diferencia por debajo de 2°C es insuficiente para evitar impactos importantes del cambio climático conforme al acuerdo de París (OECD, 2018). El Acuerdo de París es un instrumento legal internacional con el potencial de medir la magnitud y la

urgencia del desafío climático. Especifica tres objetivos principales. Primero, mantener el aumento de la temperatura de la superficie promedio mundial muy por debajo de 2°C sobre los niveles preindustriales y perseguir los esfuerzos para limitar el aumento a 1,5°C. En segundo lugar, aumentar la capacidad de los países para adaptarse a los impactos climáticos adversos y fomentar la resiliencia. En tercer lugar, hacer que los flujos financieros sean consistentes con el desarrollo de bajas emisiones y resiliente al clima. (OECD, 2018).

Proyecciones de la temperatura de la superficie global promedio para fines del siglo muestran rangos entre 2,6°C y 3,1°C por encima de los niveles preindustriales (OECD, 2018). Por tanto, la acción y los compromisos sobre las emisiones de GHG conforme al acuerdo de París para restringir este nivel por debajo de 2°C, y mucho menos de 1,5°C, se muestran inadecuados para limitar el aumento de la temperatura de la superficie global promedio (OECD, 2018). Si continúan aumentando las emisiones al ritmo actual, es probable que el calentamiento global alcance los 1,5°C entre 2030 y 2052 (IPCC, 2018). La Fig. 2.21 muestra este escenario y otros conforme a acciones sobre el accionar antropogénico.

Fig. 2.20 Impactos y riesgos para sistemas naturales y humanos derivados del aumento de la temperatura por sobre los niveles preindustriales. Fuente: (IPCC, 2018)

Cumulative emissions of CO₂ and future non-CO₂ radiative forcing determine the probability of limiting warming to 1.5°C

Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways

Fig. 2.21 Escenarios para limitar el calentamiento por sobre 1,5°C. Fuente: (IPCC, 2018)

En Chile las emisiones de CO₂ se han incrementado en aproximadamente 100% las últimas dos décadas, sin embargo, estas emisiones por unidad de producción se han mantenido estableces en el tiempo con una leve disminución, evidenciando un desacoplamiento entre crecimiento de emisiones y crecimiento de la producción (Ver Fig. 2.22 y Fig. 2.23).

CO₂ emissions
Chile 1990 - 2016

Fig. 2.22 Emisiones CO₂ en Chile. Fuente: (IEA, 2018b)

Fig. 2.23 Emisiones por unidad de PIB en Chile. Fuente: (IEA, 2018b)

Las emisiones asociadas al consumo eléctrico del sector Comercial, Público y Residencial (CPR) chileno no representaban una proporción importante de las emisiones en contraste con el sector minero antes del 2017, pues el primero demandaba energía del Sistema Interconectado Central (SIC), el que presentaba una fuerte componente de energía limpia, básicamente hidráulica, y el segundo demandaba energía del Sistema Interconectado Norte Grande (SING), el que utiliza una gran proporción de energía de origen fósil (ver Fig. 2.24). Hasta el año 2017 se preveía que el sector CPR representaría el 8% de las emisiones totales al año 2030 del sector eléctrico (Asociación de generadoras de Chile, 2017), sin embargo, este escenario cambió con la interconexión de los sistemas SIC y SING el 21 de noviembre de 2017 dando origen al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) (Ver noticia en Fig. 2.25). Los cambios en las emisiones para promedios anuales en los factores de emisión, en tCO₂/MWh, considerando que gran parte de la energía es proveída por SIC, se muestran en la

Tabla 2. Factores de emisiones para otras fuentes de energía utilizados en Chile se muestran en la Tabla 3.

Fig. 2.24 Capacidad de generación eléctrica instalada en Chile por tipo de tecnología en MW.
Fuente: (CNE, 2017)

La interconexión ya es una realidad: TEN conecta el SIC con el SING e inicia operación comercial

21 noviembre, 2017

Un hito largamente esperado en la historia del desarrollo eléctrico de Chile se cumplió este martes 21 de noviembre, luego que se conectaran de manera formal el Sistema Interconectado Central (SIC) con el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), los dos principales sistemas eléctricos del país que hasta hoy operaban de manera independiente.

Con la sincronización de los dos sistemas se hizo realidad la interconexión eléctrica nacional, uno de los principales objetivos de la Agenda de Energía 2050.

La interconexión fue posible luego que TEN, empresa filial de ENGIE y Red Eléctrica Internacional, finalizara con éxito un proyecto de 600 km entre las regiones de Antofagasta y Atacama y que constituye la pieza fundamental para este proyecto.

“La interconexión entre el SING y el SIC es un proceso inédito en Chile y marca el inicio de una nueva etapa en la historia del desarrollo eléctrico nacional, que concretizará la creación de un sistema único, más robusto, competitivo y con beneficios claros para todos los chilenos”, aseguró TEN, una vez finalizada la interconexión.

Fig. 2.25 Noticia sobre interconexión SIC y SING, dando origen al SEN. Fuente: (NME, 2017)

Tabla 2. Factores de emisión promedio anual en Chile, en tCO₂/MWh por tipo de sistema.

AÑO	SISTEMA	FACTOR EMISIÓN
2010	SIC	0,3555
2010	SING	0,7518
2011	SIC	0,3842
2011	SING	0,7388
2012	SIC	0,3945
2012	SING	0,8057
2013	SIC	0,4351
2013	SING	0,8113
2014	SIC	0,3637
2014	SING	0,7905
2015	SIC	0,3459
2015	SING	0,7644
2016	SIC	0,3970
2016	SING	0,7667
2017	SIC	0,3364
2017	SING	0,7730
2018	SEN	0,4187

Fuente: (Comisión Nacional de Energía, 2018)

Tabla 3. Factores de emisiones para combustibles utilizados en Chile

Combustible		kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /m ³	kg CO ₂ /ton	PCI kcal/kg	Densidad kg/m ³
Gasolina para vehículos		69,3	2.241	3.070	10.583	730
Kerosene de aviación		71,5	2.554	3.153	10.536	810
Diesel		74,1	2.676	3.186	10.273	840
Petróleo combustible	Petróleo combustible N°5	77,4	2.899	3.127	9.652	927
	Petróleo combustible N°6	77,4	2.955	3.127	9.652	945
	Petróleo combustible IFO 180	77,4	2.927	3.127	9.652	936
Gas licuados de petróleo		63,1	1.642	2.985	11.300	550
Gas natural		56,1	1.970	-	8.407	-

Fuente: (Ministerio de Energía, 2018)

Con respecto al aumento de las temperaturas en Chile y los impactos ambientales derivados del calentamiento global, considerando el escenario RPC (Representative Concentration Pathways) por el IPCC, se realizaron modelaciones para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, que corresponden a los escenarios más y menos favorable en torno al nivel de concentraciones de CO₂ en la atmósfera.

Estas proyecciones muestran aumentos de temperatura en todo el territorio nacional, con gradientes que van de norte a sur y de Cordillera a Océano. Para el período entre 2011 y 2030, los aumentos de temperatura fluctúan entre los 0,5°C para la zona sur y los 1,5°C para las zonas norte grande y altiplánica.

Para el periodo entre 2031 y 2050, se mantiene el patrón de calentamiento, pero con valores mayores. El escenario RCP8.5 (más desfavorable) proyecta aumentos de temperatura que llegan a los 2°C. a diferencia del escenario RCP2.6 que considera fuertes políticas climáticas de mitigación al calentamiento global. Esta información se desprende la Fig. 2.26

Fig. 2.26 Incrementos en la temperatura, para el periodo 2031-2050, con respecto al periodo 1961-1990, para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. Fuente: (Ministerio del Medio Ambiente, 2014)

2.3.3. Energía y emisiones en edificaciones

Con respecto a los edificios, estos representan aproximadamente el 40% del consumo mundial de energía (ver Fig. 2.27), desempeñan un papel importante en el mercado de la energía y se pronostica que la demanda de energía de los edificios continuará creciendo en todo el mundo en las próximas décadas. Lo que se desprende al observar el potencial global de diferentes sectores en la mitigación de las emisiones de CO₂ al 2030 en la Fig. 2.28. Además, los edificios son responsables por aproximadamente un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero relativas al consumo de energía mundial (Nejat et al., 2015). La Fig. 2.27 muestra que aproximadamente el 75% del total de la energía es consumida por los edificios corresponde al sector residencial y, evidencia que el consumo de energía de los edificios residenciales varía en las diferentes regiones del mundo, fluctuando entre 15% y un 47% aproximadamente.

Fig. 2.27 Porcentaje de consumo energético por los edificios a nivel mundial. Fuente: (Nejat et al., 2015)

Fig. 2.28 Potencial global de los diferentes sectores en la mitigación del CO₂ al 2030. Fuente: (Nejat et al., 2015)

Desde que el consumo de los edificios en el futuro demandará principalmente energía eléctrica (ver Fig. 2.29), la agencia internacional de energía (IEA) en el WEO2018 introdujo el escenario FiES (Future is Electric Scenario) para examinar qué pasaría con la demanda de electricidad si se maximizaran las oportunidades económicas para la electrificación a partir de la base del escenario NPS (New Policies Scenario), mostrando al año 2040 que la electricidad incursiona rápidamente en las necesidades de calefacción de los edificios, la existencia de una economía digital que gestiona el uso de los artefactos y sistemas en las edificaciones y que se logra un acceso total a la electricidad. Lo anteriormente expuesto se refleja en la Fig. 2.30. Lo anterior se traduce, sumado a la transformación de fuentes de energía primaria de origen fósil a renovables en la generación de la energía eléctrica, a una reducción importante de las emisiones GHG, alcanzando un nivel de aproximadamente 22.500Mt (IEA, 2018b). Valor más bien intermedio considerando los escenarios que se presentan en la Fig. 2.19.

Fig. 2.29 Demandas de fuentes de energía en el sector residencial pronosticadas a nivel global.
Fuente: (Exxon Mobil Corporation, 2018)

Fig. 2.30 Niveles de inserción del uso de electricidad en calefacción, gestión y acceso en el edificio basado en dos escenarios (NPS y FiES). Fuente: (IEA, 2018b)

El CO₂ que emiten las edificaciones a lo largo de su vida útil, desde la fase de producto a la fase de deuso (Ver Fig. 2.3 en el apartado 2.2 más atrás) varía enormemente, pues el número de variables asociadas a los ACV de las edificaciones es importante. Sin embargo, y tomando en consdieración una investigación que reunió 251 edificios de estudio de casos en 19 países diferentes mostraron que las emisiones promedio de CO₂ derivadas de la energía asociada a las fases de preuso, de uso y deuso fueron responsables del 24%, 75% y 1%, respectivamente. (Schwartz, Raslan, & Mumovic, 2018). Además, esta revisión indicó que el sistema de calefacción y el suministro de energía pueden afectar significativamente las emisiones. La Fig. 2.31 muestra la débil correlación entre la huella de carbono del edificio y la

energía consumida a lo largo de la vida del edificio sobre casos normalizados dentro de un horizonte de 60 años. Esto es atribuido a la diversidad inherente de las edificaciones, como lo son el entorno climático y la envolvente que definen los requerimientos de calefacción, o bien, los sistemas de climatización que definen la eficiencia y el tipo de combustible utilizado para climatizar las viviendas. Esta diversidad se ve reflejada en la Fig. 2.32, donde las emisiones por m^2 para un horizonte normalizado de 60 años, para un conjunto de 163 casos, muestran que las emisiones presentan valores que van entre $763 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2/60 \text{ años}$ a $4.140 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2/60 \text{ años}$ para cuartiles 1 y 3 respectivamente, donde los mayores valores son alcanzados por edificios con perfiles de alta energía operativa (edificios universitarios, comerciales, hospitalarios y hoteleros). Estos edificios presentaron valores significativamente más altos que los edificios residenciales. La determinación de estos indicadores de impacto serán abordados con mayor profundidad en el apartado 0 más adelante.

Fig. 2.31 Baja correlación entre LCCF (Life Cycle Carbon Footprint) y LCE (Life Cycle Energy).

Fuente: (Schwartz et al., 2018)

Fig. 2.32 LCCF (Life Cycle Carbon Footprint) para 163 casos de estudio. Fuente: (Schwartz et al., 2018)

La variabilidad que presentan las emisiones de CO₂ incorporadas al edificio conforme a las diferentes soluciones constructivas para la estructura, es evidenciada en una investigación donde se analizaron 95 casos de estudio de edificios residenciales, como un esfuerzo por identificar el rango de emisiones de CO₂ incorporadas y la correlación entre la proporción de energía incorporada (Energy Embodied – EE) y el carbono para diferentes niveles de eficiencia energética del edificio. Esta investigación mostró un rango de emisiones de carbono embebido entre 179,3 kgCO₂eq por m² y 1050 kgCO₂eq por m² para una vida útil de construcción de 50 años, reflejando una incidencia entre el 9% y el 80% en el ciclo de vida total, donde los rangos para las emisiones totales fluctuaron entre 348,5 kgCO₂eq por m² y 6.485 kgCO₂eq por m² para el horizonte de 50 años. (Panagiotis Chastas et al., 2018). Teniendo en cuenta la estructura de las edificaciones para estos 95 casos, la Fig. 2.33 muestra la variabilidad conforme a las soluciones constructivas predominantes en los edificios, reflejando que las emisiones de carbono incorporado son mayores en estructuras de hormigón armado (RC) en comparación a las otras soluciones estructurales que priorizan la madera (W), hormigón (C), acero (S) o la albañilería (M) en la estructura.

Fig. 2.33 Emisiones de dióxido de carbono incorporado (CE) por metro en 95 estudios de caso de edificios residenciales. Fuente: (Panagiotis Chastas et al., 2018)

Desde que las emisiones de CO₂ son proporcionales a la demanda de energía, estas también presentan una fuerte variabilidad por metro cuadrado entre viviendas que presenten condiciones disímiles en cuanto a estructuración, sistemas de instalaciones, condiciones climáticas, vida útil, uso y gestión de la vivienda, entre otras características propias de la edificación (H Hernández & Meza, 2010)(Vilches et al., 2017). De este modo, tomando de referencia la Fig. 2.31, la energía primaria demanda por la vivienda durante el ciclo de vida varía entre 10kWh/m² y 560kWh/m², donde la mayoría de los casos se concentra entre los 85kWh/m² año y 250kWh/m² año. Consumos que varían conforme al perfil operativo del edificio, los que muestran para edificios residenciales un rango entre 150-400kWh/m² año de energía primaria durante la operación, y para edificios oficinas un rango entre 250-550kWh/m² año (Ramesh, Prakash, & Shukla, 2010), evidenciando – con respecto a los datos previos – que es la fase de uso la más incidente en del ciclo de vida de las edificaciones. El cálculo de estos indicadores será abordado los capítulos siguientes.

2.3.4. Distribución del consumo de energía en la vivienda

La distribución de la energía consumida por los hogares suele efectuarse en función del tipo o fuente de combustible, o bien, en función al uso que se le da a dicha energía. De este modo, para el primer caso la energía consumida por la vivienda puede ser distribuida en gas (natural o gas licuado de petróleo), parafina, electricidad, leña o derivados de la madera y otros (carbón vegetal, despunte, petróleo, etc.) y, en el segundo caso, puede ser distribuida en usos para cocinar, para calentar agua sanitaria (ACS), para calefacción, para refrigeración y para energizar artefactos (iluminación y equipamiento eléctrico). Distribuciones que difieren para los diferentes países, localidades o áreas geográficas en el mundo. Ya en la introducción se había contrastado los usos para calefaccionar entre la Unión Europea (EU) y España (Ver Fig. 1.1 en título **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

La energía para calefaccionar es el principal uso en la vivienda, seguido por el ACS. Sumados estos usos pueden representar entre el 50% y 80% del consumo de un hogar (H. Hernández, 2009). En el caso de la EU estas representaron el 78,9% el año 2015 y para España el 62,2% el año 2016, donde el uso para refrigerar representó menos del 1% en ambos casos (IDAE, 2018). Es importante destacar en este contexto que, frente a las innovaciones tecnológicas en eficiencia energética sobre los elementos de envolvente (bajas transmitancias térmicas) o que hagan a los sistemas de calefacción o ventilación altamente eficientes (bombas de calor, intercambiadores de calor, etc.), es probable que los consumos de ACS y aplicaciones eléctricas en el hogar se presenten predominantes en el futuro.

En congruencia con lo anteriormente expuesto, el consumo energético de los hogares a lo largo de Chile es muy heterogéneo tanto en nivel de consumo como en tipo de uso (ver Fig. 2.34). De norte a sur (de Arica a Magallanes) el consumo de energía por hogar aumenta (de 3 a 33 GCal al año) al igual que lo hace la proporción para calefacción (desde menos de 10% a un aproximado 80% en la Región de los Ríos), lo que se explica debido a la mayor severidad climática en sur de Chile y que el principal consumo de la energía en las viviendas es calefacción. A nivel país, conforme a la Fig. 2.34 el 56% principal uso de energía en la vivienda es calefacción,

seguidos por artefactos y ACS, con 19% y 18% respectivamente, donde el uso para refrigerar viviendas representa menos del 1% (Asociación de generadoras de Chile, 2018)

Fig. 2.34 Consumo y uso de energía en los hogares Chilenos por región. Fuente: (Asociación de generadoras de Chile, 2018)

El tipo de combustible para calefaccionar, al igual que el uso de energía, presenta una variabilidad importante a lo largo del país (ver Fig. 2.36), privilegiando el uso de gas por el norte y leña por el sur. Desde que la calefacción es el principal uso de la energía en Chile, y dado que en el Sur de Chile es donde más energía se consume y donde se privilegia el uso de la leña para calefaccionar, no es de extrañar que el 47% del tipo de energía para calefaccionar en Chile sea la leña, seguido por gas 31% (licuado y natural) y electricidad 18% (Ver Fig. 2.35). La preferencia de la leña en el sur de Chile se explica por la mayor disponibilidad de recursos forestales, lo que repercute directamente en el precio, haciéndola entre 4 a 5 veces más barata por MJ en comparación con la parafina y el gas licuado (Reyes et al., 2015)

Fig. 2.35 Distribución de los combustibles para calefaccionar en Chile Fuente: (MMA, 2014)

Fig. 2.36 Tipo de combustible principal usado para calefacción en el hogar por región. Fuente: (CDT, 2015c)

Con respecto a los subsistemas en la vivienda chilena, el 81,2% presenta un sistema para ACS, el 80,9% un sistema de calefacción individual (calefactor), solo 1,5% presenta un sistema de calefacción centralizado y solo un 0,8% presenta un sistema de aire acondicionado. (CDT, 2010). En relación al tipo de artefacto para calefacción en Chile, aproximadamente el 26,8% utiliza estufa a leña (cámara doble,

simple o salamandra) con rendimiento de 45% para convencional y 60% no catalítica, seguido por un 22,8% que utiliza estufa infrarroja o catalítica que utilizan gas o electricidad con rendimientos entre 90% y 100% y luego un 16,9% que utiliza estufa a parafina (mecha o láser) con rendimientos entre 90% y 100%. Dicho equipamiento también varía a lo largo del país, predominando el uso de estufas a leña en el Sur y estufas infrarrojas (gas y electricidad) y a parafina en las zonas más densificadas de Chile. Esto producto del problema medioambiental asociado al material particulado en el uso de la leña (Otárola, 2016)(CDT, 2015c)(Reyes et al., 2015). La carencia de sistemas altamente eficientes para calefaccionar los espacios abre una oportunidad en eficiencia energética para Chile.

2.3.5. Precio de la energía en el sector residencial

a. Aspectos generales

Frente al principio económico definido por la “ley de demanda”, los precios de los combustibles están fuertemente influenciados por el incremento de la demanda de energía desde los diferentes sectores económicos, sobre todo del sector residencial que consume gran cantidad de recursos energéticos (ver Fig. 2.13 y Fig. 2.27), los que responden a los aumentos en la población, a los aumentos en la demanda de productos (crecimientos del PIB), a los cambios en la tecnología (inyección de eficiencia, mayor asequibilidad, nuevos desarrollos, innovación, etc.) y a la disponibilidad de recursos para producir energía, entre otros. En base a este escenario, pensando principalmente en los recursos fósiles no renovables, parece evidente que los precios tiendan a incrementarse en el tiempo. Sin embargo, al incorporar la variable renovable, sobre todo considerando el uso de un recurso relativamente ilimitado como lo es el Sol, por el que no se paga a diferencia de como se hace por el petróleo o el carbón producto de su explotación económica, se prevén aumentos en los precios de la energía pero no como los pensados hace 20 años, pues se prevé un futuro eléctrico (ver cambios para el sector residencial en Fig. 2.29),

cuya producción sustituirá parte del consumo de energía primaria de origen fósil por energías limpias (Ver Fig. 2.14 y Fig. 2.15).

Desde que el precio de la energía de origen renovable depende de los costos marginales de producción en el tiempo, los que están influenciados fuertemente por la inversión – donde el costo de la tecnología cae derivado de la investigación y desarrollo, ver realidad para Chile en Fig. 2.37–, y de los costos de operación y mantenimiento de los sistemas que proveen energía a los hogares, sobre todo eléctrica y, desde que las matrices energéticas para la generación de electricidad tendrán una componente importante de renovables, el incremento en los precios de la electricidad se espera sea menor en el tiempo que los incrementos en los precios de los otros combustibles en base a un desarrollo energético limpio, sobre todo en Chile conforme a lo que se desprende de la Fig. 2.18 abordada en el título 2.3.1 más atrás.

Fig. 2.37 Caída en costos tecnológicos asociados a la generación de energía limpia en Chile.

Fuente: (Asociación de generadoras de Chile, 2018)

Estados unidos (US) es uno de los principales consumidores de energía en el mundo – 16,5% el 2017(BP, 2018) –, por tanto, un actor importante en mercado de energía global y cuyas proyecciones locales sirven de referencia para visualizar los precios futuros de la energía en un mundo globalizado, escenarios que son considerados en las proyecciones chilenas (CNE, 2016). Conforme a un caso de referencia para el sector residencial en US, las proyecciones para los precios del

propano, destilados del petróleo, gas natural y electricidad crecen a tasas de 71,8%, 33,4%, 32,6% y 5,6% entre los años 2018 y 2050 (EIA, 2019a). Conforme a los diferentes escenarios propuestos en las Fig. 2.38, Fig. 2.39, Fig. 2.40 y Fig. 2.41, las variaciones en los precios de las principales fuentes de energía usadas por los edificios son las siguientes:

- Propano: Rangos entre 17,67 el 2017 a 18,31 o 62,67 el 2050 en US\$/MMBtu, es decir, variaciones entre 3,6% y 254,7%.
- Destilados del petróleo: Rangos entre 18,60 el 2017 a 19,13 o 48,56 el 2050 en US\$/MMBtu, es decir, variaciones entre 2,8% y 161,1%.
- Gas natural: Rangos entre 10,76 el 2017 a 12,53 o 16,57 el 2050 en US\$/MMBtu, es decir, 16,5% y 54,0%.
- Electricidad: Rangos entre 37,94 el 2017 a 35,96 o 42,75 el 2050 en US\$/MMBtu, es decir, variaciones entre -5,2% y 12,7%

Energy Prices: Residential: Propane

Region: United States

2018 \$/MMBtu

Fig. 2.38 Proyecciones de precios para el propano en US. Fuente: (EIA, 2019a)

Energy Prices: Residential: Distillate Fuel Oil

Region: United States

2018 \$/MMBtu

Fig. 2.39 Proyecciones de precios para los destilados del petróleo en US. Fuente: (EIA, 2019a)

Energy Prices: Residential: Natural Gas

Region: United States

2018 \$/MMBtu

Fig. 2.40 Proyecciones de precios para el gas natural en US. Fuente: (EIA, 2019a)

Energy Prices: Residential: Electricity

Region: United States

2018 \$/MMBtu

Fig. 2.41 Proyecciones de precios para la electricidad en US. Fuente: (EIA, 2019a)

En general se espera que los precios de la energía en el futuro aumenten, lo que suena evidente cuando se aborda el uso combustibles de origen no renovable (escasez) que presentan costos de extracción que debieran aumentar en el tiempo (más difícil acceder al recurso). Sin embargo, cuando se trata de energía eléctrica, los pronósticos futuros no resultan tan evidentes desde que se debe considerar la incorporación futura importante de energía primaria de origen renovable (solar, eólica, mareomotriz, geotérmica, otros en Anexo 3) (Energysage, 2018) (Mountain & Percy, 2018).

Son varios los factores que afectan el precio de la energía eléctrica, entre ellos, el precio de la energía primaria de origen fósil definida por la demanda y la oferta respectiva (carbón, gas, etc.), la estructura de costos de las plantas generadoras y distribuidoras de electricidad, las condiciones climáticas y las regulaciones locales sobre los precios de la energía (EIA, 2019b). Ahora bien, si se prevé un futuro renovable conforme a lo abordado los apartados previos, la componente precio de combustibles fósiles pierde relevancia. Esto ha generado una discusión entre los actores del sector energético sobre cómo esto afectará el precio futuro de la energía eléctrica. Donde algunos investigadores, a partir de experiencias locales, definen que el precio debiera bajar (Mountain & Percy, 2018) y otros, basados en los precios históricos para la energía eléctrica, que estos debieran seguir subiendo (Energysage, 2018). En torno a esto último, se debiera cuestionar ¿cuál es la historia detrás de la demanda de energía de origen renovable? Para responder a esta pregunta basta con recurrir a la Fig. 2.11, la que evidencia un crecimiento relativamente reciente, con una tasa de crecimiento claramente mayor a partir del año 2007, sumado a que se trata de inversiones de eficiencia energética cuya recuperación es largo plazo, los beneficios derivados de energía prima gratuita (sol, viento, calor geotérmico, etc.) no son inmediatos. Por otro lado, en Chile se ha evidenciado que el precio de la tecnología solar ha disminuido considerablemente en los últimos 10 años (ver Fig. 2.37) y además se prevé la incorporación de nuevos actores en la generación de energía eléctrica a partir del mecanismo Net Metering. Este contexto de precio será considerado el caso de estudio que se abordará en el apartado 6.4 “Caso 4: Evaluación económica de inversiones de eficiencia energética para disminuir el consumo de energía para calefaccionar una vivienda social materializada en albañilería” más adelante, en el que además de escenarios para precios altos y

esperados de la energía eléctrica, se incorporará uno donde los precios bajen conforme a la Fig. 2.41. Sobre todo en Chile donde ya se ha evidenciado, a partir de la Fig. 2.17, donde casi la mitad (48,3%) de producción de energía eléctrica provino de fuentes renovables en enero de 2019.

b. Aspectos locales

Conforme a la Fig. 2.35 en el título 2.3.4 más atrás, a continuación se detallan aspectos sobre los precios de los principales combustibles para calefaccionar viviendas en Chile:

- Leña, gas y parafina:

La leña presenta una diversidad de precios a lo largo del territorio chileno, siendo más barata en el Sur de Chile debido a su mayor disponibilidad, este presenta un precio medio para el año 2015 de \$23.787 por metro cúbico con desviación estándar de \$4.031/m³ (CDT, 2015c), precio que depende del tipo de leña para uso de calefacción, el que llegó a valores entre de \$24.000 - \$40.000 con un promedio de \$33.500 por m³ el último periodo de invierno 2018 (SEREMI del Medio Ambiente del Maule, 2018). Lo que refleja aumentos de 0,3%, 13,6% y 22,7% por año considerando como valor base \$23.787 (año 2015) y valores mínimo, promedio y máximo el año 2018. Lo anterior evidencia la alta variabilidad en el precio, las que dependen del proveedor, del lugar, de la época, de la cantidad y calidad de la leña (Sáez, Walther, Welzel, Cárdenas, & Meyer, 2015). Un estudio en la ciudad de Coyhaique estimó su crecimiento en aproximadamente 3,3% al año a partir del precio del cubo de leña el año 2000 (\$13.585 por m³) y el año 2011 (\$18.520 por m³) (Sáez et al., 2015).

Un estudio sobre el precio de la madera en la ciudad de Valdivia (con fuerte demanda) concluyó que para el m³ de leña cortada, el precio fue de \$47.600 para eucaliptus y \$52.360 para el armo, reflejando mayor variación en torno a los datos previos (SERNAC, 2018). La leña también se vende en formato de sacos de 25kg, cuyo valor ronda entre los \$3.000 y \$4.490 el saco, con un promedio de \$4.023, es decir, \$161 el kg de leña seca. Sin embargo, en un estudio sobre medición del

consumo nacional de leña, el 70,9% ha declarado comprar la leña trozada por m³ (CDT, 2015c). La capacidad calórica de la leña depende de la especie y de su densidad, para determinar el precio por kWh de la leña se considerará una densidad de 460kg/m³ y 3.500kCal/kg para humedades entre 20% y 40% para maderas en Chile. (Romero, 2007)

Conforme a una proyección de precio para gas natural puesto en Chile, basado en dos escenarios (Low Price Oil y Reference Case del reporte AEO 2015 de EIA), se prevé un aumento en el precio del gas natural entre los años 2018 al 2031 de 22,7% (reference case) o 70,1% (Low Price Oil). (CNE, 2016). El precio del gas corriente promedio \$16.472 y catalítico \$17.349 para contenedores de 15kg. usados por los hogares chilenos (CNE, 2017), valor que puede llegar hasta los \$1.500 por kilo. (Gobierno de Chile, 2019)

Los precios de las parafinas pueden consultarse online a partir de un sitio web dispuesto por la Comisión Nacional de Energía, consultados en abril de 2019, los datos se muestran en la Fig. 2.42.

Fig. 2.42 Precios por litro de la parafina (kerosene doméstico) en Chile. Fuente: (CNE, 2019a)

- Electricidad:

Un estudio del año 2008 proyectó el precio de la energía eléctrica entre los años 2008 al 2025 en base a tres escenarios. Este estudio mostró tasas de crecimiento anual para la energía entre 1,1% y 4,7% aproximadamente (UTFSM - U. de Chile, 2008) Sin embargo, este estudio no consideraba la ley de ERNC que entraría en vigencia el año 2010 en Chile y tampoco los escenarios que muestran incluso variaciones anuales negativas para el sector residencial en US entre los año 2017 y 2050, los que sirven de referencia para las proyecciones nacionales.

Dentro del mercado eléctrico nacional, los consumidores se clasifican en tres grandes grupos: a) Cliente regulado: cuya potencia conectada es inferior o igual a 5.000 kW, b) Cliente libre: cuya potencia conectada es superior a 5.000 kW y c) Clientes con derecho a optar por un régimen regulado o de precio libre (por un período mínimo de cuatro años de permanencia en cada régimen): cuya potencia conectada es superior a 500 kW (CNE, 2019b). En los sistemas eléctricos cuyo tamaño es superior a 1.500 kW en capacidad instalada de generación la Ley distingue dos niveles de precios sujetos a fijación: a) Precios a nivel de generación-transporte o “Precios de Nudo” y b) Precios a nivel de distribución. La estructura de esos precios se evidencia en la Tabla 4. La evolución del precio nudo se muestra en la Fig. 2.43, la que muestra una baja desde la entrada en vigencia de las leyes de ERNC a partir del año 2010.

Fig. 2.43 Evolución del precio nudo de la energía eléctrica. Fuente: (CNE, 2019b)

Tabla 4. Determinación del precio (sin IVA) de energía eléctrica en Chile

Precio a usuario final	=	Precio a nivel de generación y transporte	+	Precio a nivel de distribución		
Precio a usuario final	=	Precio nudo	+	Valor agregado de distribución (VAD)	+	Cargo único por uso de sistema troncal
		Precios a nivel de generación-transporte. Definidos para todas las subestaciones de generación-transporte desde las cuales se efectúa el suministro. Los precios de nudo tienen dos componentes: precio de la energía y precio de la potencia de punta. El precio nudo de la energía es el promedio en el tiempo de los costos marginales de energía del sistema eléctrico operando a mínimo costo actualizado de operación y de racionamiento		Valor que se determina sobre la base de la suma del precio de nudo, establecido en el punto de conexión con las instalaciones de distribución, corresponde a un valor agregado por concepto de distribución. El VAD es fijado cada cuatro años por el Ministerio de Energía y corresponde básicamente un costo medio que incorpora todos los costos de inversión y funcionamiento de una empresa modelo o teórica operando en el país, eficiente en la política de inversiones y en su gestión, de modo que el VAD no reconoce necesariamente los costos efectivamente incurridos por las empresas distribuidoras.		Cargo único o peaje por concepto del uso del sistema de transmisión troncal.

Fuente: (CNE, 2019b)

El precio que pagan los distintos usuarios corresponde a una tarifa negociada por el cliente libre, tarifa regulada que normalmente paga el industrial, minero o gran comercio en alta tensión (AT), o bien, para el cliente residencial y pequeño comercio en baja tensión (BT). Conforme a esto, la Tabla 5 muestra los valores correspondientes a las tarifas AT4.3 y BT1a, que corresponden a las tarifas más representativas del cliente industrial y residencial para una cuenta tipo el año 2017, respectivamente (valores incluyen IVA). Donde la cuenta tipo para un cliente BT1a ronda los 180kWh y para un cliente AT4.3 44.435kWh. (CNE, 2017)

Tabla 5. Precios de la energía eléctrica en Chile año 2017

Región	Precio cuenta tipo (\$)		Precio por kWh (\$/kWh)	
	BT1a	AT4.3	BT1a	AT4.3
Arica	24684	3879081	137	87
Tarapacá	23425	3409266	130	77
Antofagasta	19473	3079949	108	69
Atacama	22281	3913330	124	88
Coquimbo	26201	4420839	146	99
Valparaíso	26523	4729950	147	106
Metropolitana	22249	4134310	124	93
O'Higgins	24310	4613617	135	104
Maule	25538	4808429	142	108
Biobío	25190	4832889	140	109
La Araucanía	26221	4966766	146	112
Los Ríos	26281	5167022	146	116
Los Lagos	26237	5107812	146	115
Aysén	26031	4848208	145	109
Magallanes	24185	3518014	134	79

Fuente: (CNE, 2017)

Conforme a los datos expuestos anteriormente y a los coeficientes en la Tabla 3 del título 2.3.2 más atrás, la Tabla 6 muestra los valores promedios en pesos Chilenos (747,62 pesos chilenos equivalen a 1 euro al día 12 de abril de 2019) estimados por unidad de energía para los principales combustibles utilizados para calefaccionar en Chile. Ejemplificando para la Parafina, el valor en \$/kWh se obtiene como sigue: Si el precio para un litro de parafina se estima en \$686 conforme a la Fig. 2.42 y un litro corresponde a 0,81kg, entonces, el precio por kg es equivalente a $686/0,81$, es decir, 847\$/kg. Si para un kg de parafina se estima el PCI igual a 10536 kcal/kg, conforme a Tabla 3, entonces, el cociente entre 847\$/kg y 10536 kcal/kg multiplicado por la relación entre kcal y kWh, cercano a 860, se obtiene un valor próximo a 69,12 \$/kWh. Este valor no considera la eficiencia promedio del sistema de calefacción, en cuyo caso si es considerado un 95% de rendimiento, el precio efectivo resulta ser 72,76 \$/kWh.

Tabla 6. Estimación de precios para los combustibles habituales para calefaccionar en Chile por unidad de energía año 2018

Combustible	precio (\$)	unidad del precio	densidad (kg/m ³)	\$/kg	kCal/kg	\$/kWh	\$/MJ	rendimiento	\$/kWh efectivo
Electricidad	\$ 137	kWh	-	-	-	\$ 137,00	38,06	1,00	137,00
Leña	\$ 161	kg	460	\$ 161	3500	\$ 39,55	10,99	0,60	65,92
GLP	\$ 1.150	kg	550	\$ 1.150	11300	\$ 87,51	24,31	0,95	92,11
Parafina	\$ 686	litro	810	\$ 847	10536	\$ 69,12	19,20	0,95	72,76

A partir de los resultados Tabla 6, se aprecia que la madera presenta un costo mucho menor que los otros combustibles, explicando su preferencia en la zonas donde más energía se requiere para calefaccionar, seguidos por la parafina, gas y finalmente la electricidad. Donde el costo de la electricidad, el gas licuado y la parafina representan 3,5, 2,2 y 1,75 veces el costo de la madera respectivamente, valores algo menores a los rangos establecidos entre 4 y 5 por otros autores (Reyes et al., 2015), los que se justifican por las consideraciones locales para la madera a menor precio y las capacidades caloríficas consideradas, que en caso de la madera dependen de la humedad y la especie respectiva (densidad y poder calorífico). Estas diferencias se acortan entre la madera y los otros combustibles, considerando los rendimientos de los sistemas de instalaciones (Otárola, 2016), sin embargo, la madera sigue siendo más económica, pero su costo se acerca al de la parafina. Ahora bien, un aspecto que no se recoge es que el costo de la madera, para algunos sectores del Sur de Chile, equivale solo al costo de oportunidad de su recolección y corte. Lo que no ha sido considerado en este análisis.

2.4. Confort térmico en viviendas

El ser humano, al igual que cualquier otro elemento inserto en un medio ambiente, transferirá energía hacia y desde los elementos circundantes conforme al nivel energético disímil presente entre los elementos en el sistema, donde se encuentra inserto, y él. Así, producto de las transferencias de energía entre las personas y el entorno, el ser humano percibirá frío o calor. Desde esta perspectiva, el confort térmico no solo involucra variables físicas termodinámicas, sino también, variables

biológicas y psicológicas vinculadas al metabolismo y percepción humana. Estas variables que han sido estudiadas por varios investigadores en torno a la definición del confort térmico en edificaciones, estableciendo dos líneas metodológicas de estudio, uno estático basado en el balance del cuerpo humano (Fanger en los años 60) y uno dinámico que supone un modelo adaptativo del ser humano a su entorno (Humphreys en los años 70) (Yang et al., 2014)(Nicol, 2002). La importancia del estudio de estos modelos resulta evidente, pues se deben prever edificios que brinden espacios donde sus ocupantes se sientan térmicamente confortables. En caso de que estas condiciones no son proveídas, entonces será necesario inyectar energía a las viviendas, de ahí la importante vinculación entre confort térmico y el diseño eficiente de las edificaciones.

2.4.1. Intercambio de calor entre el cuerpo humano y el ambiente

El confort térmico no es otra cosa que mantener un ambiente que permita la regulación térmica normal en el ser humano. Como la temperatura en la piel de las personas es de aproximadamente 29°C y, como la envolvente de las viviendas y los muebles presentan menores temperaturas en invierno, entonces, el cuerpo humano emite radiaciones infrarrojas hacia ellos (Ver Fig. 2.44 más adelante). Los muros fríos en invierno bombean el calor de los cuerpos provocando pérdidas de calorías y el resultado es frío e incomodidad en las personas. Por tanto, el confort térmico no es otra cosa que el equilibrio térmico existente entre las ganancias y pérdidas de calor debidas al propio metabolismo del cuerpo. El calor producido por el hombre, metabolismo energético (M), es clasificado en tres niveles (Lavigne, Brejon, & Fernández, 2003):

- **Metabolismo base:** Es el necesario para la vida, se refiere a la posición del cuerpo en reposo y en ayunas (la digestión consume energía) y en condiciones tales que el cuerpo no tenga que luchar contra frío ni calor. Para una persona normal este metabolismo tiene un valor del orden de 75W.

- Metabolismo de descanso: Calor mínimo producido en posición de descanso, por ejemplo sentado, donde el cuerpo no tenga que luchar contra frío ni calor.
- Metabolismo de trabajo: Claramente el calor debido a este metabolismo es mayor que los anteriores y está directamente relacionado con la actividad física. A modo de ejemplo, al trabajo en oficina corresponden entre 105 a 140W, trabajos domésticos entre 140 a 370W, trabajos de esfuerzo mayor 700W.

Entonces, cuando exista desequilibrio térmico entre el estado energético del ambiente y el estado energético de las personas habrá un intercambio de calor propio a cada metabolismo. El hombre intercambia calor con el entorno al igual que hace cualquier cuerpo a distinta temperatura que el ambiente, es decir, por radiación, convección y conducción. Sin embargo, en los seres humanos hay que agregar un proceso más, denominado evaporación, el que está compuesto por dos mecanismos muy eficaces en la disipación de energía, y que le son inherentes, la respiración y la transpiración (ver Fig. 2.45). La primera debido al aire expirado por los pulmones que conlleva cierta cantidad de energía, y la segunda debido a la evaporación del sudor en la superficie de la piel que acelera las pérdidas debido al calor latente en el cambio de estado de sudor a vapor.

Fig. 2.44 Transferencia de calor entre una persona y el entorno. Fuente: (Çengel & Boles, 2006)

Fig. 2.45 Formas de transmisión de calor entre el cuerpo y el ambiente. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Conforme a la Fig. 2.44, la transferencia de calor entre el cuerpo y el entorno está dada por la conducción, convección y radiación (Çengel & Boles, 2006):

a) La transferencia de calor por conducción es debida al contacto directo de nuestra piel con los cuerpos sólidos o líquidos regida por la ley de Fourier según la Ecuación 1. Donde la transferencia es inversamente proporcional al espesor del elemento en contacto Δx (medido en m) y directamente proporcional al área de contacto “A” (medida en m^2), al coeficiente de conductividad térmica del material en contacto “k” (medido en $W/m \cdot K$) y a la diferencia de temperaturas entre los elementos en contacto (medidos en Kelvin).

Ecuación 1 : $Q_{cond} = -k_t * A * \Delta T / \Delta x$ [W] **Fuente:** (Çengel & Boles, 2006)

b) La convección es debida a la circulación del aire sobre la piel conforme a la Ecuación 2, donde “h” corresponde al coeficiente de transferencia por convección (medido en $W/m^2 K$), “A” la superficie de contacto con el fluido fuera de la superficie (medido en m^2), “ T_s ” la temperatura de la superficie A (medida en Kelvin) y la “ T_f ” la temperatura del fluido afuera de la superficie (medido en Kelvin), que este caso corresponde al aire.

Ecuación 2: $Q_{conv} = h * A * (T_s - T_f)$ (W) **Fuente:** (Çengel & Boles, 2006)

c) La transferencia de calor por radiación es debida a la ley de Stefan–Boltzman (Ecuación 3), donde la transferencia por radiación es proporcional a la constante de Stefan-Boltzmann “ σ ” equivalente a $5,67 \times 10^{-8}$ [$W/(m^2 K^4)$] y, donde la tasa neta de transferencia por radiación entre un cuerpo de superficie relativamente pequeña (persona) de emisividad “ ϵ ” (medida entre 0 y 1) y área “A” (medida en m^2) a una temperatura absoluta “ T_s ” (medida en Kelvin) que está completamente rodeada por una superficie mucho mayor (envolvente) a una temperatura “ T_{surr} ” (medida en Kelvin) separada por un gas (como el aire) que no interviene con radiación (es decir, la cantidad de radiación emitida, absorbida o disipada es despreciable) (Çengel & Boles, 2006).

Ecuación 3: $Q_{rad} = \epsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_{surr}^4)$ [W] **Fuente:** (Çengel & Boles, 2006)

Por otro lado, y conforme a la Fig. 2.45, otros aspectos a considerar son la disipación del calor metabólico, la que varía en función de la temperatura ambiente. A menores temperaturas prima la disipación por radiación y a mayores temperaturas las evaporativas (transferencias latentes). En general, para temperaturas próximas a 20°C, la radiación es la más importante y representa aproximadamente un 45% de la energía disipada. El resto corresponden a convección y evaporación, con un 35% y 20% respectivamente (Lavigne et al., 2003). La conducción, al ser esencialmente por los pies al piso, es despreciada debido a la baja transferencia que involucra. El equilibrio térmico, para régimen permanente entre el cuerpo y el ambiente, puede representarse a partir de la expresión definida por Fanger, la que se presenta en la Ecuación 4 (Reyes Martínez & Velasco Gómez, 2006).

Ecuación 4: $M - W = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} + E_{\text{resp}} + E_{\text{piel}} + e$

Donde, cada variable corresponde a:

M = A la energía asociada al metabolismo. Es proporcional al oxígeno consumido en la unidad de tiempo y depende del nivel de actividad que se está desarrollando.

W = El trabajo mecánico desarrollado por el cuerpo, o el efectuado sobre el mismo (en cuyo caso tendría signo negativo). Es diferente del nivel de actividad y depende del rendimiento mecánico del trabajo corporal. Este rendimiento resulta muy bajo comparado con el metabolismo y débil con respecto al calor en juego en la vivienda. Por tanto, suele considerarse nulo ($W \approx 0$) (Reyes Martínez & Velasco Gómez, 2006).

Q_{cond} = El intercambio por conducción (Ecuación 1). El que podría considerarse nulo debido a la superficie pequeña de contacto y debido a los materiales aislantes presentes en los zapatos (ver Fig. 2.44).

Q_{conv} = Intercambio de calor a través de la piel por convección (Ecuación 2), el que puede ser negativo.

Q_{rad} = El intercambio de calor a través de la piel por radiación (Ecuación 3), el que puede ser negativo.

E_{resp} = Intercambio de calor por evaporación a nivel de vías respiratorias, resultan inevitables y es siempre positivo, se puede considerar en condiciones corrientes de descanso o actividades livianas del orden de los 11,5W, que corresponden a 350g de agua al día (H. Hernández, 2009).

E_{piel} = Intercambio de calor por evaporación a nivel de piel sin aparición de fase líquida por difusión de las capas superficiales, es la transpiración insensible que constituye una pérdida inevitable y siempre positiva del orden de los 11,5W (Reyes Martínez & Velasco Gómez, 2006).

e = Intercambio de calor por evaporación requerida, por secreción de agua a partir de las glándulas sudoríparas, sólo cuando no resulta suficiente el enfriamiento corporal resultante de las otras pérdidas térmicas. Sin embargo, no toda la sudoración secretada se evapora, esto dependerá de la capacidad secante del ambiente. Según Givoni se evaporará el sudor solamente si la evaporación máxima permitida por el ambiente supera al menos en 10 veces la evaporación necesaria para el equilibrio térmico. (H. Hernández, 2009)

Como E_{resp} y E_{piel} son prácticamente constantes, se puede definir $e_0 = E_{resp} + E_{piel}$ del orden de 23W (H. Hernández, 2009). Igualmente se puede definir P como la potencia intercambiada por radiación y convección que pueden ser negativas, entonces, P y M quedan representadas por la Ecuación 5 y Ecuación 6 respectivamente:

Ecuación 5: $P = Q_{rad} + Q_{conv}$

Ecuación 6: $M = e_0 + P + e$

El metabolismo M se mide en Met, donde un 1 Met es igual a 58,2 (W/m²) y corresponde al calor generado por una persona sentada y relajada. Para actividades normales la generación de calor suele estar entre 0,7 Met (durmiendo) y 1,7 Met (caminar), pudiendo alcanzar valores de hasta 9 o 10 Met para actividades de alto rendimiento, ver Fig. 2.46 (ANSI/ASHRAE, 2016).

Fig. 2.46 Tasa metabólica por nivel de actividad. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2016)

El intercambio de calor del cuerpo con el ambiente es proporcional a la superficie del mismo. La superficie del cuerpo humano se puede estimar, según Du Bois, a través de la siguiente expresión (Reyes Martínez & Velasco Gómez, 2006):

Ecuación 7: $A = 0,202 * m^{0,425} * h^{0,725} \text{ (m}^2\text{)}$

Si en la Ecuación 7 “m” corresponde a la masa del cuerpo en kilogramos y “h” la altura en metros, entonces, la superficie corporal para una persona promedio, de peso 70kg y altura 1,7m, tendrá una superficie “A” igual a:

$$A = 0,202 * 70^{0,425} * 1,7^{0,725} = 1,8 \text{ (m}^2\text{)}$$

Por otro lado, las vestimentas de las personas presentarán cierto grado de resistencia a la transferencia de calor. Esta resistencia se mide en Clo y sus valores se encuentran tabulados para distintas prendas, donde 1 Clo = 0,155 (m²K/W) (Reyes Martínez & Velasco Gómez, 2006). Así, conforme a la Fig. 2.47, 0 Clo representa la desnudez y un valor igual a 1 Clo a vestimenta de invierno.

Fig. 2.47 Valores representativos de Clo para varios conjuntos de ropa. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2016)

Conforme a la Ecuación 2, si el coeficiente de transferencia por convección h en la superficie de la vestimenta varía entre 3 y 6 W/m²°C para una persona de superficie en contacto con el medio próxima a $A=1,8\text{m}^2$, calculado previamente según Ecuación 7, y son considerados 29°C y 20°C como temperatura superficial de la persona y temperatura de confort respectivamente, entonces, la transferencia por convección será:

$$Q_{\text{conv}} = 4,5 * 1,8 * ((29+273,15) - (20+273,15)) = 65 \text{ W}.$$

Considerando la emisividad cutánea próxima a 0,95 y temperaturas uniformes en las paredes de una vivienda y próximas a los 20°C, además, de temperaturas y emisividades para la piel y ropa similares y constantes; entonces, la transmisión por radiación será cercana a:

$$Q_{\text{rad}} = A * \epsilon * \sigma * [T_a^4 - T_p^4] \text{ (W)}$$

$$Q_{\text{rad}} = 1.8 * 0,95 * 5,67 \times 10^{-8} * [(29+273)^4 - (20+273)^4] = 92\text{W}$$

$$\rightarrow P = 65 + 92 = 157\text{W}$$

Por otro lado, suponiendo una actividad metabólica promedio igual 1,7 Met, entonces, M será:

$$M = 1,7 * (58,2 * 1,8) \approx 180W.$$

Así, al establecer el equilibrio de Fanger conforme a la Ecuación 5 y Ecuación 6, se tendrá: $180 = 23 + 157 + e \rightarrow e \approx 0$. Esto permite establecer, dadas los supuestos previamente establecidos, que una temperatura interior cercana a 20°C genera un equilibrio térmico en la persona, por tanto, una temperatura de confort térmico.

Sin embargo, si una persona cambia la actividad que desarrolla por una de mayor esfuerzo, supónganse $M=400W$, se perderá el equilibrio y necesariamente habrá sudoración. Para amortiguar este fenómeno de disconformidad se podrá, por ejemplo, aumentar h a partir de ventilación forzada, o bien, disminuir la temperatura ambiente incrementado ΔT y, con ello, la capacidad de intercambio P . Por otro lado, será necesario generar condiciones de humedad que permitan la evaporación e . En verano, con temperaturas muy superiores a la cutánea, este fenómeno se verá incrementado y probablemente el intercambio P se revierta (tome valores negativos). De modo análogo, temperaturas frías en el ambiente también desequilibrarán el sistema y el cuerpo sentirá malestar debido a la sensación de frío. Acá, contrariamente, serán útiles vestimentas de elevado Clo , disminuciones de la tasa de transferencia por convección h , aumentos de la temperatura interior (disminuir ΔT) o propiciar el desarrollo de actividades con mayor metabolismo, entre otras.

2.4.2. Escalas de sensación térmica VMP y PPI

El modelo propuesto por Fanger (ver Ecuación 4) corresponde a un modelo de balance de calor, que como se ha mostrado, permite establecer las condiciones en que las personas se sentirían térmicamente neutrales. Sin embargo, para responder a aplicaciones prácticas, se derivó un índice llamado voto medio previsto (PMV, de sus siglas del inglés Predicted Mean Vote), que expande la ecuación de balance de calor incorporando 7 puntos de evaluación para la sensación térmica (-3 muy frío, -2 frío, -1 ligeramente fresco, 0 neutral, + 1 ligeramente cálido, +2 cálido y +3 muy

cálido). El índice PMV predice el valor medio de la sensación térmica basado en la respuesta de un número importante de personas en un ambiente determinado, bajo ciertas condiciones de actividad metabólica (Met en W/m^2), grado de vestimenta (Clo), temperatura de bulbo seco T_a (en $^{\circ}\text{C}$), temperatura media radiante de cerramientos T_r (en $^{\circ}\text{C}$), velocidad del aire en la zona ocupada v (en m/s) y humedad relativa HR (es decir, presión de vapor, p_a en kPa) (Yang et al., 2014). La ecuación PMV es algo compleja, pero puede ser representada por la Ecuación 8 y puede determinarse utilizando la herramienta “Thermal Comfort Tool” del CBE (Center for the Built Environment) de la Universidad de California Berkeley (en <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>).

Ecuación 8: $\text{PMV} = f(\text{Met}, \text{Clo}, T_a, T_r, v, \text{HR})$

Desde que las personas no son iguales, siempre habrá un grupo de personas en una edificación que no se sentirán térmicamente confortables. Este porcentaje de personas insatisfechas es medido a partir del indicador PPD (de las siglas en inglés Predicted Percentage of Dissatisfied), cuya relación con el indicador PMV se muestra en la Fig. 2.48, evidenciando que siempre existirá una proporción de personas insatisfechas igual a 5%. Consecuentemente, para un ambiente térmico aceptable el índice PMV deberá estar entre -0.5 PMV y $+0.5 \text{ PMV}$, es decir, que no se sobrepase el 10% de personas insatisfechas (ANSI/ASHRAE, 2016).

El modelo PMV-PPD ha sido adoptado por normativa internacional (ISO 7730 o ASHRAE Standard 55) y, como consecuencia, también por la norma chilena NCh2691.Of2002. La Fig. 2.49 muestra el rango de temperaturas operativas T_o (que corresponde al promedio entre T_a y T_r) delineadas en las zonas de confort del Estándar 55 de ASHRAE (Yang et al., 2014). Conforme a la Fig. 2.49, para una humedad relativa interior del 50%, el rango de temperatura es aproximadamente de 20°C (límite inferior de la zona de invierno) a algo más de 27°C (límite superior de la zona de verano).

Fig. 2.48 Relación entre PMV y PPD. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2016)

Fig. 2.49 Rango aceptable de temperatura y humedad operativa para las zonas de confort térmico. Fuente: (Yang et al., 2014)

2.4.3. Adaptabilidad de las personas a las condiciones ambientales

En términos generales, existen tres categorías diferentes de adaptación de las personas al entorno: fisiológica, conductual y psicológica. La adaptación fisiológica en términos de climatización no juega un rol predominante, la adaptación psicológica se refiere a los efectos de variables cognitivas, sociales y culturales, y describe cómo y hasta qué punto los hábitos y las expectativas pueden cambiar las percepciones de las personas sobre el entorno térmico (Yang et al., 2014).

La adaptación conductual abre la oportunidad a las personas de ajustar el balance de calor del cuerpo para mantener el confort térmico, como cambiar la actividad, los niveles de ropa o ajustar la ventilación al abrir o cerrar ventanas en la vivienda. En este sentido, el principio de adaptación conductual vincula el ajustarse al entorno térmico inmediato no considerado en las ecuaciones de equilibrio estático revisadas previamente. Uno de los hallazgos clave de varios estudios de campo sobre el confort térmico adaptativo es la correlación entre la temperatura de confort (T_c) (temperatura neutra interior) y la temperatura media exterior (T_{em}) mensual.

La Fig. 2.50 muestra una correlación entre la temperatura neutra o de confort y la temperatura media interior medida en una serie de estudios de campo. En esto se aprecia que la temperatura neutra o de confort se aproxima mucho a la temperatura interior existente medida en el interior, evidenciando que las personas tienden a adaptarse al entorno térmico para sentirse más cómodas a las diferentes temperaturas interiores (Yang et al., 2014).

Humphreys y Nicol demostraron que la relación entre la temperatura de confort T_c y la temperatura exterior media T_{em} mensual para edificaciones con ventilación natural, o de funcionamiento libre, está dada por la Ecuación 9 Ecuación 1 (Nicol, 2002). Esta relación también fue abordada Dear y Brager en estudios más recientes (Yang et al., 2014).

Ecuación 9: $T_c = 13,5 + 0,54 * T_{em}$

Fuente: (Nicol, 2002)

Desde que se ha demostrado que el modelo PMV es un buen predictor para espacios con aire acondicionado, pero no adecuado para edificios acondicionados naturalmente (Yang et al., 2014), en la búsqueda de la adaptabilidad del modelo PMV para aplicaciones generales, el Estándar 55 de ASHRAE basado en el análisis de 21000 conjuntos de datos de estudios de campo en 160 edificios ubicados en diferentes zonas climáticas, fue revisado para incluir un modelo adaptativo para edificios con ventilación natural (ANSI/ASHRAE, 2016)(Yang et al., 2014). La Fig. 2.51 muestra los rangos de temperatura operativa aceptables para espacios naturalmente acondicionados. Basado en este nuevo criterio, el Estándar 55 de ASHRAE establece criterios para los límites de aceptabilidad del 80% y 90% tal como se muestra en la Fig. 2.51.

Fig. 2.50 Correlación entre la temperatura neutra o de confort y la temperatura media interior medida en una serie de estudios de campo. Fuente: (Yang et al., 2014)

Fig. 2.51 Rangos de temperatura operativa aceptables (T_o) para espacios naturalmente acondicionados. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2016)

Frente a la adaptabilidad de las personas al medio, la determinación de los parámetros psicrométricos para definir el confort térmico de las personas es una tarea compleja, tanto para invierno como para verano, pues son muchas las variables (de carácter fisiológico, conductual y psicológico) que influyen en la determinación de estos parámetros. Sin embargo, distintos autores y normativas establecen rangos de confort térmico a partir de la definición de temperaturas y humedades relativa ambientales. La Tabla 7 muestra algunas recomendaciones de temperaturas y humedades relativas al interior de las viviendas para invierno y verano.

Tabla 7. Recomendaciones de temperaturas y humedades relativas interiores

Autoría	Invierno		Verano		Velocidad del aire
	Rango temperaturas (Mín – Máx)	Rango humedades (Mín – Máx)	Rango temperaturas (Mín – Máx)	Rango humedades (Mín – Máx)	
Serra y Coch	18 – 20 ¹ °C	2 – 3 ²	25 – 27°C	50% - 55%	-
ISO 7730	20°C	30% - 70%	24	30% - 70%	-
ANSI-ASHRAE	20 – 23,5 °C ³	30% - 85%	22,5 - 26°C ³	20% - 70%	Menor a 1m/s
CCTE_CL	>20°C ⁵	-	<25°C ⁶	-	-
Rougeron	18 – 22°C	Mín 30%	24 – 26°C	24 – 60%	-
RITCH	20 – 22°C ³	40% - 60%	23 – 25°C ³	40% - 60%	Entre 0,15 a 0,24 m/s ⁸
Givoni ⁷	18 – 23 °C	30% – 80%	21 – 26°C	30 – 80%	-

¹Para salas de estar, ²No define humedades relativas para invierno, pero si tasas de renovación de aire (h⁻¹) para conservación de las condiciones de calidad de aire, ³Para temperaturas operativas, ⁴Reglamento de instalaciones térmicas en edificios españoles, ⁵Para requerimientos de calefacción, ⁶Para requerimientos de refrigeración, ⁷A partir de Carta Bioclimática de Givoni, ⁸Entre 0,15 a 0,20 para invierno y 0,18 a 0,24 para verano.

Fuente: (H. Hernández, 2009)

En consecuencia, la sensación de confort térmico depende de una serie de parámetros. Los cuales se encuentran relacionados con la capacidad de adaptación de las personas al entorno – diferentes unas de otras en adaptación fisiológica, conductual o psicológica – y con las características propias de este entorno – diverso en cuanto a la materialidad de los elementos de envolvente de las viviendas y condiciones climáticas –. Los principales parámetros asociados al confort térmico, quedan resumidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros de confort térmico.

Parámetros de confort asociados a las personas	Parámetros de confort asociados al ambiente
La vestimenta (Clo): El aislamiento de las vestimentas reduce la pérdida de energía y aumenta la sensación de calor.	Temperatura ambiente T_a (°C ó K): En función del clima y la capacidad térmica en la envolvente de las viviendas.
Metabolismo (Met): A mayor tasa de energía metabólica mayor será la sensación de calor.	Temperatura media radiante T_r (°C ó K): Estimada a partir del promedio de las temperaturas (T_i) de las superficies interiores (A_i) del local. $T_r = \sum (T_i * A_i) / \sum A_i$
Temperatura corporal (°C ó K): El ser humano es homeotérmico únicamente en su parte central, variando la temperatura, a veces de forma apreciable, en sus partes extremas (manos y pies).	Humedad relativa (%): La cantidad de vapor de agua en el aire definirá la capacidad de absorción de vapor desde las personas o elementos. Demasiada humedad podrá producir bochorno y poca producir sequedad en mucosas y dificultad en la respiración.
Constitución corporal (m^2): Asociado al peso y altura en la determinación de la superficie corporal por Du Bois.	
Otros factores: Colores de piel claro presentan mayor reflexividad. Según el sexo, la salud y la edad, al igual que otras condiciones conductuales o psicológicas en las personas, definen diversas capacidades de aclimatación o adaptación.	Velocidad del aire (m/s): Aumenta la sensación de confort en la piel al facilitar la sesión de calor y humedad en verano por aumento de la tasa de transferencia por convección h, además, tiene relación directa con la ventilación.

2.4.4. Evaluación del confort térmico a partir de gráficos psicrométricos.

Varios son los autores que han delimitado las condiciones de confort térmico a partir de los parámetros personales y ambientales que se muestran en la Tabla 8. Estas técnicas de evaluación del ambiente térmico están referidas, en general, al uso de estadígrafos y a la utilización del gráfico psicrométrico. A continuación se referenciará a Olgyay y Givoni como principales exponentes que dan respuesta a la delimitación del confort higrotérmico a partir del uso del ábaco psicrométrico.

a. Gráfica de Olgyay

Olgyay (1963) fue el primero que propuso una metodología para adaptar el diseño de las viviendas a las necesidades humanas considerando las condiciones climáticas. Su carta bioclimática es similar a la de Givoni, pero más explícita en el sentido de establecer las correcciones para el diseño bioclimático, puesto que destaca las zonas de requerimientos de radiación solar, de sombra, de humedad, entre otros, a partir de la delimitación de la temperatura media de radiación, la radiación solar, la temperatura media ambiente, la humedad relativa del aire y el enfriamiento evaporativo. La carta de Olgyay, que presenta la humedad relativa en el eje de las abscisas y la temperatura de bulbo seco en el eje de las ordenadas, se muestra en la Fig. 2.52. En el centro de la carta se puede apreciar una zona achurada correspondiente a condiciones de humedad relativa y temperatura para confort en verano y, algo desplazado hacia rangos de menores temperaturas, la zona de confort en invierno. Para trabajar con esta carta, y de modo semejante que con la carta de Givoni, se deben graficar los valores medios de los parámetros climáticos para cada mes del año y unirlos para ver en que parte de la gráfica se encuentran.

Fig. 2.52 Gráfica de Víctor Olgyay. Fuente: (Serra & Coch, 1995)

Si los puntos representados en la carta se ubican dentro de la zona de confort querrá decir que se estará a gusto bajo sombra. Si por el contrario, se ubican fuera de ella, se necesitarán medidas correctivas. De este modo, por sobre la zona de confort se necesitará de vientos a velocidades que la carta destaca, y si la temperatura es alta y la humedad relativa baja, además de mayor ventilación, se requerirá de refrigeración evaporativa. Por el contrario, si se está bajo la zona de confort se requerirá de radiación solar para contrarrestar las bajas temperaturas.

b. Carta bioclimática de Givoni

En la carta bioclimática de Givoni de 1969, el autor define zonas de confort higrotérmico sobre un ábaco psicrométrico al igual que lo ha hecho Olgyay. Zonas

según las cuales, para parámetros de humedad relativa y temperaturas de bulbo seco presentes en un lugar específico, se determinará el confort higrotérmico de las personas para época de invierno o verano con viento moderado. El uso de esta carta se ha generalizado en el tiempo y se han agregado nuevas zonas de confort fruto de ciertas actuaciones arquitectónicas que pueden mejorar el comportamiento térmico de las viviendas, tanto para invierno como para verano. Estas zonas consideran, por ejemplo, la corrección por efecto del movimiento del aire –una mayor velocidad implicará mayor confort en tiempo de verano-, el control de la radiación solar e inercia térmica para invierno y verano o la refrigeración evaporativa beneficiosa en tiempos calurosos. Así, a partir de la Fig. 2.53, si se supone por ejemplo un ambiente que presente una humedad relativa de 60% y una temperatura de 22°C, tanto para invierno o verano, se estará dentro de la zona de confort y no se requerirá inyectar energía adicional para climatizar el ambiente.

Fig. 2.53. Carta bioclimática de Givoni. Fuente: (Serra & Coch, 1995)

En consecuencia, el ábaco de Givoni no es más que una abreviación práctica de la definición y delimitación del confort, que entrega algunas recomendaciones de arquitectura bioclimática para alcanzar el confort, tanto en invierno como en verano, dejando de lado variables como la edad, las costumbres, la aclimatación, entre otras, que serían de escasa influencia. Esto hace cuestionar a algunos investigadores su universalidad. A pesar de todo, es una herramienta muy usada y práctica para delimitar el confort y orientar a priori a los arquitectos en los diseños habitaciones que minimicen el consumo energético.

c. Cartas bioclimáticas digitales

Las cartas bioclimáticas digitales definen zonas de confort higrotérmico y estrategias de diseño bioclimático en viviendas a partir de la teoría precedente (balance del cuerpo humano y su adaptación al entorno) y el uso de herramientas computacionales. Convenientemente se puede citar el programa Climate Consultant, el que será abordado en detalle en el apartado 3.3 más adelante. Así por ejemplo, en la Fig. 3.8. dentro del apartado 3.3 más adelante, se muestra una nube de puntos de color verde dentro del gráfico psicrométrico. Estos puntos representan las temperaturas y las humedades para cada una de las 8760 horas del año para una localidad que disponga de un archivo climático en formato EPW. Las diferentes estrategias de diseño estarán representadas por zonas específicas dentro del gráfico psicrométrico, tomando de referencia el estándar de confort definido por la ASHRAE 55. El porcentaje de horas que cae dentro de cada una de las 16 zonas de estrategias de diseño posibles (estrategias que se listan en el gráfico), dan una idea relativa de las estrategias de calentamiento pasivo o enfriamiento pasivo más efectivas para la localidad que se estudia. Climate Consultant analiza la distribución de estos datos psicrométricos en cada zona de estrategia de diseño para crear una lista única de pautas de diseño para una ubicación en particular. En el caso de la gráfica que se muestra en la Fig. 3.8 se muestran las estrategias de diseño para lograr un 100% de horas de confort para la localidad de Santiago de Chile.

2.5. Confort térmico y demanda de energía

2.5.1. El calor, la luz y el aire

El interior de un edificio habitacional debe entregar a las personas condiciones energéticas que faciliten los procesos homeostáticos, o bien, que generen condiciones de confort higrotérmico. Por lo tanto, se debe prestar especial atención a la graduación energética de los fenómenos físicos que interactúan en los espacios habitacionales. Los elementos que aportan o restan al confort habitacional básicamente son: el calor, la luz, el aire y el ruido. Es decir, aspectos vinculados al confort térmico, al confort lumínico, a la calidad del aire interior y al confort acústico respectivamente. Donde el confort térmico ha sido clasificado por los ocupantes de edificios como aquel con mayor importancia en comparación con el confort visual, confort acústico y la calidad del aire interior (Yang et al., 2014). A excepción del ruido; el calor, la luz y el aire guardan una estrecha relación con los principales aspectos energéticos de confort térmico en la vivienda. Los aspectos más importantes se tratan a continuación.

a. Aspectos vinculados al calor

Siempre que exista una conexión entre dos cuerpos a distintas temperaturas habrá una transferencia de calor. La transferencia irá desde la región más caliente a la menos caliente y hasta el momento en que los cuerpos se encuentren en equilibrio. Los mecanismos de transmisión de calor entre cuerpos son la conducción, la convección y la radiación. Se este modo, y en general, desde que existe un gradiente de temperaturas entre el interior y el exterior de la vivienda, existirá una transferencia de energía desde o hacia el exterior por conducción conforme a la Ecuación 1 (ley de Fourier), por convección conforme a la Ecuación 2 y por radiación conforme a la Ecuación 3 (ley de Stefan–Boltzman), ecuaciones vistas previamente en el estudio del balance térmico del cuerpo humano. Es decir, existirá transferencia de energía Q_t (negativa o positiva) a través de los elementos de la envolvente como lo son muros,

ventanas, puertas, pisos ventilados o techumbre, entre otros. Los flujos de calor por conducción, convección y radiación en un elemento de envolvente ventana se pueden apreciar en la Fig. 2.56.

El flujo de calor que pasa por unidad de superficie de un elemento de envolvente, por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por dicho elemento, se denomina transmitancia térmica (U) y se expresa en W/m^2K . Su inverso multiplicativo define la resistencia térmica R_t del elemento y se calcula en Chile conforme a la norma NCh853:2014 (ver Anexo 2). De este modo, la transferencia de energía a través de los elementos de envolvente de la vivienda será directamente proporcional a la diferencia de temperaturas y a las áreas de los elementos y sus respectivas transmitancias térmicas. A continuación se listan transmitancias térmicas para algunos elementos de envolvente típicos en viviendas (Designing Buildings Ltd., 2019):

- Pared de ladrillo macizo: $2 W/m^2K$.
- Pared aislada: $0,18 W/m^2K$.
- Acristalamiento simple: $4,8$ a $5,8 W/m^2K$.
- Doble acristalamiento: $1,2$ a $3,7 W/m^2K$ dependiendo del tipo.
- Puerta de madera maciza: $3 W/m^2K$.

Por otro lado, en elementos donde prevalece la longitud frente a otras dimensiones, suele calcularse una transmitancia térmica lineal K_l (W/mK), como es el caso de puentes térmicos. Los puentes térmicos corresponden a zonas del cerramiento del edificio, donde la transmisión de calor es significativamente mayor respecto de la transmisión uniforme que rodea a dicha zona. En general, los puentes térmicos se deben a las siguientes situaciones o combinación de ellas:

- a) Penetraciones completas o parciales de diferentes conductividades térmicas en el cerramiento de un edificio, como por ejemplo, losas entre piso de hormigón armado, o voladizos, cadenas, entre otras (ver caso a en Fig. 2.54).
- b) Cambio de espesor en los elementos, como en marcos de ventanas, pilares en muros, entre otros (ver caso b en Fig. 2.54).
- c) Diferencias de áreas entre caras externas e internas, tales como encuentro entre paredes, suelos, techos, losas, entre otros (ver caso c en Fig. 2.54).

Fig. 2.54 Casos de puentes térmicos en edificaciones habitacionales. Fuente: (H. Hernández, 2009)

La metodología de cálculo de los flujos de calor en puentes térmicos está definido en normativa NCh3136:2014. Según Lavigne et al. (2003), para los casos supuestos en la Fig. 2.54, los coeficientes K_i en cada caso serán: En caso a), si la albañilería no está aislada y la losa penetra en la envolvente, el coeficiente de K_i puede estimarse en función de los espesores e y e_i , si " e " es próximo a 0,2m y e_i varía entre 0,1 y 0,15m, entonces, el coeficiente K_i variará linealmente entre $0,14 \text{ W/mK} < K_i < 0,22 \text{ W/mK}$. Para el caso b), el coeficiente K_i es dado en función del espesor y transmitancia térmica de la pared. Además, la posición de la carpintería con relación al espacio interior ejerce una influencia no despreciable tomando en cuenta que las resistencias superficiales interiores y exteriores son diferentes. Así, para espesores de muro entre 20 y 24 cm con $U=2\text{W/m}^2\text{K}$ y carpintería en paramento interior el K_i será $0,13 \text{ W/mK}$ y para carpintería en paramento exterior K_i será $0,2 \text{ W/mK}$. Por último, para el caso c), si los muros son de espesor próximo a 0,2m y transmitancia térmica cercana a $2 \text{ W/m}^2\text{K}$, entonces, K_i será próximo 1 W/mK . La termografía en la

Fig. 2.55 evidencia los puentes térmicos previamente abordados y una clara diferencia en la transmitancia térmica de ventanas y muros en edificio. En general, a mayor transmitancia térmica de los muros y a mayor espesor de los elementos en juego, mayor será el coeficiente K_i y, por tanto, mayor la pérdida por puentes térmicos.

Fig. 2.55 Puentes térmicos evidenciados en termografía de un edificio. Fuente: (Disate, 2017)

Fig. 2.56 Flujos de calor en una ventana de doble vidriado. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Otro aspecto asociado al calor, es el generado por las personas, los artefactos eléctricos u otros tipos de equipamiento a interior de la vivienda. Calor que es transmitido al espacio por convección y radiación. Esta carga energética interna P_i es directamente proporcional a las horas de uso de la vivienda y al número de personas que la habitan. Por tanto, cada vivienda presentará distintos parámetros que se deberán estudiar con especial atención. Sin embargo, se suelen utilizar cargas E_i normalizadas de ocupación sensible y latente para días hábiles y no hábiles, y para iluminación y equipamiento en Wh por metro cuadrado en un día, tal como ilustra la Tabla 9. En general, se puede usar la base de 100Wh/m^2 día para viviendas con equipamiento tradicional (H. Hernández, 2016).

Tabla 9. Cargas internas en una vivienda.

Hora del día	(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Iluminación	(W/m ²)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	2,2	4,4	4,4	4,4	4,4	2,2
Equipos sensible	(W/m ²)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	2,2	4,4	4,4	4,4	4,4	2,2
Ocupación sensible																									
Laboral	(W/m ²)	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	2,15
Sabado/Domingo	(W/m ²)	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Ocupación latente (W/m ²)																									
Laboral	(W/m ²)	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	1,36
Sabado/Domingo	(W/m ²)	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36

Fuente: (H. Hernández, 2009)

b. Aspectos vinculados a la Luz

La luz, proveída de forma artificial o natural desde el sol, no solo provee de condiciones de confort lumínico, sino también energético. Varios son los fenómenos de interés energético asociado al sol, sin embargo, se prestará especial atención a la energía solar incidente sobre los elementos opacos o traslúcidos en la envolvente de la vivienda. La energía procedente del sol que llega hasta un plano presenta, al igual que la iluminación, las siguientes componentes de radiación: directa, difusa y reflejada o albedo (ver Fig. 2.57). La radiación global que llega a un plano, máxima para cielo claro, será la suma de estas tres componentes (Serra & Coch, 1995). La energía media recibida por unidad de superficie E para un período y orientación determinados, como por ejemplo, la energía media mensual sobre una superficie vertical con orientación norte, revestirá especial interés para el análisis de las ganancias térmicas por radiación bajo régimen permanente en viviendas. Esta energía se suele presentar en tablas que recopilan la información por mes para distintas orientaciones e inclinaciones, cuya unidad suele ser MJ/m². La Fig. 2.58 muestra cómo la energía solar incidente E_s sobre una superficie horizontal varía durante el año en la ciudad de Santiago de Chile.

Fig. 2.57 Incidencia solar sobre la vivienda: sol directo, bóveda celeste (difusa) y albedo.
Fuente: (Serra & Coch, 1995)

Fig. 2.58 Radiación solar incidente horizontal sobre una superficie en Santiago de Chile. Fuente: (Ministerio de Energía, 2019)

Una parte de la energía radiante solar incidente sobre la superficie de un cuerpo se absorbe (α) por el mismo y se convierte en energía interna, generando un aumento de su temperatura, mientras que el resto se puede reflejar (ρ) o transmitir (τ) a través del cuerpo. La suma de las tres fracciones de la radiación, reflejada, transmitida y absorbida es igual a la unidad ($\rho + \tau + \alpha = 1$). En edificación, la mayor parte de los materiales presente en las superficies corresponden a elementos opacos, por lo que presentan un valor para τ tan bajo que puede despreciarse, de este modo $\rho + \alpha = 1$.

Sin embargo, esto no ocurre en los elementos traslucidos como el vidrio presente en las ventanas, los que presentan una alta transmisividad de la energía solar incidente. En los vidrios τ es muy alta para la radiación solar RS (de cortas longitudes de onda, la radiación solar está compuesta, en el espectro electromagnético, por 1% de radiación UV, 53% de radiación visible y un 46% de radiación infrarroja cercano), cercana a 85% en vidrios claros, por tanto, débil reflexión ρ de RS, y prácticamente nula τ para longitudes de onda largas (radiaciones infrarrojas RIR). (Monroy, 2006)

Dado lo anterior, y conforme a la Fig. 2.59, los vidrios permiten el ingreso de la radiación solar (RS) por las ventanas, pero a la vez, no dejan transmitir al exterior la radiación infrarroja (RIR) que es emitida por las superficies que se calientan al interior de la habitación de acuerdo a ley de Stefan-Boltzmann. Este fenómeno produce un efecto invernadero en las habitaciones cuando presentan sistemas de ventilación y/o enfriamiento deficientes, elevando la temperatura al interior de ellas hasta hacerlas incófortables.

Lo anterior, que por un lado, es inconveniente en climas cálidos o en época de verano, resulta muy útil en climas fríos o época de invierno. Siendo, junto a la inercia térmica, la reflexión y la ventilación (regulada y controlada) las principales estrategias de la arquitectura solar pasiva en la búsqueda del confort térmico para las viviendas. Entonces, como no toda la energía que incide en un vidrio es transferida al espacio interior, se define el factor solar (FS) de un vidrio como el cociente entre la energía total que se transfiere y la energía solar incidente (ver Fig. 2.60). El FS dependerá de la transmitancia térmica, reflexión, absorción y color, entre otras características del vidrio.

Fig. 2.59 Efecto invernadero en una habitación. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Fig. 2.60 Factor solar y porcentaje global de energía reenviada al exterior. Fuente: (H. Hernández, 2009)

No todas las superficies emiten o absorben la misma cantidad de energía radiante cuando se calientan a una misma temperatura. Esto variará en función de la longitud de onda y de las características de las superficies como son el color o la textura,

definiendo las propiedades superficiales de emisividad ε y absorptividad α de los cuerpos. Un cuerpo que absorba o emita la máxima cantidad de energía, a una temperatura determinada, se denomina cuerpo negro. De este modo, la absorptividad (α) y la emisividad (ε) de un cuerpo negro son iguales a $\varepsilon = \alpha = 1$. La emisividad, en otras superficies, se define por la relación entre la emisión de la superficie y la emisión ideal del cuerpo negro para una temperatura y longitud determinada.

La emisividad resulta especialmente importante en las estrategias de climatización de espacios, pues se preferirán superficies de materiales que absorban y emitan mucho (cuerpos negros) para favorecer estrategias vinculadas a la aplicación del efecto invernadero, o bien, de baja absorptividad y emisividad (materiales reflectores) para frenar el paso de calor por radiación, por ejemplo, en las caras interiores de un vidriado termopanel Low-E.

La Fig. 2.61 muestra el desempeño de un vidriado termopanel Low-E y la transferencia de calor por radiación q_r a partir de la ley Stefan-Boltzmann (Ecuación 3 más atrás) en dos planos paralelos, P_1 y P_2 de absorción $\alpha_1 = \varepsilon_1$ y $\alpha_2 = \varepsilon_2$ respectivamente, cada uno de los cuales emite una radiación hacia el otro plano, que absorbe una parte y refleja otra, y en dirección al primer plano, evidenciando que a menor valor de emitancia en las caras interiores de los planos, menor será la transferencia de energía por radiación q_r . Aquellos cuerpos que presentan absorptividad y emisividad aproximadamente iguales se denominan cuerpos grises. La Tabla 10 muestra valores característicos de α y ε a temperaturas corrientes (Monroy, 2006)

Tabla 10. Valores característicos para ϵ y α a temperaturas corrientes.

Superficies	α	ϵ
Plástico blanco	0.05	0.92
Cal, yeso	0.08	0.95
Aluminio pulido	0.10	0.05
Papel	0.25	0.95
Pintura blanca reciente	0.10 a 0.15	0.90
Pintura colores claros	0.30 a 0.40	0.90
Acero inoxidable	0.45	0.25
Mármol	0.40 a 0.50	0.95
Pintura colores medios y grises	0.50 a 0.70	0.90
Ladrillo rojo	0.65	0.93
Acero galvanizado nuevo	0.65	0.20
Hormigón claro	0.60 a 0.70	0.88
Pinturas oscuras	0.80 a 0.90	0.90
Arena húmeda	0.90	0.95
Asfalto	0.95	0.95

Fuente: (Monroy, 2006)

Low-E Coating Performance

Fig. 2.61 Desempeño ventana Low-E y transmisión de calor q_r por radiación en placas paralelas.

Fuente: (H. Hernández, 2009)

c. Aspectos vinculados al aire

El aire está compuesto en gran parte por nitrógeno (78%), oxígeno (21%) y otros gases (1%). Desde el punto de vista del confort térmico las propiedades que son importantes de destacar son su densidad, su temperatura, su velocidad y su contenido de agua y energía. La densidad del aire ρ es cercana a $1,225 \text{ kg/m}^3$ para temperatura y presión atmosférica normales. Su densidad y su capacidad calorífica c_e , cercana a $1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ a presión constante, definirán su capacidad para contener energía, es decir, $1225 \text{ J/(m}^3\text{K)}$.

Su velocidad, como se ha visto en el título 2.4 más atrás, define condiciones de confort térmico para ciertas velocidades (ver Tabla 7). Por otro lado, el aire se mueve como un fluido a partir de las diferencias de presiones entre espacios. Este conocimiento es útil en la definición de estrategias de renovación de aire que permitan restablecer las condiciones higrotérmicas de confort e higiene ambiental en los espacios habitacionales. Si un flujo de velocidad V_1 choca contra una superficie de modo que $V_2=0$ (ver Fig. 2.62), entonces, y sobre un plano perpendicular al flujo, se tendrá una sobrepresión de parada Δp , que resulta importante cuanto mayor sea la velocidad del flujo. De esta manera se explican las sobrepresiones en los obstáculos que se oponen a un flujo de aire y, por un fenómeno inverso, las depresiones detrás de los obstáculos que generan la ventilación cruzada vivienda, favoreciendo la renovación de aire y la disipación del calor en verano.

Fig. 2.62 Presiones y depresiones que generan ventilación cruzada en una vivienda. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Los principales aspectos que hacen referencia al estado energético del aire son su temperatura y su contenido de agua en estado de vapor dentro de la mezcla de gases. Aspectos que pueden estudiarse con relativa facilidad al relacionarlos mediante uso del diagrama psicrométrico abordado en el apartado 2.4 más atrás. Instrumento sobre el cual se han establecido zonas de confort térmico para invierno y verano (diagrama de Givoni). La Fig. 2.63 muestra cómo a partir del uso de la carta psicrométrica se pueden determinar para una masa de aire, a partir de un punto de temperatura de bulbo seco y humedad relativa HR, la entalpía (kJ/kg), la temperatura de rocío $T_{\text{rocío}}$ (°C), la humedad de saturación W_s (g/kg), el volumen específico (m^3/kg) y la humedad absoluta HA (g/kg), entre otros datos de interés energético-térmico.

Dentro de la vivienda, los contaminantes que fundamentalmente interesan son el vapor de agua, el anhídrido carbónico y los contaminantes orgánicos volátiles (COV) que pueden ser de origen biogénico o antropogénico. El vapor de agua se genera a partir de la combustión de los combustibles para cocinar o calefaccionar los espacios, por las personas a partir de la actividad metabólica o actividades dentro del hogar (ducha, secado ropa, etc.). Si se acepta que solo la eliminación del vapor de agua marca prioridad en la conservación de la calidad del aire en invierno, es decir, cierta concentración de contaminante (agua) máxima en el ambiente, entonces, la ventilación en invierno que garantizará la conservación de condiciones de humedad relativa de confort dentro de la vivienda estará dada por la Ecuación 10, donde C_v corresponde al caudal de ventilación requerido en m^3/h , m_v la masa de vapor generada en un espacio habitacional en g/h, y ΔHA a la diferencia entre humedades absolutas (HA) entre el exterior y el interior en g/kg.

Ecuación 10: $C_v = (0,83 * m_v) / \Delta HA \text{ (m}^3/\text{h)}$

Fuente: (Lavigne et al., 2003)

En la Fig. 2.64 se muestra un caso de un espacio habitacional para el cual se determina C_v conforme a la Ecuación 10. A partir de este resultado, igual a $64\text{m}^3/\text{h}$, se puede definir la tasa de renovación de aire N. De este modo, si el local presenta un volumen igual a 100m^3 , la tasa N de renovación de aire será igual a 0,64 volúmenes del local por hora (h^{-1}). En general, se suelen utilizar en los cálculos de renovación de aire tasas N del orden de: $0,5\text{h}^{-1}$ para lugares de poca ocupación, de 1h^{-1} para lugares siempre ocupados y $1,5\text{h}^{-1}$ cuando existan vientos fuertes que

aumenten las infiltraciones (H. Hernández, 2009). La Tabla 11, muestra algunas recomendaciones para los caudales de ventilación C_v .

Fig. 2.63 Diagrama psicrométrico. Fuente: (Monroy, 2006)

La condensación en muros es otro problema asociado a la concentración de vapor al interior de la vivienda. Cuando las masas de aire con mayor temperatura chocan con superficies más frías y se alcance la temperatura de rocío, entonces, el vapor de agua precipitará en dichas superficies. Condensación que generará problemas de humedad y, con ello, zonas de potencial desarrollo de agentes patógenos.

HA_i para $HR_i=75\%$ y $T_i=20^\circ\text{C}$ es 11 g/kg

HA_e para $HR_e=90\%$ y $T_e=4^\circ\text{C}$ es $4,5\text{g/kg}$

$\Delta HA = 11 - 4,5 = 6,5\text{ g/kg}$

$\rightarrow C_v = (0,83 \cdot 500) / 6,5 = 64\text{m}^3/\text{h}$

Fig. 2.64 Determinación de tasa de ventilación en un espacio habitacional a partir de Ecuación 10. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Tabla 11. Recomendaciones para caudales de ventilación.

Autor	Espacio habitable	Caudal recomendado
Serra y Coch ¹	Dormitorios	30m ³ /h por persona o 2h ⁻¹
	Salas de estar	35 - 40 m ³ /h por persona o 2h ⁻¹
	Cocina	40 - 45 m ³ /h por persona o 3 a 8h ⁻¹
	Baños	35 - 50 m ³ /h por persona o 2 a 3h ⁻¹
Lavigne	Máximo en verano	10h ⁻¹
	Mínimo en invierno	El higiénico cuándo $T_e < T_i$
Rougeron C.	Para volúmenes entre 0 y 100m ³	1h ⁻¹
	Para volúmenes entre 100 y 500m ³	0,75h ⁻¹
	Para volúmenes entre 500 y 1000m ³	0,5h ⁻¹
¹ Para invierno.		

Fuente: (H. Hernández, 2009)

Conforme a la Fig. 2.63, incrementos de la humedad relativa al interior de la vivienda, para igual temperatura interior conllevará un mayor riesgo de condensación en la superficie de los elementos de la envolvente. En otras palabras, cuando la temperatura de rocío $T_{\text{rocío}}$ alcanza la temperatura superficial interior del elemento de envolvente T_{si} , entonces, se producirá condensación en la superficie de dicho elemento.

La $T_{\text{rocío}}$ se determina a partir del ábaco psicrométrico (ver Fig. 2.63) y la T_{si} a partir de la Ecuación 11, donde U corresponde a la transmitancia térmica del elemento de envolvente que separa el espacio interior del exterior, ΔT la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior y, R_{si} (m²K/W) la resistencia superficial interior del elemento de envolvente, el que corresponde al inverso multiplicativo del coeficiente de transferencia por convección h descrito en la Ecuación 2 en título 2.4.1 más atrás. El valor de R_{si} depende de la posición del elemento (horizontal en cielo o piso ventilado y, vertical en muros, puertas o ventanas, ver determinación en Anexo 1)

y del sentido del flujo de calor, sus valores se determinan a partir de la norma chilena NCh853.

Consecuentemente, en elementos con alta transmitancia térmica (U o U-Value) y en presencia de diferencias importantes entre temperaturas interior y exterior, se propiciará la condensación superficial en el elemento de envolvente, que al no alcanzarse el punto de rocío en la superficie, puede producirse en las capas intermedias del elemento, generándose condensación intersticial. Es decir, no existirá condensación intersticial en un cerramiento mientras la presión de vapor de difusión no alcance la presión de saturación. Precisamente, bastará con determinar los perfiles de presión de vapor de saturación y de vapor de difusión en las distintas capas de los elementos para determinar si se produce o no condensación intersticial en ellos, tal cual se muestra en Fig. 2.65.

Los escenarios de condensación evidencian la necesidad de ventilar los espacios, a partir de estrategias de ventilación natural (ver Fig. 2.62) o forzada. Desde que el flujo de ventilación lleva consigo al exterior una carga de energía importante (frío o calor), se recomienda la implementación de un sistema de control de la ventilación, idealmente que incorpore sistemas intercambiadores de calor altamente eficientes como los que se muestran en la Fig. 2.66. Los cuales extraen el calor del aire viciado con alta energía como lo son baños y cocina y lo inyectan, si se trata de invierno, al flujo de entrada de aire de renovación.

Ecuación 11: $T_{si} = T_i - U * R_{si} * \Delta T (^{\circ}C)$

Otro aspecto a destacar en el aire, es que al presentar una baja densidad, y al estar sin movimiento, ofrece una resistencia importante al paso de energía por conducción y convección. Este aspecto es considerado en el cálculo de las resistencias térmicas de soluciones constructivas, definiendo la resistencia térmica de cámaras de aire R_g medida en m^2K/W . Resistencia que disminuirá o aumentará conforme a las emisividades de las superficies en contacto con la cámara de aire conforme a lo planteado en la Fig. 2.61 más atrás. La Fig. 2.67 muestra la determinación de R_g a partir de la norma chilena NCh853 para tres situaciones con

emisividades y sentido de flujos distintos (A, B o C). Evidenciando que a menor emisividad, menor será la transmisión de calor a través del elemento.

Fig. 2.65 Zona de condensación intersticial en un elemento de envolvente. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Fig. 2.66 Sistema de ventilación con recuperación de calor. Fuente: (Serrano, 2016)

2.5.2. Balance energético y demanda bajo régimen estacionario

El confort térmico de un espacio habitacional depende básicamente de las características de la envolvente de la vivienda y de las condiciones climáticas donde este se emplace. Donde las diferencias de presión y temperaturas entre el ambiente exterior e interior de la vivienda, para diferentes momentos, producirán transferencias de energía de acuerdo a principios termodinámicos para la conducción, convección y radiación. Consecuentemente, la vivienda puede ser esquematizada como un sistema de entradas y salidas de energía a través de su envolvente, cuya dirección y sentido dependerán del elemento de envolvente y del gradiente de temperaturas entre el exterior y el interior. De este modo, el equilibrio térmico de confort en una vivienda quedará determinado por las estrategias de diseño que permitan regular y controlar las pérdidas o ganancias de energía a través de muros, puertas, ventanas, cielo, pisos u otros elementos de la envolvente, que permitan obtener una temperatura interior media T_{im} de confort. Temperatura que en general se aleja considerablemente de la temperatura exterior media T_{em} en épocas de invierno y verano, especialmente,

en climas continentales o climas templados. Las ganancias y pérdidas que equilibrarán este sistema se explican a partir de la Fig. 2.68.

Fig. 2.68 Parámetros influyentes en la determinación de la temperatura interior media T_{im} en una vivienda. Fuente. (Lavigne et al., 2003)

Las ganancias quedan definidas por las cargas solares (S) sobre las áreas de cerramientos opacos A_{oi} o sobre las áreas de elementos traslúcidos A_{vi} (ventanas), radiación solar que será disímil sobre los elementos opacos o traslúcidos conforme a la orientación e inclinación de cada elemento en el espacio geográfico de emplazamiento. Como se vio en el título “Aspectos vinculados al calor” del apartado 2.5.1 más atrás, la carga P_i corresponde a la energía desprendida por personas, artefactos eléctricos o equipamiento al interior de la vivienda. Esta carga será la que equilibrará la vivienda a una T_{im} de confort a partir de la inyección de calor (ganancia) o frío (pérdida) desde un equipamiento HVAC. Las infiltraciones o renovaciones de aire Q_v generan pérdidas en invierno ($T_{em} > T_{im}$) o ganancias en verano ($T_{em} < T_{im}$) debido a los cambios de los flujos de aire en la vivienda necesarios para garantizar la calidad del aire y minimizar los riesgos de condensación. Q_t corresponde a las pérdidas en invierno ($T_{em} < T_{im}$), o ganancias en verano ($T_{em} > T_{im}$), de energía a través de los elementos de envolvente (opacos y traslúcidos). Consecuentemente, para cualquier momento, el Balance Energético (BE) queda definido por la Ecuación 12.

Ecuación 12: $BE = S \pm P_i \pm Q_v \pm Q_t = 0$

Una forma gráfica de evidenciar el balance energético en una vivienda para condiciones de invierno, verano o intermedio, en zonas con climas templados, se muestra en la Fig. 2.69. En climas donde no se identifiquen claramente las 4 estaciones del año, primarán una de las tres situaciones que se evidencian en la Fig. 2.69.

Fig. 2.69 Balance energético en diferentes épocas del año en climas templados. Fuente: (TU Delft, 2019)

De acuerdo a Lavigne (2003), cuando se enfrenta a un problema que exhibe parámetros que varían de modo periódico alrededor de un valor medio, como lo son parámetros que influyen sobre el estado térmico de un edificio para un periodo de 24 horas, entonces se aplica el principio físico de superposición de fenómenos. Este principio reemplaza un problema complejo por dos problemas más simples que se encuentran superpuestos, es decir, a) un problema de régimen permanente en el marco de los valores medios y, b) un problema dinámico periódico. De esta manera se puede comprender lo que está ocurriendo, y determinar los valores medio V_m y periódico ΔV de los parámetros buscados (como la temperatura) a fin de obtener la suma algebraica $V_m + \Delta V$ de estos fenómenos superpuestos. Por consiguiente, si se considera que temperatura interior, de interés para el análisis de confort térmico, oscila alrededor de $T_{im} + A_{isup}$ y $T_{im} - A_{iinf}$, al superponer los fenómenos la atención se centra en el valor medio T_{im} , esto se aprecia en la Fig. 2.70.

Fig. 2.70 Oscilación de la temperatura interior alrededor de T_{im} . Fuente: (H. Hernández, 2009)

A partir del principio de superposición, y en función a los valores medios definidos para los parámetros que influyen sobre la temperatura interior (ver Fig. 2.68), se puede conocer con suficiente precisión T_{im} . Por otro lado, para invierno y subdividiendo la variable S en S_{cv} (carga solar sobre cerramientos vidriados) y S_{co} (carga solar sobre cerramientos opacos), la Ecuación 12 se puede reescribir como:

$$\text{Ecuación 13: } P_i + S_{cv} + S_{co} = Q_v + Q_t$$

Conforme a la Ecuación 13, se desprenden las siguientes expresiones:

$$\text{Ecuación 14: } P_i = (E_i * S_{viv}) / 24 \text{ [W]}$$

P_i (W) es la potencia media generada por las personas, artefactos eléctricos u otros equipamientos al interior de las viviendas, la que es transmitida al espacio por convección y radiación. P_i es directamente proporcional a las horas de uso de la vivienda y al número de personas que la habitan. Se suelen utilizar cargas diarias medias interiores E_i (Wh/m²día) normalizadas para el equipamiento y, para la ocupación sensible y latente (para días hábiles y no hábiles) de personas conforme a lo establecido en el título “Aspectos vinculados al calor” del apartado 2.5.1 más atrás y Tabla 9 más atrás. Desde que las cargas se referencian por unidad de superficie, S_{viv} en la Ecuación 14 corresponde a la superficie de la vivienda en m².

$$\text{Ecuación 15: } S_{cv} = \sum (f_v * A_v * FS * E_s / 24) \text{ [W]}$$

S_{cv} corresponde a la potencia media derivada de la energía solar incidente E_s (Wh/m² día) sobre las superficies vidriadas A_v (en m²) en los cerramientos de la vivienda (ventanas), cuyo valor se ve restringido por la cantidad de energía (%) que logra atravesar el elemento traslucido (FS = factor solar, ver Fig. 2.60) y el factor de reducción solar o sombra f_v en %.

Ecuación 16: $S_{co} = \sum(f_o * A_o * \alpha * U * R_{se} * E_s / 24) \text{ [W]}$

S_{co} corresponde a la potencia media derivada de la energía solar incidente E_s (Wh/m² día) sobre las superficies opacas A_o (en m²) de los cerramientos de la vivienda (techumbre, muros, otros), donde la transmisión de energía se ve restringida por las características del elemento constructivo. Siendo α (en %) el coeficiente de absorción el elemento (ver Tabla 10), R_{se} la resistencia superficial exterior en (m²°C/W) (ver Anexo 1) y el factor de reducción solar o sombra f_o en %.

Ecuación 17: $Q_v = 0,34 * V * N * (T_{im} - T_{em}) \text{ [W]}$

Q_v corresponde a la potencia media derivada de las pérdidas de energía por infiltraciones de aire o por ventilación necesaria en la conservación de las condiciones de confort higrotérmico. Esta es proporcional al gradiente térmico medio ($T_{im} - T_{em}$) en °C. La normativa chilena adopta para el caudal la unidad m³/h por volumen de vivienda V (m³), definiendo N como el número de renovaciones de aire dentro de la vivienda por cada hora y su unidad será h⁻¹, aspecto que se ha tratado en el apartado “Aspectos vinculados al aire” más atrás.

Ecuación 18: $Q_t = \{\sum(U * A_o) + \sum(U * A_v) + \sum(K_l * L)\} * (T_{im} - T_{em}) \text{ [W]}$

Q_t corresponde a la potencia media vinculada a la energía transmitida a través de los elementos de la envolvente de la vivienda, la que es proporcional al gradiente térmico entre el exterior e interior de la vivienda ($T_{im} - T_{em}$). Potencia que depende de la transmitancia térmica (U) y del coeficiente de pérdidas lineales K_l , coeficientes

abordados previamente en el título “Aspectos vinculados al calor” dentro del apartado 2.5.1 a más atrás. La expresión $\{\sum(U \cdot A_o) + \sum(U \cdot A_v) + \sum(K_i \cdot L)\}$ representa la tasa global de transferencia U_g de la vivienda medida en $W/^\circ C$. Consecuentemente, y luego de un proceso algebraico de reemplazo, la Ecuación 13 se puede reescribir como sigue:

Ecuación 19: $(T_{im} - T_{em}) = (P_i + S_{cv} + S_{co}) / (0,34 \cdot V \cdot N + U_g)$

De este modo, bajo condiciones de equilibrio energético y para una temperatura promedio interior deseada (T_{im}), se puede descubrir la potencia P_i' requerida por la vivienda en W . De este modo, conforme a la Fig. 2.69, se pueden presentar las siguientes situaciones:

- a) $P_i' > P_i \rightarrow$ Se requiere potencia adicional positiva (ganancia) igual a $(P_i' - P_i)$ [W]. Esto refleja la situación de invierno en la Fig. 2.69, requiriéndose de calefacción para equilibrar el sistema.
- b) $P_i' < P_i \rightarrow$ Se requiere potencia adicional negativa (pérdida) igual a $(P_i' - P_i)$ [W]. Esto refleja la situación de verano en la Fig. 2.69, requiriéndose de refrigeración para equilibrar el sistema.
- c) $P_i' = P_i \rightarrow$ No se requiere de potencia adicional. Esto refleja la situación intermedia en la Fig. 2.69, prescindiendo de los sistemas HVAC.

De este modo, la potencia adicional en el tiempo $(P_i' - P_i)$ definirá los requerimientos de energía para calefaccionar (+) o refrigerar (-) conforme a si $P_i' > P_i$ o $P_i' < P_i$ respectivamente. Un caso de estudio para la aplicación de este conocimiento se muestra en el título 6.1 “ Caso 1: Contraste de la demanda de energía para calefaccionar una vivienda con baja inercia por absorción a partir de un análisis estacionario y dinámico” más adelante.

Consecuentemente, los análisis bajo regímenes estacionarios o semi-estacionarios consisten en simplificaciones físicas ambientales, caracterizadas por “valores promedio mensuales” de varios factores, tales como las temperaturas ambientales, los valores de radiación solar, entre otros, donde la fluctuación típica de las variables diarias se reduce a un único valor que puede considerarse constante durante todo el mes (Evangelisti, Battista, Guattari, Basilicata, & de Lieto Vallaro, 2014).

2.5.3. Transmisión de calor en régimen dinámico e inercia térmica

Hasta ahora se ha estudiado la transferencia de calor bajo condiciones estacionarias, es decir, suponer que las temperaturas exterior e interior permanecen constantes en torno a temperaturas medias. Por lo tanto, el flujo también es constante y no existe variación en la temperatura del material de cerramiento. Que para época de invierno, cuando la diferencia de temperatura es importante y prácticamente constante durante el día, se pueden suponer las condiciones de régimen permanente que permitan aproximarse a la realidad mediante cálculos derivados de la Ley de Fourier (Lavigne, 2011). Sin embargo, esto no siempre es así. En verano, por ejemplo, las diferencias marcadas de temperaturas entre el día y la noche hacen que los flujos de calor en la envolvente cambien de sentido. Es decir, cuando la temperatura exterior supere a la interior el calor penetrará en el muro y se acumulará en él, por el contrario, y durante la noche, el fenómeno será inverso y el muro comenzará a liberar calor al exterior. Esto hace que el flujo de calor que realmente penetra o sale desde el interior sea muy reducido. Este fenómeno de amortiguación en la oscilación térmica interior, se denomina inercia térmica y es función de la capacidad térmica de los cerramientos. Producto de este fenómeno, se produce un desfase entre el momento que entra el calor por una cara del cerramiento y sale por la otra. En consecuencia, la ley de Fourier deja de ser válida bajo estas condiciones dinámicas, pues la evolución de la temperatura reinante a través del elemento de envolvente no es lineal (H. Hernández, 2009).

La transferencia de calor en la envolvente de un edificio bajo condiciones dinámicas deja de ser algo sencillo de determinar. Solo a través de cálculos complejos (ecuaciones diferenciales, análisis modal, modelos ARMA, Fourier modificado, BEVA, entre otros) o través de programas computacionales (EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS, DesignBuilder, EDSL Tas, entre otros) se puede determinar la transferencia de calor hora a hora. En este sentido, las herramientas de simulación computación brindan un soporte importante al momento de realizar los cálculos para determinar la demanda de energía bajo escenarios dinámicos. Sin embargo, no son herramientas fáciles de utilizar y requieren de un entrenamiento especializado. Dentro de los programas aceptados internacionalmente, EnergyPlus y ESP-r

corresponden a las herramientas más completas para simular edificios energéticamente (Sousa, 2012).

Si bien la simulación computacional resulta indispensable para obtener resultados cuantitativos en régimen dinámico, los profesionales que llevan a cabo los diseños deben comprender el fenómeno, para lo cual es necesario conocer dos parámetros fundamentales: La difusividad “a” y la efusividad “b” de los materiales. Estos se plantean en las ecuaciones Ecuación 20 y Ecuación 21 respectivamente (Lavigne, 2011). La difusividad se refiere a cómo difunde la temperatura dentro de un material en función del tiempo. Esta propiedad de los materiales, que expresa la capacidad de ellos para transmitir una variación de temperatura, depende de la conductividad térmica y de la capacidad térmica del material. De este modo, la difusividad será directamente proporcional a la conductividad térmica λ (W/m°C) del material e inversamente proporcional a la capacidad de almacenamiento del mismo, dada por, el producto entre ρ (kg/m³) y c_e (J/kg°C).

Ecuación 20: $a = \lambda / (\rho * c_e)$ [m²/s]

Desde el punto de vista de la capacidad que exhiben los materiales de construcción para transmitir las diferencias de temperatura, se puede decir que estos presentan comportamientos bastante cercanos, distinguiéndose las maderas con difusividad dos tercios menor que el hormigón, por ejemplo, y los metales con un valor evidente mayor debido a sus elevados coeficientes de conductividad térmica. Esto se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** También resulta interesante ver como dos materiales tan distintos como son el poliestireno expandido y el mortero presentan difusividades semejantes y, por lo tanto, comportamientos análogos en la evolución de la temperatura interior cuando son sometidos a una misma variación térmica. Esto se explica porque el mortero transmite mejor el calor y tiene mayor capacidad térmica y, por el contrario, el poliestireno presenta mayor resistencia al paso del calor y tiene menor capacidad térmica, haciendo a sus difusividades similares.

La efusividad “b” expresa la capacidad de un material para absorber o entregar una carga térmica. Un elemento absorberá mejor un flujo de energía mientras mayor sea su capacidad de transmisión de calor (λ) y mayor sea su capacidad térmica ($\rho \cdot c_e$). Congruentemente, la efusividad queda expresada por la Ecuación 21. A partir de la cual resulta fácil predecir que las efusividades del poliestireno expandido y del mortero, contrariamente al análisis de difusividad previo, serán completamente distintas. Esto permite clasificar los materiales de construcción en aquellos con efusividades muy altas, altas o corrientes, bajas y muy bajas. La Tabla 13 muestra materiales de construcción representativos para esta clasificación.

Ecuación 21: $b = (\lambda \cdot \rho \cdot c_e)^{1/2} \quad [J/(m^2 \cdot s^{1/2})]$

Tabla 12. Difusividad para algunos materiales de construcción.

Material de construcción	Difusividad “a” [m²/s]
Hormigón ordinario	5,5 a $8 \cdot 10^{-7}$
Mortero	$\approx 4 \cdot 10^{-7}$
Hormigón celular	$\approx 4 \cdot 10^{-7}$
Ladrillo macizo	5 a $6 \cdot 10^{-7}$
Poliestireno expandido	4 a $8 \cdot 10^{-7}$
Lana mineral	2 a $20 \cdot 10^{-7}$
Madera	1,5 a $2,5 \cdot 10^{-7}$
Acero	$\approx 140 \cdot 10^{-7}$
Aluminio	$\approx 970 \cdot 10^{-7}$
Fibra de madera	1,3 a $1,9 \cdot 10^{-7}$

Fuente: (Lavigne et al., 2003)

Tabla 13. Efusividades de algunos materiales de construcción.

Material de construcción	Efusividad “b” [J/(m²°Cs^{1/2})]
Acero	≈ 13200 (muy altas)
Albañilerías	≈ 2000 (altas)
Maderas	≈ 350 (bajas)
Poliestireno, lanas de vidrio y roca.	≈ 30 (muy bajas)

Fuente: (Lavigne et al., 2003)

Para simplificar el entendimiento de la difusividad y efusividad, Lavigne (2003) realiza una analogía hidráulica (ver Fig. 2.71) a partir de la cual el flujo de calor incidente está representado por un caudal de agua, y la diferencia térmica por el potencial hidráulico Δh . De este modo, el muro de material homogéneo está representado por tubos verticales paralelos, de superficie S , conectados por sus bases a un tubo horizontal que contiene orificios calibrados de diámetro d . El diámetro d corresponde a λ y S a la capacidad térmica. Así, la difusividad y efusividad quedan representadas por $(d \cdot S)$ y (d/S) respectivamente. Se aprecia, entonces, que a mayor difusividad mayor será la oscilación térmica, pues si el diámetro d es grande, permitirá el ingreso de agua a los tubos siguientes rápidamente; siempre y cuando, la superficie S no sea lo suficientemente grande para retener este avance. Este último enunciado ratifica el hecho que a mayor efusividad, mayor será la capacidad de absorción del material y, por tanto, un retardador de la oscilación térmica al interior de la vivienda debido a la mayor inercia térmica. Explicando la preferencia de las antiguas civilizaciones, como las mesopotámicas vistas en apartado 2.1 más atrás, de muros pesados y gran espesor en zonas climáticas con oscilación térmica importante. En consecuencia, para minimizar la oscilación térmica interior se debe tener presente la difusividad y efusividad presente en las soluciones constructivas. La Fig. 2.72 muestra como una solución de muro, con muy baja efusividad en la capa exterior (material aislante) y elevada difusividad en la capa interior, presenta baja oscilación térmica interior en comparación a la oscilación térmica exterior.

Fig. 2.71 Efusividad y difusividad a partir de analogía con teoría hidráulica. Fuente: Lavigne, Pierre. Arquitectura Climática. Fuente: (Lavigne et al., 2003)

Fig. 2.72 Comportamiento térmico de envolvente opaca sin calefacción y sin efecto solar. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Por otro lado, las estructuras internas del edificio, como los tabiques divisorios, también poseen cierta capacidad de absorber calor de acuerdo a la efusividad de sus materiales. Esto hace que se produzca en forma permanente un intercambio térmico entre la envolvente y las estructuras internas. Este flujo dependerá, básicamente, de la temperatura superficial interior y de la superficie de la envolvente (ley de Stefan-Boltzmann, Ecuación 3) y, de la superficie y efusividad de las estructuras internas. Así, la inercia térmica se verá beneficiada a mayor superficie, capacidad de absorción y efusividad de las estructuras al interior de la vivienda. Una alta efusividad de los

muros interiores, también permitirá reducir las oscilaciones de temperatura interior provocadas por las entradas solares a través de los vidrios y por las variaciones de potencia interna (Lavigne et al., 2003).

El tiempo de retardo en el que una oscilación térmica en la cara de un muro homogéneo llega a ser percibida en la otra cara de este, es función del espesor del muro, de las propiedades de difusividad y efusividad en el muro y, de la oscilación térmica a la que estará expuesto el muro. Si se considera, bajo régimen transitorio, la conducción de calor en el interior de un sólido semiinfinito o cerramiento de gran espesor (x), cuya superficie está sometida a una oscilación periódica (de frecuencia $\eta = 1/24$ h) y sinusoidal ($\omega = 2\pi\eta$) de las temperaturas, y siendo la temperatura media igual a la del sólido a gran profundidad (T_∞), entonces, la temperatura $T(x,t)$ de la oscilación térmica en el intervalo de tiempo t y profundidad x se puede determinar de acuerdo a la modelación que se muestra en Fig. 2.73.

Fig. 2.73 Temperatura en un muro homogéneo a lo largo del día, según su profundidad (x) respecto de la superficie exterior ($x=0$), debido a una excitación sinusoidal. Fuente: (Marincic, 1999)

Lo anteriormente expuesto evidencia que muros de poco espesor y baja capacidad térmica presentan una oscilación en la superficie interior próxima a la existente en la superficie exterior del muro ($x=0$). Estos antecedentes hacen pensar que para edificios con uso intermitente la alta inercia puede no ser tan aconsejable, siendo conveniente materiales aislantes en la cara interior del cerramiento para alcanzar las temperaturas interiores deseadas rápidamente.

Consecuentemente, la inercia térmica es la resistencia que presenta la vivienda ante las variaciones de temperatura y no simplemente su capacidad de absorber energía. Existiendo 2 tipos, una inercia térmica por transmisión y otra por absorción. La primera asocia materiales de difusividad baja y, la segunda, asociada a materiales de efusividad alta (Lavigne et al., 2003). Estos fenómenos no son simples de modelar, de ahí la conveniencia en usar programas de simulación energética para su modelación.

2.5.4. Viviendas altamente eficientes energéticamente

Una edificación eficiente energéticamente debiera presentar las siguientes características (H Hernández & Meza, 2010):

- Obedecer a un diseño arquitectónico inteligente. Esto es, una vivienda que adopte estrategias de arquitectura bioclimática que permite prescindir de energía para su funcionamiento. Algunas estrategias incluyen: orientación y parasoles graduados en ventanas, compacidad de la vivienda, incorporación de energía solar pasiva, entre otras estrategia de adaptación de la vivienda al entorno (Ver Anexo 10. Estrategias de arquitectura bioclimática). Cabe destacar que dos viviendas iguales no presentarán igual desempeño energético si presentan distinta orientación al norte. Un diseño inteligente que tome algunas precauciones respecto a la iluminación natural puede reducir hasta en un 50% el consumo generado por iluminación. La Fig. 2.74 evidencia como el factor de iluminación natural (FIN) varía en una habitación conforme al factor de reflexión en las superficies interiores.
- Presentar aislamiento y estanqueidad que permitan gestionar los flujos de energía a través de los cerramientos de la vivienda. La inercia, por absorción y transmisión, brindarán estabilidad térmica interior y resistencia a la fuga de energía. La estanqueidad, por otra parte, permitirá el control y regulación de la ventilación y, por tanto, disminuir o aumentar las pérdidas de energía conforme a la necesidad (ver Fig. 2.75). Así, por ejemplo, una vivienda Passive House

presenta un límite de infiltraciones obtenido mediante el test de presurización “Blower Door” n50 no superior a 0,6/h. (CDT, 2015a)

- Mínima inyección de recursos (energía, materiales, económicos, etc.), al igual que mínimos elementos contaminantes y no reutilizables (minimizar emisiones y desechos), en cada fase del ciclo de vida de la vivienda.
- Sistemas de instalaciones de la vivienda que utilicen energías limpias, tales como geotérmica, eólica, hidráulica, solar u otro (ver Fig. 2.75), además de sistemas en la vivienda que permitan recuperar agua o energía (intercambiador de calor, Fig. 2.66 más atrás).
- Elevados rendimientos para todos los sistemas de instalaciones en la vivienda, ya sean de ACS, HVAC, iluminación o de otro tipo. Es decir, sistemas que incorporen elementos que permitan disminuir las pérdidas de energía al máximo, o bien, que incorporen energía al sistema (sistemas con rendimientos sobre 1). Estudios muestran que combinando sistemas geotérmicos con bombas de calor y sistema de colector solar, se pueden lograr rendimientos entre 4,3 y 5,8 dependiendo de las condiciones geotérmicas y solares locales (Girard, Gago, Muneer, & Caceres, 2015).
- Contar con un sistema de gestión, mantenimiento y mejora continua de los subsistemas en la vivienda. Es decir, contar con elementos que permitan monitorear el uso de la energía y el funcionamiento adecuado de los sistemas de HVAC, de iluminación u otros, para gestionar su uso convenientemente (por ejemplo, domótica en encendido y apagado de luz en función a la iluminación natural en los espacios), o bien, para rectificar, mejorar o cambiar los elementos que los constituyen conforme a fallas u oportunidades de modernización (Smart Building, Home Energy Management System, otros).

caso a)

caso b)

Fig. 2.74 Iluminación en habitación con coeficientes de reflexión para cielo, muros y piso en a) 0,8; 0,7 y 0,2 respectivamente y, b) nulos. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Fig. 2.75 Esquematzación de una vivienda altamente eficiente. Fuente: (International Energy Agency, 2008)

Congruente con lo anteriormente expuesto, (Kibert, 2013) estable los siguientes pasos:

1. Usar herramientas de simulación durante el proceso de diseño del edificio.
2. Optimizar el diseño solar pasivo del edificio.
3. Maximizar el rendimiento térmico de la envolvente del edificio.
4. Minimizar las cargas internas del edificio.
5. Maximizar la iluminación natural e integrarlo con un sistema de iluminación de alta eficiencia.
6. Diseñar un sistema HVAC muy eficiente que minimice el uso de energía.
7. Seleccionar electrodomésticos y motores de alta eficiencia.
8. Maximizar el uso de los sistemas de energía renovable.
9. Producir y utilizar energía residual.
10. Incorporar estrategias innovadoras emergentes como el acoplamiento a tierra y el enfriamiento radiante.

Las consideraciones previas permitirán disminuir 4 indicadores de eficiencia energética de interés: demanda, consumo, emisiones y gasto energético. La relación entre demanda y consumo energético queda definida por los rendimientos de los equipos o sistemas de instalaciones presentes en la edificación (η) (ver Fig. 2.76), los que en general difieren de vivienda en vivienda y dependen, básicamente, de las pérdidas de generación, de distribución, de regulación y de control de los propios sistemas. Los rendimientos varían entre 0,6 (leña) a 1 (eléctricos) para sistemas individuales tradicionales en viviendas chilenas (escasas viviendas presentan sistemas, como bombas de calor, con rendimientos sobre la unidad) (CDT, 2015b). En sistemas colectivos, los rendimientos de las instalaciones podrán obtenerse y/o exigirse a partir de las memorias de cálculo de proyectos de instalaciones de climatización. Cuya presentación es exigida por el RITCH (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios en Chile) a partir de potencias térmicas para instalaciones mayores a 70 kW (60.200Kcal/h), conteniendo al menos una memoria descriptiva con anexos de cálculo, planos, esquemas y un juego especificaciones técnicas (H. Hernández, 2009).

A menor demanda de energía y mayores rendimientos de los sistemas redundarán en menores consumos de energía (en kWh /m² al año) y menores emisiones contaminantes al ambiente (en KgCO_{2eq}/m² año) que, dependiendo del tipo y fuente energía, podrán o no ser significativos (Energía eléctrica de origen solar será muy distinto que energía eléctrica de origen fósil, ver Anexo 3: Características de las fuentes de energía). Asimismo, y conforme al precio que el mercado defina para las energías que alimentan la vivienda (en general energías secundarias, como la electricidad), se determinará el gasto energético medido en unidades monetarias por m² al año (u.m./m² año); el cual también dependerá del tipo y fuente de energía (Gasto en electricidad de origen solar diferirá con gasto de electricidad de origen fósil). Estos indicadores energéticos se resumen en la Fig. 2.76, la que vincula el enfoque estratégico que sigue la premisa de implementar primero "Opciones Pasivas" reductoras de carga para el diseño de edificios, seguido de "Opciones Activas" energéticamente eficientes para acondicionamiento térmico y ventilación según sea necesario, para luego ajustar la operación del edificio a través de la "Gestión en el uso de la energía" (H. Hernández, 2017)

Fig. 2.76 Indicadores de interés para evaluar la eficiencia energética de una vivienda.

Fuente: (H. Hernández, 2017)

Conforme al consumo de la vivienda al año (en kWh/m² / año), se determinan la emisiones de contaminantes al ambiente conforme al tipo de energía que se trate, es

decir, primaria (recurso que se toma directo de la naturaleza: solar, biomasa, petróleo, gas natural, etc.) o secundaria (las que pasan por un proceso que consume recursos adicionales: electricidad, gas licuado, parafina, etc.). La Fig. 2.77 muestra la relación entre la energía secundaria consumida útil en la vivienda y las pérdidas energéticas derivadas de los procesos de transformación para obtenerla a partir del uso de energía primaria.

Para determinar los coeficientes de paso para las emisiones en Chile, por tipo de energía, se pueden utilizar las

Tabla 2 y Tabla 3 que se muestran en el apartado 2.3.2. Sin embargo, en Chile no existen coeficientes de paso de energía secundaria a primaria (PEF Primary Energy Factors) informados y derivados de organismos oficiales como los que se presentan para España (Ver Tabla 14). Cabe destacar que estos valores son dinámicos, dependen de la matriz energética en el tiempo para cada país o localidad, así como de las metodologías utilizadas para su determinación. En el primer caso, se puede observar en la Fig. 2.78 cómo el PEF para electricidad varía en diferentes países para diferentes años y; en el segundo caso, a partir de un estudio que evaluó diferentes opciones para el cálculo del PEF para la electricidad en el contexto de la Directiva de Eficiencia Energética 27/2012/UE (Tabla 16), se observa cómo estos factores cambian según el método adoptado de cálculo y su proyección futura conforme a escenarios en el cambio de la matriz energética para la generación de electricidad. Es decir, no será lo mismo producir electricidad solo con carbón que a partir de un mix carbón e hidráulico, como tampoco, si el carbón es producido localmente o si este es importado. En general, y conforme a la Tabla 14, se producen mayores pérdidas para transformar recursos no renovables que renovables. Por tanto, mix energéticos que incorporen mayor cantidad de recursos renovables presentarán menores PEF, lo que se evidencia en las proyecciones del PEF para electricidad en la Comunidad Europea conforme a escenarios que incorporan mayor proporción de energía renovable. Los PEF, desde que describen la cantidad de energía primaria contenida en cada unidad de energía suministrada, se utilizan para realizar comparaciones entre los consumos de edificios. Sin embargo, los valores informados por diferentes organizaciones y países no se calculen de la misma manera, además se evidencia una transparencia limitada sobre qué procedimientos se adoptan en los diferentes países en la determinación del PEF (Hitchin, 2019). La

Tabla 15 muestra los valores declarados más altos y más bajos para los PEFs en países europeos, como también, los valores predeterminados (no renovables) derivados del Comité Europeo de Normalización (CEN). Lo anterior evidencia la enorme variabilidad existente, por ejemplo, en la generación de energía eléctrica que van entre 30% a 67%.

Fig. 2.77 Energía perdida derivada de los procesos de transformación y entrega de energía útil a la vivienda. Fuente: (GGF, 2019)

Tabla 14. Factores de conversión de energía útil a primaria en España

	Valores aprobados		
	kWh E.primaria renovable /kWh E. final	kWh E.primaria no renovable /kWh E. final	kWh E.primaria total /kWh E. final
Electricidad convencional Nacional	0,396	2,007	2,403
Electricidad convencional peninsular	0,414	1,954	2,368
Electricidad convencional extrapeninsular	0,075	2,937	3,011
Electricidad convencional Baleares	0,082	2,968	3,049
Electricidad convencional Canarias	0,070	2,924	2,994
Electricidad convencional Ceuta y Melilla	0,072	2,718	2,790
Gasóleo calefacción	0,003	1,179	1,182
GLP	0,003	1,201	1,204
Gas natural	0,005	1,190	1,195
Carbón	0,002	1,082	1,084
Biomasa no densificada	1,003	0,034	1,037
Biomasa densificada (pelets)	1,028	0,085	1,113

Fuente: (IDAE, 2016)

Tabla 15. Variabilidad en los coeficientes de paso de energía primaria (PEF)

	Mains gas	Oil – LPG	Oil – general	Diesel or heating oil	Fuel oil	Coal – general	Biomass – general	Wood – general	Wood pellets	Grid electricity	District heating – general
Range of reported PEF values from different EU Member States (dimensionless)											
Maximum	1.36	1.20	1.23	1.14	1.20	1.46	1.10	1.20	1.26	3.45	1.50
Minimum	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.01	0.01	0.01	1.5	0.15
CEN (non- renewable) default values	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.2	0.2	0.2	2.3	1.3

Fuente: (Hitchin, 2019)

Fig. 2.78 PEF para electricidad para diferentes países. Fuente: (Wilby, Rodríguez González, & Vinagre Díaz, 2014)

Tabla 16. Cálculo de PEF para electricidad y su proyección basado en 4 métodos y el contexto Europeo.

Method	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Method 1	2.41	2.37	2.26	2.08	1.87	1.79	1.74
Method 2	2.41	2.36	2.14	1.90	1.59	1.46	1.35
Method 3	2.52	2.49	2.38	2.21	2.01	1.93	1.87
Method 4	2.65	2.61	2.49	2.30	2.09	2.00	1.93

Fuente: (Esser & Sensfuss, 2016)

Conforme a la energía primaria que consume un edificio al año [kWh/m^2 / año]. Las edificaciones se pueden clasificar de acuerdo a su consumo en (Moore et al., 2013):

- a) Edificios de consumo convencional o CEB (Conventional Energy Building),
- b) Edificios de bajo consumo energético o LEB (Low Energy Building),
- c) Edificios con muy bajo consumo energético, edificios ULEB (Ultra Low Energy Building) o Edificios Pasivos (Passive House),
- d) Edificios cero de energía o nZEB (nearly Zero Energy Building) y
- e) Edificios que suman o aportan energía o PEB (Plus Energy Building)

En la evaluación energética de edificios, investigadores definen consumos energéticos de energía primaria sobre 120kWh/m^2 al año para edificios CEB (todos los consumos del edificio), limitando el consumo para calefacción a 15kWh/m^2 año (con resultados de test de presurización $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$) en edificios ULB y a 30kWh/m^2 (con resultados de test de presurización $n_{50} \leq 1 \text{ h}^{-1}$) para edificios LEB (P. Chastas, Theodosiou, Bikas, & Kontoleon, 2017). Por otro lado, desde que responder a consumos pequeños en climas severos es más complejo, la Tabla 17 muestra niveles recomendados de consumo de energía primaria, para calefacción, refrigeración, deshumidificación, ventilación y agua caliente, conforme a diferentes climas para responder al Enfoque Estratégico de bigEE para lograr edificios eficientes energéticamente. BigEE es una iniciativa internacional de los institutos de investigación para el asesoramiento técnico y sobre políticas y las agencias públicas en el campo de la energía y el clima, coordinada por el Instituto Wuppertal (Alemania). Su objetivo es desarrollar la plataforma de conocimiento internacional en línea bigee.net para la eficiencia energética en edificios, tecnologías relacionadas con edificios y dispositivos en las principales zonas climáticas del mundo.

Tabla 17. Valores recomendados de consumo de energía primaria para nuevos conceptos de edificios cerrados.

	Cold (e.g. Helsinki)	Temperate (e.g. Shanghai)	Hot and Humid (e.g. Mumbai)	Hot and Arid (e.g. Khartoum)
	kWh/m ² _{TFA} yr	kWh/m ² _{TFA} yr	kWh/m ² _{TFA} yr	kWh/m ² _{TFA} yr
LEB	40 - 80	40 - 80	100 - 150	50 - 100
ULEB	20 - 40	20 - 40	50 - 100	25 - 50
nZEB	0 - 20	0 - 20	0 - 50	0 - 25
PEB	++	++	++	++

(TFA: Treated floor area)

Fuente: (Moore et al., 2013)

Una vivienda eficiente energéticamente no necesariamente es sustentable. Estudios muestran que lograr un edificio nZEB demandará equipamiento y soluciones constructivas que presenten alta energía incorporada y un alto valor económico (Pacheco, Ordóñez, & Martínez, 2012). De ahí la importancia de incorporar a las viviendas soluciones constructivas que consideren estrategias de arquitectura bioclimáticas o el uso de materiales sustentables (madera, tierra, otros) o provenientes del reciclaje o reutilización, para reducir la carga ambiental asociada a la energía incorporada y carbón incorporado en la vivienda. Una investigación muestra que la incidencia de energía incorporada (EE) en el ciclo de vida de edificios residenciales varía entre el 5% y el 100% (P. Chastas et al., 2017). Donde en edificios convencionales (CEB) esta proporción oscila entre el 5% y el 36% y, en los edificios de baja energía (LEB) entre el 23% y el 58%, excepto por un pequeño número de valores extremos, como se muestra en Fig. 2.79. Esto evidencia la necesidad de los análisis entre los ahorros perseguidos en la etapa de operación versus las inversiones en la fase de pre-construcción y construcción, pues si en el futuro el precio y las emisiones de la energía caen producto de la utilización del sol como fuente inagotable de energía, los incentivos económicos estarán vinculados a edificios PEB para justificar un ingreso que cubra las inversiones en eficiencia energética. Estos aspectos se abordarán en el apartado 4 más adelante.

Fig. 2.79 Energía incorporada (EE) para edificios clasificados según su eficiencia energética.

Fuente: (P. Chastas et al., 2017)

Desde que la energía incorporada es una variable incidente en la evaluación de eficiencia energética y sustentabilidad de una vivienda, se hace necesario enfatizar las características deseables para subproductos y materiales de construcción, los que debieran responder a los siguientes cuatro principios (Calkins, 2009):

- Elegir materiales y productos que usen los recursos de manera eficiente: Reducir, reutilizar y reciclar materiales para reducir el consumo de recursos y la destrucción del hábitat. Usar materiales o productos durables, reusables, renovables y posibles de reciclar.
- Elegir materiales y productos que minimicen la energía y carbón contenido: Usar materiales locales de baja energía incorporada puede apoyar a este principio. Los materiales que se fabrican con fuentes de energía renovable basadas en combustibles no fósiles también contribuyen.
- Evitar los materiales y productos que pueden dañar la salud de las personas o el medio ambiente en cualquier fase de su ciclo de vida de la vivienda: Evitar los materiales o subproductos de construcción que presenten metales pesados o emitan gases tóxicos o contaminantes al aire, al agua o al suelo.

- d. Elegir materiales que aporten a estrategias de diseño sostenible de viviendas: Usar materiales no “verdes” deben evitarse, sin embargo, si contribuyen sustancialmente a contribuir a una característica de diseño sustentable en la vivienda, entonces, ellos podrían incluirse.

2.5.5. Simulación dinámica de edificios, EnergyPlus Software.

Como se ha visto en el apartado 2.5.3, la transferencia de calor bajo régimen dinámico es compleja de determinar por medios algebraicos y analíticos, por lo que se requieren de sistemas computacionales para tales efectos. Zhao y Mogulès (2012), en la predicción del consumo de la energía en edificios (de elementos o del sistema edificio) referencia 5 posibles métodos:

- a) métodos ingenieriles (elaborados o simplificados),
- b) métodos estadísticos,
- c) modelos de inteligencia Artificial Neural Networks (ANNs)
- d) Support Vector Machines (SVMs) y
- e) modelos para conocimiento parcial de la información (Grey models).

Los modelos ingenieriles, frecuentes en la evaluación energéticas de edificios (Sousa, 2012), utilizan los principios físicos (termodinámica, eléctricos, mecánicos, etc.) para realizar los cálculos. Estos métodos pueden clasificarse en dos tipos, los estacionarios y los dinámicos (H. Hernández, 2016). Los primeros responden a simplificaciones en el proceso de cálculo – por ejemplo, el basado en el principio de superposición de fenómenos propuesto por Lavigne y visto en el apartado 2.5.2 más atrás – y, los segundos, a métodos integrales que utilizan funciones físicas de dinámicas térmicas para calcular con precisión, hora a hora, el consumo de energía a partir de la información ambiental, de las características del edificio (soluciones constructivas, sistemas de instalaciones, etc.), de las tarifas de energía y de las condiciones de operación y uso del edificio (Zhao & Magoulès, 2012). Consecuentemente, desde que son muchas las variables que entran en juego

simultáneamente, los programas computacionales tales como EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS resultan útiles para responder a este desafío (Sousa, 2012).

Lavigne (2013) establece que en época de invierno, o cuando las temperaturas interior y exterior tiendan a permanecer más menos constantes, se puede determinar con bastante precisión el estado energético interior de la vivienda bajo régimen estacionario. Sin embargo, cuando se incorpora todo el año y, por tanto, necesidades de refrigeración en verano, entran en juego la inercia térmica abordada en el apartado 2.5.3 más atrás. En este contexto, en el análisis del desempeño energético de diferentes edificios, combinando análisis estacionarios y dinámicos, se muestran diferencias en los resultados. Lo que está relacionado con las propiedades de la estructura inercial de las edificaciones (Evangelista, Kiperstok, Torres, & Gonçalves, 2018). Esto se vincula a los aspectos de efusividad y difusividad planteados por Lavigne (2003) y, que dan origen a la inercia térmica por transmisión y absorción. Así, cuando la variación inercial es importante (piense en construcción vernácula con muros de tierra de gran espesor, por ejemplo), los resultados de la evaluación de una vivienda a partir de enfoques estáticos y simplificados son poco representativos del desempeño real de la construcción, especialmente durante la época de verano. Investigaciones han demostrado que en viviendas con inercia térmica importante, se sobre estima entre un 25% y 30% el consumo energético de un edificio para la generación de confort térmico en invierno (Evangelista et al., 2018). En consecuencia, en casos donde no prime la inercia térmica por absorción, es de esperar que las diferencias no sean tan relevantes. Esto se abordará en el caso que se plantea en el apartado 6.1.

En general, los programas de simulación computacional exhiben un sistema compuesto por un mecanismo de entradas de información, una unidad de análisis de la misma y un dispositivo de salida de información correspondiente a los resultados buscados. Los mecanismos de entrada presentan una interface que permite al diseñador definir las características del proyecto (Input), a partir de una base de datos proveída por el mismo programa o definida por el usuario. Con esta información el software realiza los cálculos necesarios que le permitirán entregar los resultados solicitados (Output). En consecuencia, los Inputs corresponden a información relativa al clima del lugar donde se emplaza la vivienda, a las propiedades físicas y

dimensionamiento de los diversos materiales o elementos de la envolvente, a las características de los sistemas de HVAC, a los obstáculos y/o elementos de sombreado, a costos de la energía, al tipo de energía y a los parámetros de confort requeridos, entre otros. El Output, o resultados de la simulación, corresponden en general a las demandas y consumos de energía, a las oscilaciones de temperatura y humedad interior y a los costos energéticos totales. Estos reportes son generados por motores de cálculo a partir de tres simulaciones de interés:

- a) Simulación de cargas térmicas,
- b) Simulación de comportamiento de los sistemas de instalaciones y
- c) Simulación económica.

En Chile existe un sistema de calificación energética de viviendas (SCEV) que, a partir de un método ingenieril (simplificado, más bien estacionario) y el uso de planillas electrónicas, permite determinar la demanda energética de la vivienda. Sin embargo, las planillas electrónicas a veces lanzan errores y los coeficientes de paso y otros parámetros de interés no se transparentan en los manuales de uso disponibles. Las que además ha presentado varias versiones que corrigen problemas o abordan actualizaciones, la última el a fines de noviembre del año 2018 (MINVU, 2018a). Para mayor información se puede recurrir a la página <https://www.calificacionenergetica.cl/>. La Fig. 2.80 muestra un ejemplo en el cálculo del ahorro energético (en %), basado en este sistema, para una vivienda en el que se toma una vivienda de referencia para su determinación. A partir de ese resultado se define su precalificación conforme al tipo de vivienda (departamento o casa) y al lugar geográfico donde se sitúe. Actualmente no existe un programa de simulación dinámica, aunque en el pasado se oficializó el programa de simulación dinámica CCTE_CL (ver Fig. 2.81). Programa que permitió evaluar el comportamiento térmico de las viviendas chilenas. El programa, de acceso gratuito, considera las zonas térmicas vigentes y, cuenta con base de datos de materiales y climáticos para el país. Este entrega valores de consumo energético referenciales de acuerdo a un rendimiento estacional definido por defecto en el programa. Su uso se describe en el “Manual de usuario del programa CCTE V2.0” (MINVU, 2006). Es interesante mencionar que los desarrolladores de este programa fueron los mismos del programa Español LIDER (H. Hernández, 2009).

Aspectos más específicos sobre la evaluación energética de viviendas chilenas serán abordados en el título 3.4 más adelante.

Fig. 2.80 Precalificación energética del SCEV. Fuente: (MINVU, 2018a)

Fig. 2.81 Simulación de comportamiento térmico de una vivienda en programa CCTE_CL.

Fuente: (H. Hernández, 2009)

Uno de los programas aceptados internacionalmente, debido a que es un programa muy completo para evaluar el desempeño energético de los edificios, es EnergyPlus (Sousa, 2012). A continuación se abordarán aspectos de su uso y se

mostrará su aplicación en un caso de estudio abordado en el apartado 6.3 más adelante.

a. EnergyPlus software

EnergyPlus es un programa completo de simulación energética de edificios que ingenieros, arquitectos e investigadores utilizan para modelar tanto el consumo de energía (para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación, artefactos, otros) como el uso de agua en los edificios. EnergyPlus toma lo mejor de dos programas de simulación BLAST y DOE-2. BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) y DOE-2 se desarrollaron y lanzaron a finales de los años 70 y principios de los 80 como herramientas de simulación de energía y carga (DOE, 2019).

EnergyPlus puede ser descargado desde la Web y es gratuito. Sin embargo, es una herramienta que es difícil de manejar para todo aquel que no esté familiarizado con los parámetros de eficiencia energética (Sousa, 2012), por lo que requiere de entrenamiento para dominar todos sus módulos y competencias de entrada en el área ingenieril para comprender los procesos físicos y de programación que sustentan la herramienta. Para esto se cuenta con manuales de entrenamiento disponibles en el portal <https://energyplus.net/>. Estos están en idioma inglés, que al ser muy específico y técnico, incorpora una nueva dificultad a la comprensión de los conceptos dentro del documento.

La Fig. 2.82 muestra los elementos que integran el sistema de simulación EnergyPlus, este evidencia 4 elementos coloreados en azul, amarillo, cian y rojo. Los elementos en azul definen las entradas (descripción del edificio, sus características y clima) y las salidas (resultados de la simulación) del proceso de simulación dinámica del edificio (en rojo). Lo que es gestionado por una interface (color cian) que no es muy amigable – por ejemplo, la vivienda y sus elementos deben modelarse a partir del ingreso de coordenadas tridimensionales–, por lo que se hace necesario la utilización de interfaces desarrolladas por terceros para describir y mostrar los resultados convenientemente (color en amarillo).

Existen interfaces muy completas que, en la práctica, resultan ser considerados como una nueva herramienta de simulación, pero que en realidad utilizan EnergyPlus como motor de cálculo, tal es el caso del programa DesignBuilder. Otras interfaces, derivadas de programas opensource y disponibles en la Web, son las plataformas OpenStudio (<https://www.openstudio.net/>) y Euclid (<https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>). Ambas utilizan el programa SketchUp para diagramar los elementos del edificio tridimensionalmente, facilitando enormemente el trabajo del simulador. Los programas arrojan los resultados en diversos formatos, los que pueden ser gestionados por planillas electrónicas; aunque también existen programas complementarios para visualizarlos como es el caso del programa xEsoView (<http://xesoview.sourceforge.net/>). La Fig. 2.83 muestra una modelación de una edificación en SketchUp a partir de la interface Euclid.

Fig. 2.82 Esquematización general del programa de simulación EnergyPlus. Fuente: (DOE, 2019)

Fig. 2.83 Simulación energética de Edificio con EnergyPlus partir de interface Euclid. Fuente: (Levitt, 2017)

Los pasos necesarios para la modelación, a partir del uso de la interface Euclid, son los siguientes:

1. Instalar la aplicación Euclid como complemento en SketchUp y modelar el edificio tridimensionalmente. La modelación tridimensional queda coloreada en color café claro en muros, café oscuro en techumbre, celeste en ventanas, gris en piso y púrpura en elementos de sombra (ver Fig. Fig. 2.83 más atrás). La

introducción de coordenadas se realiza de acuerdo a una determinada referencia, definida por uno de los ejes que define el norte. Como resultado de la modelación se genera un archivo EnergyPlus (Input File) que presenta la extensión .idf.

2. Al ejecutar el programa EnergyPlus, se abrirá una interface denominada EP-Launch (ver Fig. 2.84). Esta interface permite rescatar el archivo generado a partir de Euclid en SketchUp (“browse” en Fig. 2.84) y editarlo convenientemente a partir del uso de la interface de edición denominada “Edit – IDF Editor” (ver Fig. 2.85). Esta interface permite ingresar las características del edificio y las condiciones de uso a partir de la programación de las actividades humanas. En la Fig. 2.85 se aprecia el módulo donde se ingresan las características de los materiales, tales como conductividades térmicas, densidades, espesores y calor específico, entre otras propiedades físicas que permitirán calcular las transmitancias térmicas y los flujos de calor a través de los diferentes elementos de envolvente de la vivienda en el tiempo.

Fig. 2.84 Interface EP-Launch de EnergyPlus. Fuente: EnergyPlus Software.

3. Editado el archivo, se incorpora el archivo de clima “EnergyPlus Weather” asociado a la localidad donde estará emplazada la vivienda modelada (de extensión .epw). Esto se hace buscando el archivo en la sección “Weather File” en la interface EP-Launch (ver Fig. 2.84). Para Chile se encuentran disponibles bases de datos climáticas para las ciudades de Antofagasta, Concepción, Isla de Pascua (Easter Island), Punta Arenas y Santiago (disponibles en <https://energyplus.net/weather>). Para otras ciudades estos debieran solicitarse a empresa que los provean bajo un costo no menor.
4. Luego se ejecuta el programa cliqueando el botón de simulación. Este se muestra en la interface EP-Launch como “Simulate...” (ver en Fig. 2.84). Esto tomará pocos segundos o algunos minutos dependiendo de la simulación y los resultados esperados.
5. Obtenidos los resultados de la modelación, estos deberán ser chequeados. Es decir, verificar si existe algún error o discrepancia grave introducida en el conjunto de variables que alimentan el programa. En esto inicia por la revisión de los mensajes que son arrojados en la ventana emergente una vez terminada la simulación. Esta se muestra en la Fig. 2.86. En ella se establecen tres tipos de advertencias: “warning”, “severe” o “fatal”. Las advertencias tipo “warning” no corresponden a errores graves, sin embargo, se aconseja sean revisadas. Las segundas, del tipo “severe”, probablemente deberán corregirse y las últimas, del tipo “fatal”, ciertamente deberán corregirse para obtener los resultados deseados para la modelación. El estudio de las advertencias se realiza en el módulo EP-Launch, cliqueando el botón “errors” en sección “View results” (ver Fig. 2.84).

Fig. 2.85. Interface Edit – IDF Editor de EnergyPlus. Fuente: EnergyPlus Software.

Fig. 2.86 Ventana de EnergyPlus una vez corrida la simulación. Fuente: EnergyPlus Software.

- Finalmente, luego de revisadas o corregidas las advertencias, se recuperan los resultados en diferentes formatos posibles. En uno de estos formatos permite rescatar los resultados para ser trabajados en planillas electrónicas MS-Excel. Estos se obtienen en la pestaña “Sets” dentro de la sección “View results” de la interface EP-Launch (ver Fig. 2.84). También se pueden rescatar los archivos .eso para ser visualizados en el programa xEsoView.

Esta herramienta de simulación será utilizada para determinar la demanda requerida para calefaccionar la vivienda caso de estudio descrita en el título 6.3 “Caso 3: Análisis de ciclo de vida en viviendas, caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social” más adelante.

3. CLIMA, REGLAMENTACIÓN TÉRMICA Y VIVIENDA SOCIAL EN CHILE

3.1. El clima y otras preexistencias ambientales

El estado energético de confort térmico al interior de las viviendas queda supeditado a las condiciones climáticas y medioambientales del entorno local e inmediato al sitio donde se emplazan las edificaciones. No se puede concebir el diseño y la construcción de una vivienda que no considere estas preexistencias ambientales, pues su conocimiento y mejor aprovechamiento de ellas en el diseño de una vivienda permitirán minimizar el uso de energía para generar las condiciones de confort térmico. Esto evidencia la relevancia que presenta la concepción arquitectónica para lograr la eficiencia energética.

Dos diseños podrán satisfacer igual necesidad habitacional en un determinado sitio para iguales costos de inversión, sin embargo, uno necesariamente presentará mayor requerimiento de energía para brindar confort térmico. Esto abre desafíos a la arquitectura, los que ya han sido exhibidos en el título 2.1 más atrás. Esto se evidencia con claridad en lo expuesto por Lavigne (2003): *“Resulta absurdo construir un edificio en el cual, sin recurrir a algún artificio y sin consumir energía, la calidad del confort brindado en él resulta inferior a la que se puede obtener en el exterior bajo un árbol. La arquitectura no debería originar por sí misma condiciones de incomodidad. Por el contrario, debe ser estudiada también en función del clima. La arquitectura debe ser climática o bien bioclimática, puesto que de lo contrario no es una arquitectura completa”*.

Por tanto, el medioambiente presentará diferentes manifestaciones energéticas que condicionarán el desarrollo de los proyectos habitacionales. Según Serra y Coch

(1995), estas manifestaciones quedan resumidas en las preexistencias ambientales del sitio, compuestas por tres factores:

- a) Factores geográficos (latitud, topografía, altura absoluta y relativa, hidrografía, morfología del entorno próximo y del terreno, relación tierra-agua, otros),
- b) Factores biológicos (flora y fauna) y,
- c) los tecnológicos (industria, edificaciones, vías de comunicación, etc.).

Monroy (2006) clasifica las preexistencias ambientales a partir de características macro-climáticas y micro-climáticas, las primeras cuando se refieran a una zona geográfica mayor, tal como un país o una región específica (latitud, longitud, entre otras) y, las segundas, cuando se trate de un ámbito más pequeño, es decir, a nivel de emplazamiento de las viviendas. Es claro que algunas características micro-climáticas dependerán de características macro-climáticas. Así, por ejemplo, la radiación solar tiene influencia directa en la temperatura del aire y, a la vez, la radiación solar depende de la altitud y la temperatura del aire de la altitud. Aspectos que determinan ganancias o pérdidas de energía conforme al balance de calor al interior de la vivienda abordado en el título 2.5.2 más atrás. Tabla 18 detalla aquellos parámetros ambientales considerados relevantes en la evaluación energética de las viviendas.

Tabla 18. Variables climáticas preponderantes en las viviendas

Variable	Alguna incidencias en la vivienda
1. Radiación solar	Aportará calor convenientemente en verano o invierno a la vivienda, cuyas estrategias de arquitectura bioclimática deberán considerar su captura y distribución a la vivienda en invierno (muro trombe o invernaderos, por ejemplo) y su rechazo durante las horas de calor (parasoles, vegetación caduca, etc.). Además, es un requerimiento de entrada en el diseño de sistemas de instalaciones limpias como lo son colectores solares para ACS o fotovoltaicos para suministrar electricidad.
2. Temperatura del aire	Según el diagnóstico bioclimático, este puede contribuir negativa o positivamente en la vivienda, calentando o enfriando los espacios habitacionales.
3. Viento	Presenta una incidencia negativa en invierno, pues en combinación con la temperatura, puede incrementar el enfriamiento continuo. De ahí la importancia de los sistemas intercambiadores de calor en invierno. Por otro lado, en verano facilita la disipación de la radiación solar absorbida por los espacios habitacionales. Además, es requerimiento de entrada para abastecer de electricidad a las viviendas cuando se utilizan sistemas eólicos y, siendo un fluido que transporta energía y conocido que la temperatura media bajo tierra es mayor que en la superficie en invierno, sobre todo en climas fríos, es útil en sistemas geotérmicos que aprovechan el intercambio de calor entre el fluido del aire y el suelo a diferentes temperaturas. Estos aspectos se desprenden de la Fig. 2.75 en la página 121.
4. Humedad relativa	En verano puede contribuir al enfriamiento mediante la evaporación adiabática. Además, en combinación con baja renovación de aire al interior (ventilación cruzada) y alta temperatura, puede provocar problemas de condensación en los elementos de envolvente conforme a lo establecido en el apartado 2.5.1 más atrás.

Desde la perspectiva energética del confort térmico, la variable temperatura del aire es clave en determinación de la transferencia de calor a través de los elementos de la envolvente, pues define el gradiente térmico entre el exterior e interior de la vivienda conforme a la Ecuación 17(Q_t) y Ecuación 18 (Q_v). Adicionalmente, este gradiente térmico define los riegos de condensación en los elementos de la envolvente conforme a la Ecuación 11. De este modo, resulta importante establecer

los aspectos sobre cómo la temperatura se verá afectada por el entorno macro y micro-climático. Esto se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Aspectos macro y micro-climáticos en la temperatura.

Factor influyente		Efecto en la temperatura del aire
Macro-climático	Latitud	Influye sobre la masa atmosférica que debe atravesar la radiación solar para solsticio de verano e invierno (inclinación del sol). Incidiendo en el nivel de la temperatura conforme a la carga solar incidente, variando durante el día y durante el año.
	Altura sobre el nivel del mar	Disminuye con la altitud, se puede estimar una disminución de aproximadamente 0,5°C por cada 100m de elevación.
	Altura relativa	Condiciona los efectos de inversión térmica. Positivo en invierno, negativo en verano.
	Relación masa tierra-agua	Condiciona la inercia térmica y las oscilaciones de temperatura.
	Morfología del terreno	Ofrece protección a la radiación y, en relación con la vegetación, puede incrementar la inercia tendiendo a estabilizar las temperaturas.
	Los vientos	Según el tipo de viento, la ventilación cruzada favorecerá condiciones más o menos frías. Lo que será beneficioso en verano y desfavorable en invierno.
Micro-climático	Topografía	Afecta conforme a la orientación de los terrenos, así como también a la altura relativa y ubicación de un punto respecto de su entorno. Supóngase una depresión entre cerros, por tanto, existirá una ladera más expuesta a la radiación y a los vientos y otra con efecto contrario. La depresión concentrará mayor humedad y vegetación, al igual que la ladera hidrófila, lo que amortiguará las temperaturas en verano.
	Tipo de terreno	Los terrenos naturales, al contrario que los urbanizados, no se calientan tanto superficialmente y transmiten este calor a las capas inferiores del terreno, por lo cual las variaciones de temperatura quedan atenuadas al igual que la reflexión.
	Tipo de vegetación	La vegetación crea un microclima de mayor humedad y menor temperatura, por una parte debido a la sombra que generan y, por otra, debido a enfriamiento evaporativo.

Fuente: (H. Hernández, 2009)

Los antecedentes presentados en la Tabla 19 evidencian la variabilidad que puede presentar la temperatura exterior. Sin embargo, se puede suponer que presenta características sinusoidales para un período de 24h (Lavigne et al., 2003). En Chile, en general, se presentan menores temperaturas en los meses de junio a septiembre y mayores temperaturas entre los meses de diciembre a marzo (ver Fig. 3.1 para Santiago de Chile). A partir de mediciones estadísticas se definen, para cada mes y día, temperaturas medias, medias mínimas y medias máximas (Ver Fig. 3.1 y Fig. 3.2 para Santiago). Estas resultan útiles al momento de estudiar el desempeño energético de las viviendas en base al análisis estacionario abordado en el apartado 2.5.2 más atrás.

Fig. 3.1 Temperaturas a lo largo del año en la ciudad de Santiago. Fuente: (Weather Spark, 2019)

Fig. 3.2 Variación de la temperatura durante el día por mes en Santiago. Fuente: (Weather Spark, 2019)

3.2. Aspectos climáticos para Chile

Chile presenta gran variabilidad de condiciones climáticas de norte a sur y de este a oeste, proveída principalmente por las características de esbeltez y accidentabilidad de su territorio. Por un lado, una gran extensión en el continente sudamericano de aproximadamente 4.300 Km. que van desde el Altiplano a los 17°35' S hasta Tierra del Fuego a los 56° S y, por otro lado, un ancho que en promedio no supera los 177 Km. Además, presenta particularidades en su relieve de oeste a este que le son característicos para gran parte de su extensión latitudinal, estos son: La Planicie Litoral, la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes. La variabilidad de temperatura a nivel nacional es debida, principalmente, y conforme a la Tabla 19, a la variable macro-climática latitud. Esta define las alturas solares máximas y mínimas para los solsticios de verano e invierno respectivamente, definiendo la radiación solar incidente a lo largo del país, la que cae de norte a sur (Ver Fig. 3.3).

En consecuencia, la accidentabilidad geográfica nacional en sentido longitudinal y transversal (Cordillera de la Costa, Depresión intermedia y Cordillera de los Andes), sumada a la presencia del Océano Pacífico al oeste, modelan distintas zonas climáticas en el país. Las que van desde zonas con climas totalmente desérticos y de gran oscilación térmica por el norte, hasta climas muy fríos y lluviosos por el sur, pasando por la zona central con climas mediterráneos en la depresión o marítimos en el litoral. La variabilidad que presentan los factores determinantes del clima, a lo largo y ancho de Chile, pueden resumirse Tabla 20.

Fig. 3.3 Radiación solar a largo de Chile. Fuente: (Ministerio de Energía, 2019)

Tabla 20. Variabilidad de factores climáticos en Chile

Dirección y Sentido	Variabilidad	Factor climático
Norte a Sur	Se incrementan	Precipitaciones Humedad del aire Meses de invierno Nubosidad Vegetación
	Disminuyen	Temperatura del aire Radiación Solar Altura Solar
Oeste a Este	Se incrementan	Oscilación diaria de temperatura Número de horas de sol Radiación solar
	Disminuyen	Humedad relativa Nubosidad Presión atmosférica.

Fuente: (H. Hernández, 2009)

Los parámetros climáticos para la edificación en Chile se muestran en la norma NCh1079. Esta identifica diferentes zonas climáticas en función a temperaturas, nubosidad, radiación solar, horas de sol, precipitaciones, intensidad y dirección del viento, vegetación y humedad. Las zonas que se definen son 9: Zona Norte Litoral (NL), Zona Norte Desértica (ND), Zona Norte Valles Transversales (NVT), Zona Central Litoral (CL), Zona Central Interior (CI), Zona Sur Litoral (SL), Zona Sur Interior (SI), Zona Sur Extrema (SE) y Zona Andina (An).

La norma NCh1079 establece las principales características climáticas para estas 9 zonas y para un grupo de localidades más importantes por zona, para las que definen los requerimientos mínimos de pendiente en cubiertas, la orientación de muros que necesitarán protección solar y sus características climáticas. También se tabulan parámetros meteorológicos y geográficos medios mensuales tales como: temperaturas, precipitaciones, humedad relativa, intensidad de los vientos, horas de sol, entre otros. La Tabla 21 indica algunos aspectos climáticos referenciales para cada una de las zonas climático-habitacionales definidas en la NCh1079. Cabe destacar que esta normativa propone para cada una de estas zonas climáticas una

transmitancia térmica máxima para los elementos de la envolvente tradicionales (ver Tabla 22 valores de transmitancia determinados a partir de criterios de confort y eficiencia energética para edificaciones habitacionales distintos a los establecidos en la normativa térmica vigente que se abordará más adelante. En términos concretos, estas recomendaciones podrían implicar que en regiones de la zona central del país y central sur (Santiago, Valparaíso y Concepción), las demandas de energía disminuyan en más de un 50% respecto de la actual situación para viviendas. Asimismo, en las localidades nortinas los niveles de calefacción podrían llegar a ser nulos y, al sur de Chile (Temuco, Puerto Montt, Chiloé) las demandas de energía para calefacción disminuirían en un tercio de la actual demanda (INN, 2008)

Tabla 21. Características climáticas referenciales para distintas zonas de Chile.

Ubicación geográfica	Zona	Localidades representativas de las zonas	a) Temperatura media mensual Enero y Julio b) Oscilación Enero y Julio respectivamente.	Humedad relativa media mensual Enero y Julio
Norte Litoral (NL): Zona desértica con clima dominante marítimo.	Arica, Iquique, Antofagasta, Chañaral, La Serena.	a) 20°C – 14°C b) 7,3°C – 6,2°C	74% - 80%
	Norte Desértica (ND): Zona desértica.	Calama, Quillahua	a) 15,1°C – 8,6°C b) 19°C – 21,8°C	42% - 33%
	Norte Valle Transversal (NVT): Zona Semidesértica.	Copiapó, Vallenar, Vicuña, Ovalle, Combarbalá, Illapel.	a) 19,4°C – 11,2°C b) 16°C – 14,3°C	65% - 70%
	Central Litoral (CL): Zona con clima marítimo.	Quintero, Viña del Mar, Valparaíso, San Antonio, Chanco.	a) 16,5°C – 9,6°C b) 9,7 °C – 7,8°C	78% - 88%
	Central Interior (CI): Zona clima mediterráneo.	San Felipe, Los Andes, Santiago, Rancagua, Curicó, Talca, Linares, Cauquenes, Chillán.	a) 20,3°C – 7,9°C b) 18,2°C – 11,2°C	61% - 84%
	Sur Litoral (SL): Zona de clima marítimo lluvioso.	Talcahuano, Concepción, Valdivia, Puerto Montt.	a) 15,5°C – 7,5°C b) 11,1°C – 6,8°C	77% - 89%
	Sur Interior (SI): Zona lluviosa y fría con heladas frecuentes.	Los Ángeles, Traiguén, Temuco, Loncoche, Osorno.	a) 15,5°C – 6,9°C b) 16,9°C – 8,4°C	75% - 89%
	Sur Extremo (SE): Zona fría muy lluviosa.	Ancud, Castro, Aysén, Punta Arenas.	a) 12,1°C – 2,5°C b) 8,6°C – 5,3°C	76% - 88%
	Andina (An): Zona atmósfera Seca.	Potrerrillos, El Teniente.	b) 9,5°C – 8,5°C	53% - 68%

Fuente: (H. Hernández, 2009)

Tabla 22. Valores máximos recomendados para transmitancias de la envolvente según NCh1079Of.2008, en $W/(m^2K)$

Zona		Elementos opacos verticales (muros)	Techumbre opaca	Piso ventilado	Elementos vidriados verticales
1	NL	2,00	0,80	3,0	5,8
2	ND	0,50	0,40	0,7	3,0
3	NVT	0,80	0,60	1,2	3,0
4	CL	0,80	0,60	1,2	3,0
5	CI	0,60	0,50	0,8	3,0
6	SL	0,60	0,40	0,8	3,0
7	SI	0,50	0,30	0,7	3,0
8	SE	0,40	0,25	0,5	2,4
9	An	0,30	0,25	0,4	2,4

Fuente: (INN, 2008)

Estudios indican que la aplicación de las transmitancias propuestas en la Tabla 22 pueden elevar en promedio entre 3 a 4°C la temperatura interior, lo que significa alcanzar en un amplio período del día para época de invierno temperaturas del orden de 17 a 18°C, lo que conlleva un impacto significativo respecto al confort habitacional y al consumo de energía para calefaccionar las viviendas chilenas durante el invierno (H. Hernández, 2009).

3.3. Programa Climate Consultant

El análisis climatológico local, conforme a lo planteado en el apartado 2.1 más atrás, es clave para el establecimiento de las estrategias de arquitectura bioclimática o vernácula que busquen tomar ventaja del entorno climático en el establecimiento de condiciones de confort térmico favorables al interior de las viviendas. Para esto existen herramientas computacionales que permiten vincular las condiciones climáticas con estrategias arquitectónicas pasivas posibles de implementar en una vivienda. Una de estas herramientas es “Climate Consultant”, desarrollada por la Universidad de California (UCLA), que toma de referencia 4 modelos de confort térmico, entre ellos el estándar ASHRAE 55 (UCLA, 2018). El objetivo de esta aplicación es ayudar a los diseñadores a crear edificios más eficientes

energéticamente y más sostenibles (Milne, Liggett, Benson, & Bhattacharya, 2009), para ello le lee archivos climáticos en formato EPW (EnergyPlus Weather) disponibles sin costo para miles de estaciones climáticas en todo el mundo. Algunas ciudades en Chile que presentan datos climáticos gratuitos en este formato son: Antofagasta, Concepción, Isla de Pascua (Rapa Nui o Easter Island), Punta Arenas y Santiago. Las bases de datos climáticas para Antofagasta, Concepción y Santiago (disponibles en <https://energyplus.net/weather>), serán utilizadas en la modelación energética asociada al caso de estudio descrito en el apartado 6.3 más adelante.

La última versión del software Climate Consultant 6.0, disponible en <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>, está escrito en Java (compatible con máquinas Mac y PC) y traduce la base de datos climáticos a docenas de pantallas gráficas que muestran la información de manera comprensible y significativa para adoptar medidas diseño eficiente y sustentable para la construcción o rehabilitación de viviendas, algunas de pantallas son se muestran entre las Fig. 3.5 y la Fig. 3.11. Cada proyecto inicia con la selección de un archivo climático en formato EPW. Por defecto se muestra el archivo climático para la zona de California, sin embargo, se puede abrir cualquier archivo en formato EPW disponible para su análisis (ver “Open Existing EPW Weather Data File” en Fig. 3.4.).

Climate Consultant 6.0 contiene un amplio conjunto de opciones de ayuda que le darán al usuario definiciones de cada variable y discusiones detalladas sobre cómo aplicar estos datos para crear edificios energéticamente eficientes. Esta opción está destinada a servir como "Manual del usuario" y está disponible en el menú del programa como “Help” (Ver Fig. 3.4.). También existe un número importante de tutoriales en youtube que buscan demostrar el uso y la utilidad del programa Climate Consultant 6.0, uno de ellos, referenciado desde el portal oficial de descarga del programa y desarrollado por Carmen Trudell, muestra cómo utilizar las principales características del programa (<https://www.youtube.com/watch?v=bc0dIPP0SBg>).

The screenshot shows the 'Climate Consultant 6.0 (Build 13, Jul 5, 2018)' window. The menu bar includes 'File', 'Criteria', 'Charts', and 'Help'. The main interface is divided into two sections. The top section, titled 'SELECT WEATHER DATA', contains a 'LOCATION:' field with sub-labels 'Latitude/Longitude:' and 'Data Source:'. The bottom section contains three stacked selection boxes. The first box, 'SELECT BUILDING TYPE:', has two radio buttons: 'Residential' (selected) and 'Small Non-Residential'. The second box, 'SELECT UNITS:', has two radio buttons: 'Imperial' (selected) and 'Metric'. The third box, 'SELECT WEATHER DATA:', contains three buttons: 'Select California Climate Zone Data File', 'Open Existing EPW Weather Data File', and 'Download New EPW Weather Data File' (which is highlighted with a dashed border).

Fig. 3.4. Interfaz de inicio de un proyecto de análisis con Climate Consultant. Fuente:
(UCLA, 2018)

A modo de ejemplo se ha descargado el archivo para la ciudad de Santiago de Chile (CHL_Santiago.855740_IWEC.epw) con el objetivo de mostrar la utilidad de algunas de las gráficas o pantallas para la modelación sustentable e eficientes de viviendas. Así, la Fig. 3.5 muestra la temperatura promedio en la localidad de Santiago (Las coordenadas geográficas se pueden apreciar en el extremo superior derecho de la figura), cuyo valor promedio anual es de aproximadamente 15°C. Se evidencia que debieran adoptarse estrategias de arquitectura vernácula para climas templados, ya que hay meses de calor (verano) con temperaturas promedio de 20°C y otros meses de frío donde la temperatura del orden de 7,5°C. Dicha necesidad de energización se aprecia a lo largo del año a partir del contraste entre los promedios por mes y las zonas de confort para verano e inviernos definidas en color gris conforme al estándar ASHRAE 55.

Fig. 3.5 Rango de temperaturas para Santiago a partir del Climate Consultant 6.0.

El gráfico de sombreado solar (“Sun Shading Chart” en Fig. 3.6) muestra un rango importante para el ángulo de altitud entre el verano y el invierno (ver eje ordenado en Fig. 3.6), es decir, entre 80°C y 32°C al norte, respectivamente. Lo que abre el camino para diseñar elementos de sombreado en verano para minimizar las necesidades de refrigeración. Esta gráfica de sombreado solar permite hacer clic y arrastrar máscaras de sombreado para aleros y voladizos e ingresar datos en objetos (árboles, edificios, chimeneas) que sombrean ventanas o colectores solares, mostrando el número de horas sin sombra cuando se necesita sombreado, se necesita ganancia solar y cuando la ganancia solar no es útil (Ver extremo superior izquierdo bajo “LEGEND” en Fig. 3.6)

Fig. 3.6 Gráfico de sombreado solar (“Sun Shading Chart”) para Santiago a partir del Climate Consultant 6.0.

La Fig. 3.7 muestra la gráfica de la temperatura del suelo a lo largo del año para la localidad de Santiago, de acuerdo con la gráfica la temperatura promedio del suelo por debajo de 0,5 o 2 metros es de alrededor de 15°C, lo que fomenta el uso de estrategias de diseño bioclimático para precalentar el aire antes de que ingrese a la vivienda en invierno o enfriarlo en verano, sistemas pasivos que podrían potenciarse al incorporar intercambiadores de calor y bombas de calor. Esto queda muy claro al contrastar la distribución de la temperatura del suelo, la que es más menos estable a lo largo del año a mayor profundidad (ver profundidades en extremo superior izquierdo bajo “LEGEND” Fig. 3.7), con la temperatura potencial en invierno entre la temperatura promedio que se muestra en la Fig. 3.5 para los meses de mayor frío y calor.

Fig. 3.7 Gráfico de temperatura del suelo (“Ground Temperature”) para Santiago a partir del Climate Consultant 6.0.

Las gráficas previas muestran la utilidad de la aplicación del programa Climate Consultant en la interpretación de los datos climáticos disponibles en formato EPW para Chile. Sin embargo, dentro de las gráficas que presenta el programa, y que destaca por sobre las demás, es la Carta Psicrométrica (Psychrometric Chart). Esta gráfica muestra un conjunto de estrategias de diseño pasivo posibles de implementar en las viviendas, seleccionadas para las localidades respectivas y ponderadas según su aporte en horas de confort térmico. Para el caso de Santiago, esta se muestra en la Fig. 3.8. En esta gráfica se pueden ver 16 estrategias de diseño, algunas con poco aporte y que se podrían eliminar manteniendo aún un número adecuado de horas confortables. Esto se hace cliqueando sobre las estrategias de diseño pasivo para ir quitándolas o reincorporándolas para el análisis respectivo. Este ejercicio busca optimizar el número de estrategias con mayor aporte a las condiciones de confort térmico, en otras palabras, tratar de simplificar las medidas de diseño sustentable o de reacondicionamiento en las edificaciones. Si se cliquea en el cuadro “Show Best Set of Design Strategies”, parte inferior izquierda de la Fig. 3.8, esta labor la desarrollará automáticamente el programa. La Fig. 3.9 muestra para el caso de Santiago un número de estrategias que le permite alcanzar el 99,7% de horas de confort térmico.

Definida estas estrategias de diseño, el programa muestra la “pantalla pautas de diseño” (“Design Guidelines screen”). Esta muestra una lista de sugerencias específicas para el clima particular (en este caso para Santiago) y para el conjunto seleccionado de estrategias de diseño (en este caso las que se muestran en la Fig. 3.9) que guían el diseño de las edificaciones. Esta lista cambiará si realizan cambios en la pantalla de criterios, por ejemplo, cambiando la definición de la zona de confort o cualquiera de los otros criterios de estrategia de diseño. Si se anula la selección de cualquiera de las estrategias de diseño del gráfico psicrométrico (Fig. 3.9) porque no se aplican a un edificio particular, entonces esta lista también podría cambiar. Las pautas en la parte superior de esta lista (Fig. 3.10) presentan mayor potencial e importancia respecto al clima, mientras que las que se encuentran en la parte inferior podrían tener un potencial más débil (UCLA, 2018). Finalmente, cuando se cliquea sobre una de estas guías o pautas de diseño sustentable, el programa mostrará una explicación o esquematización de la estrategia. A modo de ejemplo se ha cliqueado sobre la estrategia 23 listada en la Fig. 3.10, la explicación respectiva se muestra en la Fig. 3.11.

Fig. 3.8 Gráfico Psicrométrico (“Psychrometric Chart”) para Santiago a partir del Climate Consultant 6.0.

Fig. 3.9 Gráfico Psicrométrico con buenas estrategias de diseño bioclimático que permiten alcanzar 99,7% de horas de confort térmico para Santiago.

DESIGN GUIDELINES (for the Full Year) ASHRAE Standard 55-2004 using PMV User Modified Design Strategies, User Modified Criteria		LOCATION: SANTIAGO, -, CHL Latitude/Longitude: 33.38° South, 70.78° West, Time Zone from Greenwich -4 Data Source: IWECC Data 855740 WMO Station Number, Elevation 476 m
<p>Assuming only the Design Strategies that were selected on the Psychrometric Chart, 99.7% of the hours will be Comfortable. This list of Residential Design Guidelines applies specifically to this particular climate, starting with the most important first. Click on a Guideline to see a sketch of how this Design Guideline shapes building design (see Help).</p>		
19	For passive solar heating face most of the glass area north to maximize winter sun exposure, but design overhangs to fully shade in summer	
20	Provide double pane high performance glazing (Low-E) on west, south, and east, but clear on north for maximum passive solar gain	
11	Heat gain from lights, people, and equipment greatly reduces heating needs so keep home tight, well insulated (to lower Balance Point temperature)	
24	Use high mass interior surfaces like slab floors, high mass walls, and a stone fireplace to store winter passive heat and summer night 'coolth'	
3	Lower the indoor comfort temperature at night to reduce heating energy consumption (lower thermostat heating setback) (see comfort low criteria)	
62	Traditional passive homes in temperate climates used light weight construction with slab on grade and operable walls and shaded outdoor spaces	
31	Organize floorplan so winter sun penetrates into daytime use spaces with specific functions that coincide with solar orientation	
8	Sunny wind-protected outdoor spaces can extend living areas in cool weather (seasonal sun rooms, enclosed patios, courtyards, or verandahs)	
16	Trees (neither conifer or deciduous) should not be planted in front of passive solar windows, but are OK beyond 45 degrees from each corner	
63	Traditional passive homes in cool overcast climates used low mass tightly sealed, well insulated construction to provide rapid heat buildup in morning	
58	This is one of the more comfortable climates, so shade to prevent overheating, open to breezes in summer, and use passive solar gain in winter	
23	Small well-insulated skylights (less than 3% of floor area in clear climates, 5% in overcast) reduce daytime lighting energy and cooling loads	
55	Low pitched roofs with wide overhangs works well in temperate climates	
14	Locate garages or storage areas on the side of the building facing the coldest wind to help insulate	
18	Keep the building small (right-sized) because excessive floor area wastes heating and cooling energy	
15	High Efficiency furnace (at least Energy Star) should prove cost effective	
37	Window overhangs (designed for this latitude) or operable sunshades (awnings that extend in summer) can reduce or eliminate air conditioning	
12	Insulating blinds, heavy draperies, or operable window shutters will help reduce winter night time heat losses	
40	High mass interior surfaces (tile, slate, stone, brick or adobe) feel naturally cool on hot days and can reduce day-to-night temperature swings	
2	If a basement is used it must be at least 18 inches below frost line and insulated on the exterior (foam) or on the interior (fiberglass in furred wall)	

Fig. 3.10 Pautas o guías de diseño ("Design guidelines) a partir de la gráfica Psicrométrica con buenas estrategias de diseño bioclimático que permiten alcanzar 99,7% de horas de confort térmico para Santiago en Fig. 3.9.

Small well-insulated skylights (less than 3% of floor area in clear climates, 5% in overcast) reduce daytime lighting energy and cooling loads

Fig. 3.11 Explicación de una de las pautas o guías listada en la Fig. 3.10

3.4. Reglamentación térmica en Chile

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) clasifica y subdivide el territorio nacional en 7 zonas térmicas (distintas de las climáticas definidas en la Tabla 22 más atrás) para efectos de regular el aislamiento térmico de la envolvente de las viviendas. Lo que se reglamenta a través de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), específicamente, en el artículo 4.1.10 vigente desde el año 2007. Estas 7 zonificaciones surgen de la determinación del número de grados/día necesarios para alcanzar una temperatura de confort en cada zona estudiada. Un grado/día, en un período de un día, es la diferencia entre la temperatura fijada como “base”, y la media diaria de las temperaturas bajo la temperatura base, igualando a la “base” aquellas superiores a ésta. Dependiendo del período utilizado, se puede hablar de grados/día, grados/hora, grados/año, etc. En el caso de la zonificación térmica se tomó como base de temperatura interior 15°C, bajo el supuesto de que lo que resta para alcanzar confort de 18 a 20°C es aportado por las ganancias internas (personas,

electrodomésticos, iluminación artificial y otros) y las ganancias solares. (Bustamante, 2009). De este modo, a mayor grados/día mayor será la exigencia de aislamiento térmico en las viviendas. Sin embargo, esta normativa ha evidenciado no responder a estándares de confort y eficiencia (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Blender, 2015). Lo que se desprende al contrastar las transmitancias térmicas exigidas por reglamento en Tabla 23 y las recomendadas en la Tabla 22 para una zona climática común. La clasificación territorial vía grado/días, distinta sustancialmente de la clasificación definida por la norma NCh1079, complejiza la unificación de criterios para la arquitectura y los estudios bioclimáticos, pues la normativa sólo considera la temperatura como variable discriminadora. Esto se aprecia claramente al identificar que una misma zona climática (ver Tabla 21) cuenta con más de una zona térmica y, por tanto, distintos requerimientos en aislamiento térmico.

Tabla 23. Exigencias transmitancias a elementos de envoltente según OGUC

EXIGENCIAS TÉRMICAS A ELEMENTOS ENVOLVENTES DE LA VIVIENDA CONTENIDAS EN LA RT.							VENTANAS % Máximo de ventanas respecto a paramentos verticales de la envoltente		
ZONA TÉRMICA	TECHUMBRE		MUROS		PISOS		VIDRIO MONOLÍTICO	DOBLE VIDRIADO HERMÉTICO	
	U W/m²K	Rt m²K/W	U W/m²K	Rt m²K/W	U W/m²K	Rt m²K/W		3,6 W/m²K ≥ U ≥ 2,4 W/m²K	U ≤ 2,4 W/m²K
1	0,84	1,19	4,0	0,25	3,60	0,28	50%	60%	80%
2	0,60	1,67	3,0	0,33	0,87	1,15	40%	60%	80%
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,70	1,43	25%	60%	80%
4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,60	1,67	21%	60%	75%
5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,50	2,00	18%	51%	70%
6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56	14%	37%	55%
7	0,25	4,00	0,6	1,67	0,32	3,13	12%	26%	37%

Fuente: (Bustamante, 2009) (MINVU, 2018c)

La historia de la normativa de acondicionamiento térmico de edificios en Chile consta de tres etapas que pueden describirse a partir de la Fig. 3.12. El MINVU impulsó en el 1994 una política de mejoramiento de la calidad y de los estándares de construcción, definiendo un plan que consideraba tres etapas en lo que respecta a la habitabilidad de las viviendas. La primera etapa relativa a la exigencia reglamentaria de aislamiento térmico de los complejos de techumbre.

Una segunda etapa, correspondiente a la envolvente de la vivienda – pisos, muros y ventanas –. Este último derivó de un estudio del Instituto de la Construcción quién presentó al MINVU dos propuestas de exigencia para transmitancias, propuestas A y B, siendo esta última mucho más restrictiva con el objeto de incrementar significativamente los estándares de las viviendas de la época (ver Tabla 24). Por último, una tercera etapa, referente a la certificación del comportamiento térmico global de las viviendas, en el cual se suscribe el Sistema de Calificación energéticas de Viviendas SCEV, vigente desde el año 2013 pero con carácter voluntario.

Las exigencias de transmitancias para la primera etapa fueron incorporadas a la OGUC en el año 2000 sin mayores complicaciones, puesto que las empresas de materiales de construcción no se verían afectadas al incorporar aislamiento a los complejos de techumbre, por el contrario, por un lado la sociedad se vería beneficiada al aumentar el confort térmico y, por otro, activaría la industria de los aislantes térmicos. Contrariamente, no sucedió lo mismo en la segunda etapa, en especial respecto de la propuesta B (ver Tabla 24) presentada por el Instituto de la Construcción, pues se dejaría de utilizar la albañilería en las zonas más pobladas y de mayor construcción. Esto derivó en una presión importante por parte de la industria del cemento y del ladrillo (Industrias Princesa Ltda., Cerámicas Santiago S.A., Cementos Polpaico S.A., Cementos Bio Bio S.A., Cementos Melón S.A. e INDALUM S.A.).

De este modo, la industria de materiales, en especial la Asociación de productores de Cemento (APROCEM), argumentaron que la implementación de la propuesta B no era viable debido al elevado costo de inversión y, a que la reglamentación térmica se debía basar en estándares cercanos a la realidad particular de cada país y no a patrones de economías desarrolladas, y que ésta sería un aporte para el país siempre y cuando la propuesta fuera realista y prudente, de modo que no se generen alzas significativas en los costos de construcción.

Frente al escenario precedente, el MINVU aceptó regular en función de la propuesta A, propuesta menos restrictiva y que está vigente desde el 4 de enero del 2007. Consecuentemente, las restricciones normativas vigentes para la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente de viviendas chilenas no propician la eficiencia energética, alcanzando escasamente habitabilidad (H. Hernández, 2009).

Fig. 3.12 Etapas de la reglamentación térmica en Chile. Fuente: (Blender, 2015)

Tabla 24. Exigencias propuestas para distintos sistemas constructivos en la segunda etapa de la reglamentación térmica chilena.

Sistema Constructivo	Opción A	Opción B
Hormigón Armado	Se podrá utilizar sin modificaciones en la zona 1. Se debe mejorar en la zona 2 y considera incorporar aislación térmica desde la zona 3 a la 7.	Se podrá utilizar sin modificaciones sólo en la zona 1 y se debe incorporar aislación térmica desde la zona 2 a la 7.
Albañilería de ladrillo cerámico	Se considera utilizar desde la zona 1 a la 3, inclusive, la albañilería habitual, con un coeficiente U igual a $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, con mejoramientos para las zonas 4 y 5. En el caso de las zonas 6 y 7, se propone incorporar aislación térmica.	Sólo se podrá utilizar la albañilería habitual en la zona 1, y se propone realizar mejoras en la zona 2. Para las zonas 3 y 7 se propone incorporar aislación térmica.
Estructuras de madera o perfil metálico	En las zonas 1 y 2, no se considera utilizar estructuras con aislación térmica. Para el resto de las zonas se debe incorporar aislación térmica.	Contempla utilizar aislación térmica en las zonas 2 a 7. La zona 1 no requiere aislación.
Respecto de las puertas, éstas deberán tener en todas las zonas térmicas un coeficiente de transmitancia térmica máximo de $3 \text{ W/m}^2\text{K}$. En el caso de las puertas de vidrio, se considerarán como superficies de ventana sólo en la parte correspondiente al vidrio.		

Fuente: (H. Hernández, 2009)

Independiente de la postura u opinión que se pueda tener sobre las políticas y normativas que regulan en Chile lo relativo a eficiencia energética y habitabilidad, sí se puede decir que existen claros indicios de una tendencia al mejoramiento. Ejemplo son los esfuerzos depositados en el mejoramiento y actualización del SCEV (MINVU, 2018a), la elaboración de la “Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social” (Bustamante, 2009), la elaboración de los “Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile” (MINVU, 2016) y la propuesta de cambio normativo denominada Norma NTM 011/2 2014 “Requisitos y mecanismos de

acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 2: Comportamiento higrotérmico” disponible desde el año 2014 (MINVU, 2014a) (perteneciente a la propuesta NTM 11 mostrada en la Fig. 3.12). Aspectos de la propuesta de norma NTM 011/2 2014 han sido incorporados en el “tomo II – Energía” de los “Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile” como marco de referencia. Lo anterior evidencia la necesidad de actualizar la reglamentación térmica vigente en Chile (MINVU, 2016).

La propuesta NTM 011/2 2014 modifica las zonas térmicas existentes, donde deja de primar el grado/día y pasa a ser relevante el clima. Definiéndose zonas desde la “A” a la “I” (9 Zonas), acercándose lo que define la NCh1079/2008 en cuanto a diferenciar las zonas costeras del país con zonas ubicadas entre éstas y la cordillera de Los Andes. La Fig. 3.13 muestra la distribución de las nuevas zonas propuestas sobre las vigentes en la OGUC. Las Tabla 25 y Tabla 26 muestran las transmitancias exigidas por la propuesta NTM 011/2 2014 para los elementos de envolvente. Del estudio de las tablas previas, se evidencia cómo algunas transmitancias térmicas se ajustan a las propuestas en la NCh1079/2008. El contraste de la propuesta normativa NTM 011/2 2014 y la vigente se abordará a partir de un caso de estudio en el apartado 6.2 “Caso 2: Eficiencia energética en una vivienda social – Análisis de mejoras en aislamiento térmico a partir de la reglamentación térmica” más adelante.

Fig. 3.13 Zonificación térmica propuesta por NTM 011/2/2014. Fuente: (MINVU, 2014a)

Tabla 25. Transmitancias térmicas para elementos de envolvente en NTM 011/2/2014.

ZONA TÉRMICA	COMPLEJO DE TECHUMBRE		COMPLEJO DE MURO		COMPLEJO DE PISO		COMPLEJO DE PUERTA	
	U	Rt	U	Rt	U	Rt	U	Rt
	W/(m ² K)	(m ² K)/W	W/(m ² K)	(m ² K)/W	W/(m ² K)	(m ² K)/W	W/(m ² K)	(m ² K)/W
A	0,84	1,19	2,10	0,48	3,60	0,28	---	---
B	0,47	2,13	0,50	2,00	0,70	1,43	1,00	1,00
C	0,47	2,13	0,80	1,25	0,87	1,15	1,20	0,83
D	0,38	2,63	0,60	1,67	0,70	1,43	1,20	0,83
E	0,33	3,03	0,50	2,00	0,60	1,67	1,00	1,00
F	0,28	3,57	0,45	2,22	0,50	2,00	1,00	1,00
G	0,25	4,00	0,30	3,33	0,32	3,13	1,00	1,00
H	0,28	3,57	0,40	2,50	0,39	2,56	0,80	1,25
I	0,25	4,00	0,35	2,86	0,32	3,13	0,80	1,25

Fuente: (MINVU, 2014a)

Tabla 26. Limitación de proporción de ventanas por orientación en orden al valor de U.

ZONA TÉRMICA	U > 3,6 W/(m ² K)				3,6 ≥ U > 2,4 W/(m ² K)				U ≤ 2,4 W/(m ² K)			
	N	S	O-P	POND	N	S	O-P	POND	N	S	O-P	POND
A	70%	45%	60%	30%	90%	65%	80%	40%	100%	100%	100%	-
B	30%	10%	25%	12%	85%	40%	65%	32%	95%	60%	85%	40%
C	40%	15%	35%	15%	80%	50%	60%	30%	95%	65%	85%	40%
D	25%	10%	15%	10%	70%	30%	60%	27%	90%	50%	80%	37%
E	0%	0%	0%	-	70%	25%	55%	25%	90%	45%	80%	37%
F	0%	0%	0%	-	60%	20%	37%	20%	85%	40%	75%	35%
G	0%	0%	0%	-	35%	10%	20%	10%	65%	20%	35%	20%
H	0%	0%	0%	-	55%	15%	30%	15%	75%	25%	60%	27%
I	0%	0%	0%	-	35%	10%	20%	10%	65%	20%	35%	20%

Fuente: (MINVU, 2014a)

3.5. Vivienda en Chile, tipologías y desempeños.

3.5.1. Datos estadísticos y tipologías de viviendas chilenas

Según el último censo, el número de viviendas en Chile asciende 6.499.355 unidades, de las cuales el 79,51% corresponden a “casa” (vivienda permanente con entrada directa desde la calle, jardín o terreno), 17,5% a “departamento” (vivienda ubicada en un edificio, que cuenta con una entrada independiente desde un pasillo, escala u otro espacio común) y 2,98% a otros tipos (viviendas que no se pueden clasificar como casa o departamento, por ejemplo viviendas indígenas, chozas, mediaguas, entre otras). La distribución de estos tipos por región se aprecia en la Fig. 3.14, se observa que la región metropolitana concentra el 36,6% de las viviendas en Chile, seguidas por Valparaíso (12,14%) y BioBío (8,83%). Dada la distribución de viviendas en la Fig. 3.14 y la base de datos para climas chilenos en formato .epw, viviendas en la ciudad de Antofagasta, en la ciudad de Santiago y en la ciudad de Concepción (Biobío), representan las ciudades más pobladas conforme a las zonas NL (norte litoral), CI (Central interior) y SL (Sur litoral) definidas en la Tabla 21. Estas ciudades servirán de referencia para modelar el caso de estudio definido en el apartado 6.3.

La Fig. 3.16 muestra que la albañilería es la solución constructiva más frecuente para los muros en viviendas chilenas (45%), seguida por las tabiquerías (estructuradas generalmente en madera, 30%) y luego el hormigón armado (22%). Estas soluciones representan el 97% de las tipologías en muros de viviendas chilenas. En relación a su distribución de norte a sur, ver Fig. 3.15, se evidencia que la albañilería y el hormigón predominan en las zonas central y norte y, por el sur, predominan las soluciones en tabiquería. En relación al número de dormitorios, se evidencia que la mayoría presenta 2 o 3 dormitorios (Ver Fig. 3.17). Sin embargo, cabe destacar que en el 25,7% de las viviendas con 2 dormitorios viven más de 4 personas y, en el 22,4% de las viviendas con 3 dormitorios viven más de 5 personas (INE, 2017).

Fig. 3.14 Distribución de viviendas de norte a sur en Chile. Fuente: (INE, 2017)

Fig. 3.15 Distribución de materialidades en muros de norte a sur en Chile. Fuente: (INE, 2017)

Fig. 3.16 Materialidad de muros en viviendas chilenas. Fuente: (INE, 2017)

Fig. 3.17 Número de dormitorios en viviendas chilenas. Fuente: (INE, 2017)

Por otro lado, el estudio “Estudio de Usos Finales y Curva de Oferta de la Conservación de la Energía en el Sector Residencial” (CDT, 2010) destaca otros parámetros de interés sobre las viviendas chilenas que no pueden rescatarse de último censo en Chile (2017). Estos son:

- e. En base a una encuestas que considera 3220 casos y una estimación de viviendas igual a 5.261.252 unidades el año 2010, se determinó que, de acuerdo con el al año de construcción, el 86% de las viviendas se construyeron antes de la entrada en vigencia y posible aplicación de la primera reglamentación térmica (año 2000, ver Fig. 3.12 más atrás). Es

decir, un volumen aproximado de 4,8 millones de viviendas podrían no cumplir con la reglamentación vigente. Es decir, aproximadamente el 74% de las viviendas actuales.

- f. Las tipologías de viviendas más frecuentes en Chile son pareadas (38,7%) y aisladas (37,8%), seguidas por departamentos (14,1%, algo menor al 17,5% del censo 2017) y en menor proporción las casa en fila (9,4%). Donde el 72,5% están configuradas en un primer piso. Las características de estas tipologías y sus características en relación a las pérdidas de calor se muestran en la Tabla 27.
- g. El 78% de las viviendas construidas en Chile presentan superficies entre 36-100 m², con un promedio nacional de 77m².
- h. Conforme al factor expansión para el estudio muestral realizado a la población real de las viviendas de las siete zonas térmicas, se distribuyó un 43,5% de la proporción de viviendas para la zona 3, un 18,4% para la zona 4, un 14,5% para la zona 2, un 8,6% para la zona 5, un 8,3% para la zona 1, un 4,2% para la zona 6 y, finalmente, un 1,9% para la zona 7. Es decir, aproximadamente $\frac{3}{4}$ de las viviendas se encuentran en las zonas térmicas 2,3 y 4.

Tabla 27. Tipologías de viviendas chilenas y sus características en relación a las pérdidas de calor.

Tipo	Características	
Vivienda aislada	No comparte ninguno de sus lados con otra vivienda. Las pérdidas de calor hacia el ambiente se producen por las caras expuestas al exterior: 4 fachadas de muro, suelo y techo.
Vivienda pareada	Comparte un lado con otra vivienda, sin tener pérdida de calor por el pareo. Las pérdidas de calor hacia el ambiente se producen por las caras expuestas al exterior: 3 fachadas de muro, suelo y techo.
Vivienda en fila	Comparte ambos lados con otra vivienda, sin tener pérdida de calor en 2 muros por el pareo. Las pérdidas de calor hacia el ambiente se producen por las caras expuestas al exterior: 2 fachadas de muro, suelo y techo.
Departamento	Tipo departamento, de acuerdo al número de fachadas expuestas al exterior se tienen distintos casos de pérdidas de calor hacia el ambiente: A: posee 2 caras expuestas al exterior (techo y muro) B: posee 3 caras expuestas al exterior (techo y 2 muros) C: posee 1 cara expuesta al exterior (muro) D: posee 2 caras expuestas al exterior (2 muros) E: posee 2 caras expuestas al exterior (piso y muro) F: posee 3 caras expuestas al exterior (piso y 2 muros)

Fuente: (Ortega, 2017)

3.5.2. Parámetros de demanda para calefacción y refrigeración de viviendas chilenas

La Tabla 28 muestra los resultados de demanda para calefacción y refrigeración en cuatro proyectos habitacionales estudiados por Fundación Chile que cumplen con la actual reglamentación vigente. Estos resultados pueden servir de referencia, conforme a la Fig. 3.14, para ejemplificar las demandas de edificios habitacionales ubicados en las regiones con mayor número de viviendas en Chile. El proyecto P1 corresponde a dos torres de 19 y 14 pisos respectivamente, con superficies de departamentos entre 32 a 83m². El proyecto P2 corresponde a dos torres de 25 y 19 pisos con departamentos de superficie entre 55 y 83m². El proyecto P3 corresponde a una torre de 21 pisos con departamentos entre 37 y 85m² y, el proyecto P4 corresponde a un edificio de 5 pisos con superficies por departamento de 204m². Se puede apreciar que las demandas de energía para calefaccionar y refrigerar van desde los 31 kWh/m² año a los 176 kWh/m² año, por lo que se trata de edificios convencionales (CEB), pues se trata de energía secundaria y considera solo al demanda para refrigerar y calefaccionar los espacios habitacionales. Por otro lado, si se considera la demanda solo para calefacción en Santiago cercana a 80 kWh/m² año y los factores de emisión en Tabla 2 (pág. 48) para electricidad, se podría estimar una emisión de 33,5 kgCO₂eq al año. Otro aspecto a estacar es la variabilidad que presentan las demandas, lo que sin duda se debe a las posibles disposiciones de cada departamento dentro del edificio de acuerdo a lo que se muestra en la Tabla 27 (será distinto un departamento intermedio que uno expuesto por 3 caras en cualquier extremos superior del edificio) y a las diferentes exposiciones climáticas, por ejemplo, al viento y al sol (a radiación por el sur no será igual que por el norte, por ejemplo). Lógicamente, aquellos departamentos más protegidos, como es el caso de los departamentos intermedios, presentarán un mejor comportamiento térmico, llegando a requerir hasta un cuarto de la energía de un departamento similar con piso ventilado para la localidad de Santiago (Ver Fig. 3.18)

Tabla 28. Demandas para calefacción y enfriamiento en 4 edificios chilenos.

Proyecto habitacional	Ciudad	Calefacción		Enfriamiento	
		[kWh/m ² año]		[kWh/m ² año]	
		Promedio	Rango	Promedio	Rango
P1	Santiago (Región Metropolitana)	56	31 - 123	10	5-19
P2	Santiago (Región Metropolitana)	80	71-125	38	28-51
P3	Concepción (Región Biobío)	80	56-97	8	2-11
P4	Valparaíso (Región Valparaíso)	91	80-104	2	1-4

Fuente: (H. Hernández, 2009)

Fig. 3.18. Contraste de demanda para calefacción en departamentos semejantes dentro de un mismo edificio. Fuente: (H. Hernández, 2009)

Otros antecedentes importantes a considerar sobre la demanda para calefaccionar espacios habitacionales, pues consideraron las características de las $\frac{3}{4}$ de la edificación en Chile, son los estudios solicitados por el Instituto de la Construcción a distintas entidades de investigación para generar los fundamentos técnicos de la segunda etapa de la reglamentación térmica chilena. Entre estas entidades se encontraban el DECON de la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Universidad de Concepción. Estos estudios iniciaron por reconocer las tipologías de las viviendas a partir de la zonificación térmica definida en la Tabla 23. Para esto tomaron los registros del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y de los permisos de construcción entre los años 1994 y 1998,

caracterizando un total de 659.429 viviendas. Las viviendas se clasificaron de acuerdo a: superficie (m^2 construidos), n° de pisos, clasificación de construcción según OGUC (desde “A” a “I”, ver Anexo 4) y tipo de agrupación (casa o departamento). Con esta información se definieron 15 tipologías constructivas que representaban el 74% de las viviendas del país (ver Tabla 29). Donde las construcciones de albañilería y madera (tipos C y E) fueron las materialidades más frecuentes, aproximadamente el 68% de la construcción nacional (ver Anexo 5).

Posteriormente se encargó al DECON analizar cinco permisos de edificación reales, en alrededor de 24 comunas, para cada una de estas tipologías y para cada zonificación térmica. Esta información fue tomada por la Universidad de Concepción para establecer las demandas energéticas a partir de simulaciones computacionales, para lo cual trabajaron con un diseño virtual promedio para cada una de estas tipologías. Este diseño promedio se simuló para 4 orientaciones geográficas (N, S, E y O) tomando como temperatura base 20°C para el día y 17°C para la noche. Los resultados obtenidos de demanda energética anual en kWh/m^2 para cada una de estas tipologías y para cada zona térmica se muestran en Tabla 29.

Los resultados promedios evidencian que la demanda de energía para calefaccionar aumenta de norte a sur y, lo que resulta obvio, también aumenta a mayor grado/día. También que los edificios departamentos demandan menos energía, producto que en promedio las unidades habitacionales presentan menos caras expuestas al exterior en contraste a una vivienda aislada. Consecuentemente, los rangos de demanda promedio para calefaccionar van desde los 21kWh/m^2 a 316kWh/m^2 al año; con un promedio ponderado, de acuerdo al número de viviendas por tipo en Anexo 5, igual a 144kWh/m^2 . Indicador que puede ser asociado rápidamente a viviendas convencionales (CEB).

Tabla 29. Demandas de energía para calefaccionar en viviendas chilenas por zona térmica.

<i>Tipologías</i>		<i>Z1</i>	<i>Z2</i>	<i>Z3</i>	<i>Z4</i>	<i>Z5</i>	<i>Z6</i>	<i>Z7</i>
T01	CA 1P<50 C	26	80	110	154	169	204	358
T02	CA 2P<50 C	27	84	116	163	179	216	376
T03	CA 1P<50 E	17	58	87	118	131	152	277
T04	DE 3P<50 C	19	66	97	133	151	181	325
T05	CA 1P<100 C	24	80	111	153	172	206	365
T06	CA 2P<100 C	24	81	108	152	169	202	349
T07	CA 2P<50 E	15	46	65	91	100	120	215
T08	CA 2P<100 CE	20	65	93	125	141	168	301
T09	DE 11-15P<100 B	14	50	73	101	115	138	253
T10	DE 6-10P<100 B	8	32	51	67	80	95	181
T11	CA 2P<50 CE	28	82	111	158	172	208	361
T12	CA 1P<100 E	42	116	154	226	238	287	494
T13	DE 5P<100 B	17	62	92	125	143	170	309
T14	DE 3P<100 C	15	50	74	102	115	138	251
T15	CA 2P<140 CE	20	66	97	133	150	178	323
PROMEDIOS		21	68	96	133	148	178	316
Nomenclatura tipologías: Casa o Departamento/Nº de pisos/<superficie máxima en m ² / tipología según OGUC.								

Fuente: (H. Hernández, 2009)

De acuerdo a los datos previos y a los evidenciados en el apartado 2.5.4 más atrás las viviendas chilenas no presentan parámetros de transmitancia térmica adecuados para garantizar eficiencia energética. Lo que evidencia la necesidad de cambios normativos urgentes para responder a las nuevas políticas energéticas para Chile. Las que buscan conseguir al año 2050 que la generación eléctrica provenga en gran parte de energías renovables (>70%) y, que el 100% de las nuevas edificaciones presenten altos estándares de construcción eficiente y que cuenten con sistemas de control de energía (Ministerio de Energía, 2015). Frente esto, los “Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile” (Tomo II-Energía) establecen cuáles debieran ser las demandas de calefacción y refrigeración al 2050 para conseguir estos objetivos. Metas que se adaptan a viviendas LEB, conforme a lo establecido en el apartado 2.5.4 más atrás, y las zonificaciones térmicas propuestas por la NTM 011/2 2014 (ver Fig. 3.13 y Tabla 30).

Tabla 30. Requerimientos máximos de energía para calefacción y enfriamiento para zonas térmicas propuestas por la NTM 011/2 2014.

a) REQUERIMIENTOS MÁXIMOS DE DEMANDA EN CALEFACCIÓN PARA VIVIENDA POR ZONA:

ZONAS TÉRMICAS	DEMANDA DE CALEFACCIÓN (kwh/m ²)			
	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

b) REQUERIMIENTOS MÁXIMOS DE DEMANDA EN ENFRIAMIENTO PARA VIVIENDA AISLADA POR ZONA:

ZONAS TÉRMICAS	DEMANDA DE ENFRIAMIENTO (kwh/m ²)			
	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

Fuente: (MINVU, 2016)

3.6. Vivienda social chilena y su desempeño térmico

La vivienda social chilena no está ajena a la realidad expuesta previamente. Sin embargo, hay aspectos que se alejan de los promedios nacionales, por ejemplo, los metros cuadrados de construcción (más pequeñas en promedio) y el tipo de familia a la que responden. Estas viviendas dan respuesta habitacional a las familias más vulnerables del país, cuyo desarrollo y crecimiento se concreta alejado de las áreas céntricas (Borsdorf et al., 2016). Se trata de hogares que en general no se refrigeran en verano, pero que sí se calefaccionan en invierno y, donde las temperaturas en los meses más fríos pueden llegar a ser de 2°C más bajas que en el centro de las ciudades debido al efecto isla de calor (Sarricolea & Martín-Vide, 2014). Son estos barrios, con las familias de menores ingresos, los que exhiben los peores estándares urbanos (CIS, 2015) (Cáceres-Seguel, 2017)

Se puede entender como vivienda social aquella de carácter permanente y cuya construcción da respuesta a la necesidad habitacional de aquellas familias más vulnerables del país y que, en general, es financiada por subsidios del gobierno. En términos concretos, la Contraloría General de la República de Chile, en los dictámenes 58261/2007 y 44279/2011, establece que las viviendas sociales deberán cumplir con todos y cada uno de los siguientes requisitos para ser consideradas como tales (H. Hernández, 2017):

- a) Que se construya conforme al D.F.L. N° 2, de 1959
- b) Que la superficie edificada no sea superior a los 140 m²
- c) Que reúna los requisitos, características y condiciones que determine el Reglamento Especial de Viviendas Económicas, contenido en la OGUC (Título 6, Capítulo 1, Art. 6.1.2);
- d) Que tenga carácter definitivo
- e) Que esté destinada a resolver los problemas de la marginalidad habitacional
- f) Que sea financiada con recursos públicos o privados
- g) Que su valor de tasación no sea superior a 400UF (Una UF equivale a \$27.579,51 al 12/04/2019. \$747,62 equivale 1 euro al 12/04/2019), salvo que se trate de

condominios de viviendas sociales en cuyo caso podrá incrementarse dicho valor hasta en un 30% (520 UF), y h) Que cumpla las características técnicas de urbanización y de equipamiento que señalen los reglamentos que dicte el Presidente de la República por intermedio del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU)

i) Que su Carácter de vivienda Social sea certificado por el Director de Obras Municipales.

De acuerdo al punto b) una vivienda social podría superar el promedio nacional (77m^2), sin embargo, esto es poco probable debido a los costos establecidos por el MINVU para las edificaciones. Que para la albañilería ronda entre las 12UF (calidad superior) y 5UF (media inferior) (MINVU, 2019), es decir, no se podrían alcanzar los 140m^2 .

Investigaciones en torno a la viviendas social chilena muestran rangos de superficies que van desde los 22 a 62m^2 . La vivienda social en Santiago de Chile, entre los periodos 1980- 2002, presentó superficies que variaron entre 22m^2 (pareada) y $58,1\text{m}^2$ (en fila). En ese mismo periodo se instalaron y construyeron en el Gran Santiago aproximadamente 203.236 unidades con una media simple de aproximadamente $40,9\text{m}^2$ para los casos con los que se contó con información (Tapia, 2011). En general, y sin alejarse mucho de la realidad, se puede considerar que la vivienda social chilena ronda los 50m^2 , que presenta un baño, una cocina, un living comedor y dos dormitorios (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Bustamante et al., 2013) (Tapia, 2011) (Senado de Chile, 2019).

De acuerdo al punto g), una restricción importante en la vivienda social para lograr eficiencia energética, a nivel de viviendas LEB, pareciera ser su costo máximo. Pues la vivienda social, que podría alcanzar un valor cercano a los 19 mil euros aproximadamente, se ve limitada en la definición de tecnologías de eficiencia energética de alto costo por metro cuadrado. En este contexto, las viviendas sociales suelen utilizar vidriado monolítico que presentan una alta transmitancia térmica ($U=5,8\text{ W/m}^2\text{K}$) en lugar de vidriado doble de baja emisividad debido al elevado costo relativo de estos últimos. Esto hace que se fugue una proporción importante de energía por las ventanas, las que además suelen presentar problemas de condensación durante el invierno (H. Hernández, 2017). A modo de referencia, un caso de estudio en

Europa que incorporó mejoras en la envolvente de una vivienda (mayor aislación, vidriado triple, entre otros) para conseguir eficiencia energética a nivel de edificaciones LEB, necesitó de 13,23UF por metro cuadrado de construcción aproximadamente (488 euros por m² aproximadamente) (Mohammadpourkarbasi & Sharples, 2013). Es decir, si se considera una vivienda social que ronde los 50m², se necesitarían de 662UF aproximadamente para replicar este reacondicionamiento, valor que supera el costo de construcción de la vivienda social y, por tanto, evidencia el alto costo de oportunidad de un reacondicionamiento para lograr una clasificación LEB (dejar de construir una vivienda).

En consecuencia, mejorar el desempeño de las viviendas sociales presenta un costo de oportunidad importante para las familias vulnerables del país, lo que ha sido abordado por el gobierno a través de subsidios complementarios que buscan mejorar el desempeño térmico estas viviendas (Herrera, 2019). Algunos autores sugieren mejorar el aislamiento de los muros; por ejemplo, en base a una vivienda social tipo pareada de un piso y vidriado simple, la Tabla 31 muestra las demandas de energía para calefaccionar promedio para cuatro tipos muros al incorporase aislante térmico.

Los ingresos de los hogares a menudo se correlacionan positivamente con el consumo de energía, lo que podría aumentar las probabilidades de que una familia invierta en tecnologías de eficiencia energética. Sin embargo, estas capacidades pueden estar lejos del grupo de familias vulnerables cuyo ingreso autónomo es significativamente menor al del promedio chileno (Bunster & Noguchi, 2015). En este contexto, viviendas que presentan bajo desempeño energético y bajos ingresos familiare (Suelo mínimo en Chile es de aproximadamente 403 euros al 12/04/2019) resultan en pobreza de combustible para calefaccionar en invierno debido al alto costo de oportunidad que presenta su gasto. Carencia que se refleja en la falta de ventilación de los espacios para conservar el calor producido al interior de la vivienda, lo que disminuye la calidad del aire interior y genera problemas derivados de la condensación del vapor de agua (hongos, moho, etc.), disminuyendo la habitabilidad de la vivienda y aumentando los riesgo de enfermedades invernales (CDT, 2012).

Tabla 31. Disminución de la demanda de energía (en kWh/m² año) para calefaccionar promedio en vivienda social de 1 piso al agregar aislante térmico en 4 tipos de muro.

CIUDAD	U base W/m ² °C	BASE (U de acuerdo a RT)	+20mm U medio 1,2W/m ² °C	+40mm U medio 0,7W/m ² °C	+60mm U medio 0,6W/m ² °C	+80mm U medio 0,5W/m ² °C	+100mm U medio 0,4W/m ² °C	+120mm U medio 0,3W/m ² °C
Calama	3,0	123	102	97	95			
Copiapó	4,0	59	45	44	43			
Valparaíso	3,0	80	67	64	62			
Santiago	1,9	100	90	85	83	81		
Concepción	1,7	115	108	103	101	99		
Temuco	1,6	131	126	120	118	116		
Punta Arenas	0,6	185			184	181	179	177
El Teniente	0,6	153			152	150	148	147

Fuente: (Bustamante, 2009)

La Tabla 32 muestra valores de demandas de energía para calefaccionar viviendas sociales, en los meses más fríos del año (6 meses), para algunas ciudades de Chile conforme a las zonificaciones climáticas definidas en Tabla 21 y las tipologías establecidas en Tabla 27. Los promedios han sido determinados a partir de la distribución de los tipos de vivienda en Chile, provistos en el apartado 3.5.1 más atrás. Esto muestra que un valor igual a 112kWh/m² al año representa la demanda promedio de energía para calefaccionar una vivienda social en Chile, donde las menores demandas se producen en la zona climática NL (Norte Litoral), valores intermedios en la zona climática CI (Central Interior) y, mayores demandas en la zona climática SE (Sur extremo).

Tabla 32. Demanda para calefacción de viviendas sociales en meses más fríos del año.

Clima	NL	NVT	ND	CL	CI	SL	SI	SL	SE
Ciudad	Arica	Copiapó	Calama	Valparaíso	Santiago	Concepción	Temuco	Valdivia	Punta Arenas
1 piso aislada (37,8%)	10	56	132	82	100	120	136	138	272
1 piso pareada (38,7%)	9	50	123	75	93	113	130	133	260
1 piso en fila (9,4%)	7	45	115	71	87	107	125	128	252
Promedio ponderado	9	52	126	78	95	115	132	135	264

Fuente: Adaptada de (Bustamante et al., 2013), original en Anexo 6.

Las emisiones derivadas de las necesidades de calefacción en viviendas sociales dependen de la naturaleza de los combustibles (leña, parafina, gas licuado, electricidad, otros), del rendimiento de los sistemas y de los factores de paso considerados. Un estudio en una vivienda social tipo muestra que las emisiones rondan entre los 129,3 kgCO₂eq/m² año para leña, seguido de 73,8 kgCO₂eq/m² para

parafina y 51,7 kgCO₂eq/m² para electricidad en la Zona 3 (Taivo, 2015), zona donde se encuentra ubicada la Santiago, ciudad que concentra la mayor cantidad de viviendas sociales (Tapia, 2011).

En torno a la sensación térmica de confort, un estudio en tres conjuntos de viviendas sociales determinó que sus habitantes durante el invierno, en viviendas de dos piso, perciben el primer piso como “frío” y el segundo piso como “cálido”, mientras que en verano el primer piso es considerado como “fresco” y el segundo piso como “caliente”. Indicando problemas de sensación térmica debido a la baja inercia térmica en la vivienda y la falta de estrategias de ventilación ideadas en la etapa de diseño (Espinosa & Fuentes, 2015) (Bustamante, 2009). Aspectos de confort térmico en una vivienda social aislada de un piso serán evidenciados en los casos de estudio presentados en los títulos 6.2 y 6.3 más adelante. Los que ratifican lo planteado por diversos estudios respecto a que las viviendas sociales chilenas carecen de estándares mínimos para garantizar una adecuado nivel de confort térmico durante las estaciones frías (Bunster & Noguchi, 2015).

En torno a los gastos en calefacción, resulta lógico pensar que al sur del país estos aumentan, de ahí la preferencia de la leña que presenta un menor precio por kWh conforme a la Tabla 6 más atrás. Esto se evidencia en las Fig. 3.19 y Fig. 3.20, donde en las ciudades del sur de Chile aumenta la declaración de consumo de leña y la cantidad consumida en kg, mostrando congruencia con lo planteado a nivel nacional en las Fig. 2.35 y Fig. 2.36 dentro del apartado 2.3.4 0 más atrás. En Santiago el consumo de leña es muy bajo (básicamente debido a la restricción que presenta su uso en una ciudad altamente contaminada) y predomina el uso del gas seguido de la parafina (CDT, 2015c)(Espinosa & Fuentes, 2015).

Por otro lado, a partir de encuestas realizadas a moradores de viviendas sociales en Santiago, se evidenció una disposición de pago para calefaccionar de aproximadamente \$16.500 al mes. Estimación a partir de la declaración del gasto promedio en calefacción de hogares en tres conjuntos habitacionales, independiente del tipo de combustible utilizado (Espinosa & Fuentes, 2015).

Fig. 3.19 Porcentaje de viviendas que declaran el uso de leña para la calefacción de espacios y el consumo promedio anual en kilogramos por región geográfica. Fuente: (Bunster & Noguchi, 2015)

Fig. 3.20 Porcentaje de viviendas que declaran el uso de leña para la calefacción de espacios y el consumo promedio anual en kilogramos por zona climática. Fuente: (Bunster & Noguchi, 2015)

Bunster y Noguchi (2015) detectaron, para un grupo de estudio en viviendas sociales, que el 33,2% vivía en casas aisladas, el 38,78% vivía en casas pareadas, 10,41% en viviendas en fila y 17,32% en apartamentos sin ascensores (ver estas clasificaciones en Tabla 27). Valores muy cercanos a la distribución para las viviendas a nivel nacional descritas en el apartado 3.5.1 más atrás. Con respecto a la materialidad de las viviendas en el grupo de estudio, los datos analizados mostraron una transición desde la albañilería en las zonas climáticas más cálidas a las estructuradas en madera en las zonas más frías (ver Fig. 3.21). La zona 3, la más poblada del país, mostró una fuerte prevalencia de la albañilería con el 94,5% de los

casos; mientras que en las zonas 5, 6 y 7 (con mayores gradientes térmicos) prevalece la construcción de muros estructurados en madera. Otras técnicas de construcción, como el adobe y el hormigón armado, que generalmente se asocian a construcciones vernáculas y edificios de altura media o alta respectivamente, muestran una proporción reducida de casos en áreas más cálidas. En cuanto a la materialidad de las techumbres, se muestra una fuerte prevalencia en el uso de planchas de acero zincado para la cubierta en todas las zonas climáticas, cuyo diafragma de la techumbre está estructurado en madera (Fig. 3.22). Este uso generalizado podría estar relacionado con la competencia de los constructores y la disponibilidad de estos materiales en los centros de abastecimiento, como también, debido a que se trata materiales económicos, duraderos y fáciles de instalar (Bunster & Noguchi, 2015).

Fig. 3.21 Principales materiales de construcción de muros en viviendas sociales por zona térmica. Fuente: (Bunster & Noguchi, 2015)

Fig. 3.22 Principales materiales de construcción en cubiertas de viviendas sociales por zona térmica. Fuente: (Bunster & Noguchi, 2015)

Por otro lado, considerando las metas en eficiencia energética para viviendas chilenas al año 2050 (que el 100% de las nuevas edificaciones presenten altos estándares de construcción eficiente), que Chile es un país productor de madera importante a nivel mundial y, conocido que la madera presenta un buen desempeño ambiental en contraste con otros materiales de construcción (Ugarte & Acevedo, 2016)(Calkins, 2009); las perspectivas para dar respuesta a las necesidad de viviendas sociales eficientes energéticamente en el futuro, por parte del gobierno y entidades del sector privado, vinculan el uso de la madera como material predominante (Rehbein, 2018). Este interés se refleja a partir de un estudio en una edificación de mediana altura (20 metros y 6 pisos) construido en madera para dar respuesta al déficit habitacional en Chile de modo sustentable y estudiar, a su vez, su desempeño sísmico (CNN Chile, 2019), el comienzo de la producción y uso de paneles de CLT en la construcción de viviendas (Rehbein, 2018) y, las nuevas innovaciones en prefabricación de viviendas sociales con muros estructurados en madera aislados térmicamente, como son los sistemas AIW (All in Wall System), paneles SIP (Structural insulated panel) o VAP (Sistema Viga Aislación Pilar), entre otros (Ochoa, 2018). Estos antecedentes se evidencian en la Fig. 3.23 a la Fig.

3.27. Cabe señalar que la vivienda social mostrada en la Fig. 3.25 será analizada en el apartado 6.1 más adelante.

Fig. 3.23 Edificio de estudio en madera y mediana altura.
Fuente: (CNN Chile, 2019)

Fig. 3.24 CLT usado en la construcción de vivienda chilena. **Fuente:** (Rehbein, 2018)

Fig. 3.25. Vivienda social materializada en panel SIP.
Fuente: (H. Hernández, 2016)

Fig. 3.26 sistema constructivo en madera AIW. **Fuente:** (CORMA, 2019a)

Fig. 3.27 Sistema constructivo VAP (previo al recubrimiento con placas de OSB). **Fuente:** (CORMA, 2019b)

4. EVALUACIÓN DE INVERSIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VIVIENDAS

4.1. Inversiones de eficiencia energética

De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2018), una inversión en eficiencia energética se define como el gasto incremental en nuevos equipos de eficiencia energética o el costo total de las renovaciones que reducen el uso de energía. Costo incremental que debiera justificarse debido a los ahorros en energía derivados de las mejoras. Los gastos en eficiencia energética en el mundo ascienden a 236 mil millones de dólares, donde los edificios constituyen el mayor destino de estos gastos, representando el 59% del total, de los cuales el 28% está destinado a mejorar las envolventes de las edificaciones (mejoramientos en muros, techumbres y ventanas), seguidos por la iluminación (14%), los sistemas de HVAC (12%) y la actualización de electrodomésticos (6%) (Ver Fig. 4.1) (IEA, 2018b). Este nivel de inversiones en eficiencia energética sobre las edificaciones a nivel global, evidencia el reconocimiento del potencial que presentan en la reducción del consumo de energía y de las emisiones de dióxido de carbono al ambiente.

Fig. 4.1 Distribución del gasto mundial en inversiones de eficiencia energética. Fuente: (IEA, 2018b)

La inversión incremental en edificios nuevos o renovados, asociadas a la eficiencia energética, corresponde al cambio en el costo para los servicios (diseño, entrega, instalación, construcción) y los productos (luminaria, electrodomésticos, equipos y materiales) que permite alcanzar un mayor desempeño de eficiencia energética más allá de la inversión requerida para lograr el desempeño mínimo legalmente permitido. Para los tipos de edificios y productos que presentan requisitos legales sobre el desempeño de los edificios, servicios o productos de construcción, este costo corresponde al gasto incremental más allá del necesario para alcanzar los estándares mínimos de desempeño energético, regulaciones de eficiencia energética o códigos de energía del edificio. Para los tipos de edificios y productos que no tienen requisitos de energía, este costo corresponde al gasto incremental en productos o servicios de eficiencia energética más allá de lo que de otro modo se hubiera gastado, que en algunos casos no es gastado. Para la inversión incremental en edificios, lograda debido a la mejora en las políticas de eficiencia energética, este costo corresponde al gasto incremental requerido para alcanzar los nuevos requisitos de desempeño energético más allá del nivel previo para el cual el mercado ya se había adaptado. (IEA, 2018a)

4.2. Evaluación de inversiones de eficiencia energética en edificios

Mitigar el impacto ambiental, responder a nuevos requerimientos de eficiencia en edificaciones, generar condiciones de confort térmico y mejorar las condiciones de habitabilidad de los espacios habitacionales, entre otras razones, justifica la inversión en tecnologías que busquen mejorar el desempeño de la edificación en términos energéticos y medioambientales. Inversiones en tecnologías que a nivel global, según lo planteado previamente, están asociadas principalmente al mejoramiento de las envolventes de las viviendas, seguido por la modernización de los sistemas de iluminación y sistemas HVAC. Bajo este contexto, y a lo planteado en el apartado 2.5 más atrás, la envolvente de la vivienda resulta ser de especial interés en la definición de mejoras para lograr los desempeños de eficiencia energética que permitan mitigar

los efectos del calentamiento global. En lo que, idealmente, se debieran perseguir inversiones que tiendan a lograr edificaciones categorizadas al menos como LEB.

Los ahorros derivados de las mejoras de eficiencia energética en viviendas es algo complejo de estimar. Esto debido principalmente a la dependencia de su estimación con muchas variables. Entre ellas, la severidad climática, la intensidad de uso, las características propias de las edificaciones (envolvente y sistemas de instalaciones), el precio y tipo de energía, entre otras. Los ahorros de energía son el principal input para realizar las evaluaciones económicas de eficiencia energética y la complejidad de su estimación refleja la incertidumbre asociada a los resultados esperados.

Es claro que a mayor severidad climática y a menor desempeño de la vivienda el consumo de energía aumentará, de ahí la importancia en reacondicionar viviendas que no presentan una dotación de rendimiento o desempeño energético adecuado (Energy Performance Endowment EPE). El EPE hace referencia a un amplio rango de atributos (tamaño, compacidad, superficie, etc.) y elementos (componentes, equipamiento, etc.) que tienen un impacto sobre el consumo de energía posterior en el edificio (Verbruggen et al., 2011). Por tanto, las inversiones de eficiencia energética en viviendas lo que buscan es mejorar el EPE; cuyo costo de inversión, costo de capital, gastos operacionales, vida útil, ahorros energéticos, entre otras variables vinculadas a la mejora en EPE, son elementos de entrada a considerar en las evaluaciones económicas de eficiencia energética.

El nivel de inversión en EPE dependerá, entre otras cosas, de la magnitud de la rehabilitación, de la tecnología asociada, de la adaptabilidad de las mejoras a la vivienda y del momento en que se realiza la mejora. En este contexto, una variedad de métodos pueden usarse para evaluar la viabilidad económica de las mejoras en una vivienda. El valor presente neto (Net Present Value NPV), la tasa interna de retorno (Overall Rate of Return ORR), razones de costo-beneficio (Benefit Cost Ratio BCR), el periodo de recuperación descontado (Discounted Payback Period DPP), el costo del ciclo de vida (Life Cycle Cost LCC o Whole Life Cycle Cost WLCC) o un simple periodo de recuperación (Simple Payback Periodo SPP) pueden ser usados para evaluar la factibilidad económica de medidas de mejora en las viviendas. Siendo el NPV la técnica más usada (Ma et al., 2012). Sin embargo, algunos estudios

muestran que las conclusiones basadas en los resultados de estos métodos podrían ser erróneas o engañosas, principalmente por dos razones: Primero, pocos estudios dedican suficiente atención a los beneficios no monetarios y a los costos relacionados con la calidad energética y; la segunda es metodológica, pues hay que considerar la alta irrevocabilidad de las inversiones en EPE y pocos evaluadores están familiarizados con el concepto de irrevocabilidad y su análisis (Verbruggen et al., 2011). Una metodología adecuada debiera, además de considerar los aspectos de irrevocabilidad, considerar el tiempo futuro y la incertidumbre (Verbruggen et al., 2011). Estos aspectos se abordan con mayor detalle a continuación.

4.2.1. Consideraciones para la evaluación de inversiones de eficiencia energética

El tiempo futuro, la incertidumbre y la irrevocabilidad corresponden a una trilogía que, de acuerdo a Verbruggen et al (2011), siempre debe estar presente al momento de evaluar económicamente las inversiones de eficiencia energética en viviendas. El dueño de hogar que desea invertir en una mejora de eficiencia energética, está evaluando una decisión futura, donde por definición el futuro es incierto o desconocido. Esto evidencia los aspectos de “tiempo futuro” e “incertidumbre” asociados a la decisión de invertir en eficiencia energética. Sin embargo, el concepto de “irrevocabilidad” es algo más complejo de identificar y está asociado fuertemente a las características del atributo o de la inversión en eficiencia energética. La Fig. 4.2 muestra, a través de lo que Verbruggen denomina domos de complejidad, la relación entre el desconocimiento o duda (doubt), el tiempo futuro (time) y la irrevocabilidad (irrevocability). A continuación se describe cada uno de ellos para una mejor comprensión de estos conceptos.

Fig. 4.2 Tridimensionalidad para la contextualización de inversiones en eficiencia energética.

Fuente: (Verbruggen, 2012)

a. El tiempo futuro

Cuando el dueño de hogar decide invertir en una mejora de eficiencia energética lo hace mirando hacia el futuro, pues no puede decidir sobre el pasado. Esta decisión, o las repercusiones de esta decisión, pueden tener impactos hoy, mañana o mucho más lejos en el futuro. En el eje “Time” de la Fig. 4.2 se aprecia la graduación del futuro que define Verbruggen, la que va desde años a siglos. En este contexto, tres aspectos son importantes a considerar en la inversión de eficiencia energética vinculadas al “tiempo futuro”:

a) Momento en que se realiza la inversión (hoy, mañana o un año más tarde, o mucho más allá),

b) Horizonte de tiempo de la inversión (vida útil de la inversión) y

c) Costo del capital, es decir, la tasa de descuento aplicada en las evaluaciones económicas basadas en el NPV (Ecuación 22), LCC (Ecuación 23) u otro método.

La Ecuación 22 representa el valor presente neto (NPV) de un proyecto de inversión, donde I_0 representa la inversión hoy de una alternativa A de eficiencia energética (o el Valor Presente de todos los Costos de dicha alternativa, es decir, PVC_A). Inversión que debe ser compensada por el valor presente de todos los beneficios futuros (B_n) que acarree dicha alternativa de inversión (A), es decir, PVB_A . Flujos que son descontados a una tasa d tal que en el límite de aceptación (cuando $I_0 = PVB_A$) el NPV es igual a cero. A partir de esta formulación se evidencia el poder de la tasa descuento d , que al ser positiva y significativa, mostrará valores pequeños para PVB_A en relación a la inversión cuanto más allá se perciban estos beneficios en el horizonte de análisis H . Esto debido al crecimiento exponencial del factor $(1+d)^n$, donde n es el momento del tiempo en que se evidencian los beneficios futuros B_n .

Ecuación 22:
$$NPV = -I_0 + PVB_A; \text{ donde } PVB_A = \sum_{n=1}^H \frac{B_n}{(1+d)^n}$$

En este sentido, y sobre todo en inversiones de eficiencia energética cuyos beneficios se reflejan a mayor plazo, la tasa de descuento d es un parámetro significativo que puede hacer inviable ciertas inversiones ($NPV < 0$) o que el periodo recuperación de la inversión (SPP) sea tardío. En este sentido, para evaluar proyectos con impacto ambiental a largo plazo, se sugiere incorporar tasas de descuento decrecientes para cualquier metodología costo-beneficio (M. L. Weitzman, 1998). De este modo, se propone una tasa “normal baja” real para los primeros 25 años entre 3-5%, una tasa de interés instantáneo de 2% para periodos entre 25 y 75 años y, una tasa de interés instantáneo de 1% para periodos entre 75 años a 300 (M. Weitzman, 1999).

Por otro lado, la Ecuación 23 representa el costo del ciclo de vida, donde IC corresponden a los costos totales iniciales, $\sum$ a la sumatoria desde el año 1 al año hasta el año n (igual a la vida útil de la inversión), OC_t a los costos operacionales en t , d a la tasa de descuento y t el año para el cual se determina el costo de operación. Resulta claro que en soluciones que propendan a un mismo propósito de eficiencia energética, será preferida aquella que presente el menor LCC. Cabe destacar que el NIST (National Institute of Standards and Technology, US) desarrolló un programa denominado BLCC (Building Life Cycle Cost) para proporcionar soporte

computacional para el análisis de inversiones de capital en edificios (El programa está disponible en <https://www.energy.gov/eere/femp/building-life-cycle-cost-programs>).

Ecuación 23:

$$LCC = IC + \sum_{t=1}^n \frac{OC_t}{(1+d)^t}$$

b. El desconocimiento o duda

Verbruggen establece que existe duda (doubt) vinculada al proceso de inversión en edificaciones. Esto asociado a nuestro desconocimiento sobre los eventos que puedan ocurrir y sobre la probabilidad de ocurrencia de estos eventos en el futuro. Estableciendo una línea de duda “doubt” que define tres grados de desconocimiento: riesgo, incertidumbre e ignorancia (ver Fig. 4.2). En este proceso la mayoría del desconocimiento pertenece a la clase más baja, es decir, al riesgo. El riesgo puede ser estudiado y medido para identificar los eventos que puedan tener un impacto sobre el proyecto y su probabilidad de ocurrencia. La incertidumbre proviene de cambios repentinos en los sistemas políticos, sociales, económicos y técnicos que afectan el proyecto del inversionista, eventos que pueden estudiarse pero con muy poca información acerca de sus probabilidades, por ejemplo, cuando el cambio climático propende a cambios drásticos en los precios futuros de los combustibles fósiles y de la red de energización. Por otro lado, la ignorancia es profundamente problemática porque no se pueden pronosticar los eventos futuros y, con mayor razón, tampoco sus probabilidades, por ejemplo, tecnologías futuras o impactos catastróficos provocados por el cambio climático o por accidentes nucleares (Verbruggen, 2012). Así, la línea de duda es graduada a partir del conocimiento que se tenga sobre eventos futuros, considerando la posibilidad de pronosticar el evento y su probabilidad (ver Tabla 33).

Consecuentemente, y en general, es esperable que las modelaciones o evaluaciones de inversiones en eficiencia energética contengan aspectos de riesgo,

menos frecuente aspectos de incertidumbre y, difícilmente aspectos de ignorancia aunque estos eventos afecten las decisiones o los resultados de inversiones en eficiencia.

Tabla 33. Niveles de profundidad de la duda: Riesgo, incertidumbre e ignorancia.

Depth of doubt	Events	Probabilities
Risk	X	X
Uncertainty	X	?
Ignorance	?	–

Fuente: (Verbruggen et al., 2011)

c. La irrevocabilidad

La irrevocabilidad es un atributo de cada decisión, y como su definición revela, es "una asignación irrevocable de recursos" y presenta diferentes grados conforme a la Fig. 4.2. Verbruggen et al (2012) explora el concepto de la irreversibilidad en la economía y muestra que se requiere de una métrica viable para medir los grados de irrevocabilidad. Las métricas factibles se basan en los costos de reversión implícitos en un momento dado en el futuro para "deshacer" una decisión anterior. "Deshacer" se considera factible al aceptar la sustituibilidad de todos los tipos de bienes y valores. Los edificios están hechos de elementos y materiales sustituibles (ventanas, muros, pavimentos, equipamiento, etc.) y deshacer esta asignación pasada de recursos es técnicamente factible a un costo que puede ser estimado. Existe una relación directa entre este costo y los grados de irrevocabilidad. Los que definen una irrevocabilidad débil (flexibilidad), una irrevocabilidad media (rigidez) o una irrevocabilidad fuerte (preclusión). En este último se imposibilitan los cambios, o bien, el deshacer un atributo en una vivienda se imposibilita debido los altos costos de reversión involucrados en la decisión. La Fig. 4.3 muestra la distribución de los costos de reversión, o costos de deshacer una decisión de inversión, en el horizonte de tiempo para los tres grados de irrevocabilidad en una vivienda (la caída de costo en el tiempo guarda relación con la depreciación del activo fijo).

Una irrevocabilidad fuerte (preclusión) es cuando los costos de inversión en el futuro permanecen por encima de los costos iniciales de referencia (el punto de referencia para clasificar la irrevocabilidad es el costo de inversión en el tiempo 0), pero decaen el tiempo. Una irrevocabilidad media (rigidez) es cuando el costo de deshacer es más alto que los costos iniciales en tiempo cero y durante algunos años, pero luego caen por debajo de los costos iniciales. Una irrevocabilidad débil (flexibilidad) es cuando la inversión podría deshacerse a un valor igual o menor que los costos iniciales. El costo de reversión, o deshacer, no solo considera el costo de remoción o demolición de un elemento de la vivienda (cambio en la decisión original), sino también el costo de la inversión si este representa un costo hundido (no se puede revender o transar), el que decae en el tiempo debido a la depreciación de la inversión. Como ejemplos se pueden citar los siguientes: La construcción de un sistema geotérmico que requiera pasar tuberías por debajo de la vivienda que ya está construida presenta una irrevocabilidad fuerte (preclusión), el cambio de ventanas por unas de menor transmitancia térmica o el aislamiento de la techumbre en la vivienda presentan una irrevocabilidad media (rigidez) y, el deshacerse de un equipo que no puede ser revendido pero que no genera costos de remoción en la vivienda presenta una revocabilidad baja (flexibilidad). Cuando no existe costo de remoción de un elemento (suponga también un equipo) y este puede ser reutilizando o vendido al precio inicial pagado o a su valor residual durante su vida útil (valor depreciado), la decisión es totalmente revocable en todo momento y representa la abscisa en el gráfico de la Fig. 4.3. Esto evidencia los beneficios económicos de los prefabricados en edificios que pueden reutilizarse al término de la vida útil, generando beneficios más allá del ahorro de energía. Consecuentemente, si no es considerada la irrevocabilidad en las decisiones de construcción, las consecuencias en el futuro podrían establecer cambios prohibitivos en la vivienda debido a la magnitud de los recursos involucrados en la decisión. Las características de irrevocabilidad en las inversiones de eficiencia energética estimulan la generación inmediata de edificios muy eficientes (LEB o pasivos), en lugar de edificios estándares que obedecen a la construcción convencional (CEB), que en su mayoría son aconsejados sobre la base metodológica convencional del NPV o análisis de costos en el ciclo de vida LCC (Life Cycle Cost) (Verbruggen, 2012).

Fig. 4.3 Costos de reversión sobre el tiempo como medida de irrevocabilidad. Fuente: (Verbruggen, 2012)

4.2.2. Viviendas de bajo EPE (Energy Performance Endowment)

El concepto “Energy Performance Endowment” en una vivienda pone énfasis en la palabra “Endowment” (Dotación o cualidad), y extendiendo el concepto asociado a “Energy Performance” de la Directiva de la UE, es la capacidad incorporada a un edificio (compuesta por atributos, estructuras, instalaciones, equipos, etc.) y que en gran medida determina el uso de energía entregada a la vivienda para cubrir las funciones deseadas por sus ocupantes (Verbruggen, 2012). “Endowment” comprende, por ejemplo, la orientación, la compacidad, elementos de construcción pasiva, el aislamiento y la estanqueidad al aire, las celosías de sombreado, equipos de distribución de calor, sensores, medidores, etc. Esta dotación o cualidad en los edificios permitirá minimizar el uso de los recursos (agua, energía, otros), o bien, gestionar su uso adecuadamente (piense, por ejemplo, en la utilización de un medidor

de consumo inteligente o el cambio en la orientación de las celosías de una ventana en invierno).

La palabra “Endowment” (dotación) está estrechamente vinculada a la inversión de eficiencia energética en una vivienda (incorporar un intercambiador de calor, mejorar el aislamiento en muros, incorporar un colector solar, modernizar ventanas, etc.) y, por tanto, puede presentar diferentes grados de irrevocabilidad conforme al apartado 4.2.1 más atrás. De este modo, y a partir de una clasificación para el EPE, será más sencillo identificar oportunidades de mejora en viviendas con bajo o mediano EPE y, contrariamente, mucho más complejo en viviendas con alto EPE. Ahora bien, esto también dependerá de las variables “tiempo futuro” y “desconocimiento”, pues en el futuro podrán surgir nuevos eventos (antes desconocidos) que harán viable implementar nuevas oportunidades de mejoras en las viviendas pasadas con alto EPE.

Consecuentemente, una vivienda con bajo EPE presenta atributos (tamaño, compacidad, etc.) y elementos (componentes de envolvente, equipamiento, etc.) que exhiben un bajo o inadecuado impacto sobre el consumo energético posterior. Así, una vivienda que exhibe pocas oportunidades de mejoras en eficiencia energética (edificios nZBE o PEB) y otra que presenta muchas oportunidades de mejoras (edificios CEB), podrán definir límites para la graduación del EPE.

4.2.3. Métodos de evaluación de inversiones de eficacia energética en viviendas

El estudio bibliográfico muestra dos métodos usados en las evaluaciones de inversiones en eficiencia energética en viviendas. Uno denominado evaluación convencional o estática y otro denominado modelo secuencial de decisión o dinámico. Estos métodos se abordan a continuación.

a. Evaluación estática o convencional

La evaluación estática es aquella que sustenta la decisión de “invertir ahora o nunca” (escoger o perder) a partir de la metodología del NPV, que sumada a la generación de diferentes escenarios probables evalúa diferentes alternativas de inversión. Así, el futuro es modelado por combinaciones de eventos y acciones, sea por ejemplo, la posible ocurrencia de k diferentes eventos (escenarios) S_i $\{i = 1, \dots, k\}$ y la disponibilidad de m posibles alternativas de inversión en eficiencia energética A_j $\{j = 1, \dots, m\}$ para, por ejemplo, lograr reducir cierta cantidad de energía consumida por una vivienda al año en kWh/m² conforme a diferentes alternativas técnicas viables definidas por una restricción presupuestaria o de otro tipo. De esta manera, se puede determinar el NPV (S_i, A_j) para todas las combinaciones $k \times m$ a partir de la Ecuación 22 y la hoja de cálculo definida en la Tabla 34, o bien, a partir de un modelo probabilístico más sofisticado (Simulación Montecarlo), pues cada escenario tendrá una probabilidad de ocurrencia P_i (Verbruggen et al., 2011). Para esto dos criterios de decisión conservador suelen utilizarse (Kumbaroglu & Madlener, 2012):

1. Maximizando el mínimo NPV de los diferentes escenarios propuestos, haciendo que el mejor de los peores escenarios para cada alternativa sea decidido. Es decir, la decisión será A_j que maximice el mínimo NPV(S_i, A_j) para $i=\{1, \dots, k\}$ y $j=\{1, \dots, m\}$ (ver penúltima fila en Tabla 34)
2. Maximizando el NPV esperado, donde las probabilidades se basan en la estimación conservadora resultante de una simulación. Se asume una distribución de probabilidad para las variables asociadas a la generación de los escenarios, por ejemplo, para la variación del precio de la energía. Es decir, la decisión será A_j que maximice el mínimo NPV $\sum P_i \cdot \text{NPV}(S_i, A_j)$ para $i=\{1, \dots, k\}$ y $j=\{1, \dots, m\}$ (ver última fila en Tabla 34)

Desde que el primer criterio excluye la información sobre las probabilidades vinculadas a los eventos, la regla recomendada es incluir la probabilidad evaluada y maximizar el VAN esperado por alternativa. Verbruggen et al (2011) establecen que esta metodología es un buen primer paso en la evaluación de la inversión, pero puede "dar respuestas equivocadas" cuando el análisis se detiene aquí. Sus deficiencias consisten en suponer que el conjunto de escenarios futuros se compone de una

decisión inicial que empieza con la inversión (año 0) y termina en el año H (principalmente con el desmantelamiento). Suposición estática que no refleja los procesos secuenciales de la vida real, es decir, las decisiones y los sucesos varían con el tiempo, lo que da origen al enfoque dinámico para la evaluación económica.

Tabla 34. Hoja de cálculo para la estimación del NPV (S_i, A_j) para todas las combinaciones $k \times m$

Chance	Events	Alternative investments $A_j, \{j = 1, \dots, m\}$			
		A_1	A_2	...	A_m
P_1	S_1	$NPV(S_1, A_1)$	$NPV(S_1, A_2)$	...	$NPV(S_1, A_m)$
P_2	S_2	$NPV(S_2, A_1)$	$NPV(S_2, A_2)$	...	$NPV(S_2, A_m)$
...	...	...	...	...	...
P_k	S_k	$NPV(S_k, A_1)$	$NPV(S_k, A_2)$	...	$NPV(S_k, A_m)$
Decision rule					
A_j that maximizes minimum NPV		Minimum $NPV(S_i, A_1)$ $i \in \{1, \dots, k\}$	Minimum $NPV(S_i, A_2)$ $i \in \{1, \dots, k\}$	...	Minimum $NPV(S_i, A_m)$ $i \in \{1, \dots, k\}$
A_j that maximizes expected NPV		$\sum_i P_i \cdot NPV(S_i, A_1)$	$\sum_i P_i \cdot NPV(S_i, A_2)$	...	$\sum_i P_i \cdot NPV(S_i, A_m)$

Fuente: (Verbruggen et al., 2011).

b. Evaluación dinámica o modelo secuencial de decisión

El modelo secuencial de decisión, o dinámico, se sustenta a partir de la decisión de “invertir ahora o invertir después” (esperar y aprender). Este modelo es crítico para analizar inversiones que abarcan periodos largos (más allá de 30-40 años), pero también es apropiado y recomendado para analizar muchas inversiones de corto plazo (Verbruggen et al., 2011). La toma de decisiones secuencial considera nodos de decisión dicotómicos consecutivos en el proceso de toma de decisiones. De este modo, el carácter secuencial es modelado como un flujo alterno de evento-decisión, evento-decisión, y así sucesivamente, donde la decisión en cada nodo será “invertir” (ahora) o “no invertir” (esperar). Este último con el objetivo de obtener mejor y mayor información mientras los recursos se mantienen a la espera o son usados para otros fines. Así, el proceso puede ser representado como un árbol de decisiones probabilístico, donde el inversionista invierte (favorable para la alternativa A) con probabilidad $(1 - p_A)$ o espera (no favorable para la alternativa A) con probabilidad p_A , donde además las decisiones futuras están condicionadas a los eventos y decisiones previas. La probabilidad p_A es determinada a partir de la frecuencia de alcanzar un

mayor NPV en el período siguiente ($t+1$) y, es usada en calcular el valor presente neto esperado del periodo siguiente $E(NPV_{t+1})$. La Ecuación 24 muestra esta situación, donde $NPV_{A,S,t}$ (NPV de la alternativa A_j bajo el escenario S_i en el tiempo t) y $NPV_{A,S,t+1}$ (NPV de la alternativa A_j bajo el escenario S_i en el tiempo $t+1$) resultan de una simulación Monte Carlo, siendo la diferencia el progreso de un periodo (Kumbaroglu & Madlener, 2012).

Ecuación 24: $E(NPV_{A,S,t+1}) = NPV_{A,S,t} p_A\{NPV_{A,S,t+1} > NPV_{A,S,t}\}$

La Fig. 4.4 muestra la estructura de la decisión secuencial, evidenciando la posibilidad de retrasar la inversión (alternativa A) periodo a periodo dependiendo del valor de $E(NPV_{A,S,t+1})$, es decir, el NPV “Esperado” para el periodo siguiente de la alternativa A_j dado el escenario S_i . Así, la inversión ocurre en $t=0$ si el $E(NPV_{A,S,t+1})(1+d)^{-1} < NPV_{A,S,t}$. En caso contrario, el inversionista deberá esperar un periodo mientras gana información que disipe incertidumbre para evaluar nuevamente la decisión. Así, si espera en $t=0$, deberá evaluar en $t=1$ ¿ $E(NPV_{A,S,t+2})(1+d)^{-1} < NPV_{A,S,t+1}$? ¿invertir o esperar? y así sucesivamente.

Fig. 4.4 Estructura de evaluación secuencial de decisión. Fuente: (Kumbaroglu & Madlener, 2012)

c. Análisis y discusión a partir de revisión bibliográfica

Varias publicaciones vinculadas a la evaluación de eficiencia energética en viviendas fueron revisadas, de las cuales se pudo apreciar que la mayoría de las publicaciones utilizaban análisis estáticos y escasamente análisis secuenciales de decisión o dinámicos. Por lo tanto, se mantiene el escenario definido por Verbruggen et al. (2011) cuando plantean que aunque se consideran aspectos de riesgo e incertidumbre en la generación de escenarios sigue siendo escasa la evaluación de las inversiones de eficiencia energética bajo un modelo de simulación secuencial o dinámica. Del total de publicaciones revisadas cinco fueron seleccionadas, dos que abordaban con claridad las metodologías estática y dinámica en viviendas, y otras tres investigaciones donde se evaluaban inversiones de reacondicionamiento en viviendas, ya sea vinculadas a minimizar la demanda (envolvente) o el consumo (sistemas de instalaciones) de energía. Estas investigaciones son las siguientes:

- 1) “Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings” (Kumbaroglu & Madlener, 2012). En esta publicación los modelos estático y dinámico se aplican en la evaluación de alternativas de decisión y, según los autores, correspondería a la primera aplicación del enfoque dinámico en la evaluación de alternativas de inversión de eficiencia energética.
- 2) “Life Cycle Cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings” (Morrissey & Horne, 2011). En esta publicación, a partir de la evaluación de alternativas de mejoramiento térmico, se detalla la metodología estática y se presentan hojas de cálculo en la estimación del NPV(S_i, A_j) conforme a la Tabla 34.
- 3) “Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings” (Ciulla, Galatioto, & Ricciu, 2016). Corresponde a una investigación donde varias alternativas de revestimiento son analizadas en edificios de referencia.
- 4) “An Investigation Into the Cost Optimality of the Passive House Retrofit Standard for Irish Dwellings Using Life Cycle Cost Analysis” (Coyle, 2016).

Investigación donde se analiza un edificio reacondicionado a partir de diferentes alternativas de inversión (en la envolvente y sistemas de la vivienda) que van desde no hacer nada hasta lograr un edificio pasivo (ULEB).

- 5) “Techno-economic assessmet of solar assisted heat pump system retrofit in the Canadian Housing Stock” (Asaee, Ugursal, & Beausoleil-Morrison, 2017). Investigación donde se evidencia la fuerte irrevocabilidad que presenta la inversión de sistemas solares térmicos que imposibilitaron la elección de ciertas viviendas para su implementación (requerimiento de superficie expuesta al sol).

La Tabla 35 muestra los hallazgos vinculados a los métodos de evaluación económica usados en las publicaciones listadas. Estos fueron tabulados conforme a lo siguiente: a) al tipo de edificio estudiado y las alternativas de mejora posibles en él (A_i), b) al método usado (estático o dinámico) y la definición de escenarios, c) consideraciones para la estimación de los flujos de caja en la determinación del indicador económico de interés (NPV, LCC u otro) y, c) otros aspectos misceláneos a destacar en la evaluación de las alternativas de inversión.

Conforme a la Tabla 35, se aprecia que las alternativas de evaluación se generan a partir de uno o más edificios de referencia, los que al incluir una o más inversiones de eficiencia energética definen las alternativas A_j para la evaluación económica. No se evidencian restricciones en el número de alternativas; sin embargo, por razones de presentación y manejo de la información no sería recomendable un número elevado (piense en la presentación de la Tabla 34 en el enfoque estático). Siendo el número máximo de alternativas de inversión de eficiencia energética, para los casos en Tabla 35, igual a 8.

En torno a la definición de los escenarios de análisis, la variación en el precio de la energía es el evento más recurrente. Evento que puede ser modelado determinística o estocásticamente, pero que presenta cierta dificultad en la definición su tendencia dado el número importante de modelos y variables asociadas a su predicción, no existiendo un consenso acerca de la mejor forma de capturar la verdadera dinámica de los precios de la energía (Kumbaroglu & Madlener, 2012). Destaca la posibilidad de considerar el cambio climático como una variable de incertidumbre en la generación de los escenarios, pues el desempeño de las alternativas de inversión en

eficiencia energética varía conforme al clima en la priorización de las alternativas de inversión (Ciulla et al., 2016).

En relación a la definición de los métodos de análisis, escasos fueron los casos donde se apreciaron enfoques dinámicos, siendo predominante el enfoque estático. Esto se podría deber la complejidad en la estimación de la probabilidad p_A necesaria para la determinación del NPV esperado en la estructura de secuencial de decisión. Sin embargo, Verbruggen et al. (2011) presentan un caso ilustrativo donde en la modelación de situaciones presentes y futuras de decisión se toman valores plausibles para aspectos de tiempo e incertidumbre. Reflejando la posibilidad de prescindir de modelos complejos, donde la presentación de las diferentes combinaciones de alternativas inversión y escenarios posibles no dejan de ser una modelación, con sus respectivas limitaciones y ventajas, que deben quedar definidas y aceptadas por el evaluador en su metodología de trabajo. Esta propuesta será adoptada en el caso de estudio descrito en el apartado 6.4 más adelante.

En torno a la determinación del NPV, en general, los flujos positivos quedan definidos por los ahorros en energía, por los incrementos en el valor residual de la vivienda, por los incrementos en la renta de la vivienda si se supone su arriendo y, por los subsidios u otros beneficios análogos considerados por el analista; por otro lado, los flujos negativos quedan definidos por la inversión inicial (costos de construcción, costos de equipos y sistemas, costos de montaje u otros costos o gastos necesarios para la puesta en servicio de la mejora en la vivienda) y, por los costos de mantenimiento, operación y deconstrucción. En cuanto a la tasa de descuento estimada, esta decrece para periodos más lejanos, siendo consecuente con lo planteado por Weitzman (1999) cuando sugiere incorporar tasas de descuento decrecientes en cualquier metodología costo-beneficio para evaluar proyectos con impacto ambiental a largo plazo. Así, las tasas que se presentan en las evaluaciones económicas bordean el 4% para los primeros 25 o 30 años y luego decrecen en el horizonte de análisis. Finalmente, son los horizontes de análisis los que presentan mayor dispersión, quedando supeditados a las características de las inversiones en eficiencia energética (vida útil, materialidad, otros) y la estimación de parámetros en la definición de los escenarios, por ejemplo, en la proyección del precio de la energía.

Tabla 35. Hallazgos vinculados a la evaluación de inversiones de eficiencia energética en viviendas.

Autores	Tipo de edificio e identificación de las alternativas de mejora	Método usado y definición de escenarios	Consideraciones en la definición de los flujos	Otros aspectos a destacar.
1. Kumbaroglu y Madlener (2012)	Rehabilitación de un edificio de administración pública, donde se analizan diferentes alternativas de inversión que consideran aislamiento de envolvente (mejorar muros, techo o ventanas) y/o diferentes alternativas para los sistemas de instalaciones.	Los enfoques estático y dinámico son contrastados a partir del NPV. Donde los escenarios son modelados a partir de la estimación de cambios en el precio de la energía.	Diferencia costos y beneficios dependiendo se trate de un edificio para ser usado por el dueño o es arrendado. La tasa de interés usada fue de 4,22% y se asumió autofinanciamiento. Se consideró un incremento de 11% en la renta dada la mejora. La trayectoria de los precios de la energía consideró un horizonte de 16 años y la evaluación dinámica cuatro periodos $t=0, 2, 4$ y 6 años.	Se explican en detalle los métodos propuestos y se evidencian las diferencias. Se muestran rangos de valores para parámetros típicos en las evaluaciones económicas de inversiones de eficiencia energética. Se muestra que la alta volatilidad en el precio de la energía da valor a la decisión de “esperar” en el modelo dinámico.
2. Morrissey y Horne (2011)	Contrasta los resultados promedios en la modelación de 100 viviendas para propuestas de desempeño térmico mejorado. Para esto define 4 alternativas: base (182MJ/m ²), de eficiencia mejorada, de estándar internacional y de alta eficiencia; los cuales representan ahorros de 0%, 24%, 45% y 65% en la energía anual requerida para el acondicionamiento térmico conforme a la base de referencia.	Es usado el método estático a partir de del NPV. Establece que los costos son difíciles de estimar y generan cierta incertidumbre. Se definen dos escenarios en base a la tendencia en el precio de la energía (gas y electricidad). “altos” y “bajos” precios.	Considera el incremento marginal del valor residual de la vivienda en función de la eficiencia energética de la envolvente, medidas de ahorro energético y el costo del capital. El NPV es calculado en 4 horizontes de análisis: 5, 10, 25 y 40 años. Para 0-30 años se usó una tasa real de 3,5% y para 30-75 años de 3% (inflación 3,32%). Se consideró una vida útil del edificio de 70 o más años.	Muestra parámetros interesantes en las viviendas estudiadas como son el área externa de muros, razón muro/piso, razón, ventana/muro, entre otros. Se muestra el proceso de estimación del NPV para el análisis estacionario de los escenarios propuestos.
3. Ciulla et al. (2016)	Dos edificios (con diferente relación superficie expuesta al exterior/volumen) son modelados en cuatro zonas climáticas, en los cuales varias acciones de	Utiliza el enfoque estático, basado en el NPV, para determinar el periodo de recuperación de la inversión SPP. No hay aspectos de	Son estimados los ahorros de energía a partir de la estimación de las demandas en calefacción y refrigeración en kWh/m ² al año. Los costos del reacondicionamiento se	Las modelación de las alternativas por edificio y clima permitieron, a partir del ahorro, priorizar las 8 alternativas de inversión en la

	reacondicionamiento se aplicaron para la generación de 8 alternativas que contrastan los desempeños de los dos edificios de referencia.	incertidumbre relevantes que se aborden, se presenta un escenario más bien determinístico.	establecen en moneda local, por lo que se aplica una tasa nominal que no queda explícita.	vivienda para cada zona climática.
4. Coyle (2016)	El caso de estudio corresponde a una vivienda que fue profundamente reacondicionada para producir una reducción del 90% en los costos operacionales del combustible, la demanda de energía primaria y las emisiones de CO ₂ ; definiendo 4 alternativas de análisis (base, base con nuevo sistema de instalación, base con mejora de envolvente y transformación hacia una casa pasiva)	Es usado el método estacionario a partir del enfoque LCC. Se definen escenarios de sensibilización en los costos de construcción, inflación en combustibles, y variación en los ahorros energéticos operacionales, entre otros.	Considera el capital y los costos operacionales en el ciclo de vida, una tasa de interés real de 4% (tasa hipotecaria) para el horizonte de análisis de 30 años. Inflación de 2% y 4% para la tasa de crecimiento del precio de la energía. Y un valor residual de 40% de la inversión. Los costos de inversión y ahorros en energía son calculados por cada alternativa.	Muestra que el estándar de vivienda pasiva puede ser rentable para un propietario privado, con la combinación correcta de tasas de interés ($\leq 4\%$), inflación de combustible ($\geq 4\%$), períodos de inversión a largo plazo (≥ 30 años) y la inclusión de residuales valores.
5. Asae et al. (2017)	Para casas elegibles por áreas geográficas, donde la inversión en eficiencia energética es viable técnicamente, es modelado un sistema solar térmico SAHP (Solar Assisted Heat Pump System). Las alternativas quedan definidas, para 10 áreas geográficas y para 4 tipos de combustible (electricidad, gas natural, petróleo y madera), por la determinación del consumo anual de energía en la vivienda no elegible, elegible y elegible con la mejora.	Presenta un enfoque estático basado en un periodo de recuperación de la inversión permitido que, para los ahorros en energía, una tasa de crecimiento en el precio de combustibles, entre otros, define el costo tolerable para la inversión en eficiencia energética (TCC). Se generan 3 escenarios para la tasa de crecimiento de la energía (bajo, medio y alto)	Considera el incremento en el precio de la energía, el ahorro en la energía dependiendo del tipo de energía, los costos operacionales del SAHP y la tasa de descuento sensibilizada en 3%, 6% y 9% con base a tasas bancarias. El periodo permitido para la recuperación de la inversión es de 6 y 10 años.	Muestra una metodología basa en el NPV, pero donde el costo de capital debe ser estimado para un periodo de recuperación permitido (Tolerable Capital Cost TCC).

5. EVALUACIÓN SUSTENTABLE DE VIVIENDAS

5.1. Vivienda sustentable y sistemas de evaluación

Se partirá por referenciar la Fig. 2.2 dentro el apartado 2.2 más atrás respecto a la distinción entre edificios verdes (Green buildings), sustentables (Sustainable buildings) y circulares (Circular buildings). Esto a partir de la vinculación del edificio con seis dimensiones de estudio. Estas dimensiones son: a) Medioambiental, b) tecnológica, c) económica, d) social, e) gubernamental y f) conductual. En este sentido, edificaciones que consideran las dimensiones medioambiental y tecnológica corresponden a edificios verdes. Edificaciones que consideren además de éstas las dimensiones económica y social corresponden a edificios sustentables y, las que consideran todas las dimensiones corresponden edificaciones circulares (Pomponi & Moncaster, 2017). Consecuentemente, es posible convenir que un edificio verde busca minimizar su impacto ambiental a partir del uso de la tecnología, es decir, recorre las dimensiones técnicas y medioambientales, sin embargo, un edificio sustentable o un edificio circular son de orden superior, pues las restricciones a los impactos y su alcance son mayores.

A partir de lo anterior es preciso notar la trilogía económica, social y medioambiental asociada a la sustentabilidad. Esto se plasma en la definición de sostenibilidad adoptada por las Naciones Unidas en su Agenda para el Desarrollo: “Development is a multidimensional undertaking to achieve a higher quality of life for all people. Economic development, social development and environmental protection are interdependent and mutually reinforcing components of sustainable development” (Kuhlman & Farrington, 2010). Así, un edificio sostenible debería aumentar la equidad social, los problemas culturales y patrimoniales, las tradiciones, la salud humana y la infraestructura social, así como entornos seguros y saludables, como también debería

considerar el impacto del edificio en la salud física y mental de los ocupantes (Berardi, 2013).

La edificación sustentable debiera responder a los siguientes principios (Berardi, 2013):

1. Aplicar los principios generales de sustentabilidad y, por lo tanto, promover la mejora continua, la equidad, el pensamiento global y la acción local, un enfoque holístico, la consideración a largo plazo de la precaución y el riesgo, la responsabilidad y la transparencia.
2. Involucrar a todas las partes interesadas a través de un enfoque de colaboración, para que se puedan satisfacer las necesidades de los ocupantes individual y colectivamente, y ser respetuoso y coherente con las necesidades sociales colectivas a través de la asociación en los procesos de diseño, construcción y mantenimiento.
3. Ser completamente integrado en los planes e infraestructura locales relevantes y conectado a los servicios existentes y redes urbanas y suburbanas con el propósito de mejorar la satisfacción de las partes interesadas.
4. Ser diseñado desde una perspectiva de ciclo de vida, cubriendo la planificación, el diseño, la construcción, la operación y mantenimiento, la renovación y el término de vida, considerando todas las otras fases durante la evaluación del desempeño en cada una de las fases.
5. Tener su impacto ambiental minimizado durante la vida útil. Esto tomando en consideración requisitos regionales y globales, la eficiencia en el uso de recursos junto con la reducción de desechos y emisiones.
6. Brindar valor económico a lo largo del tiempo, teniendo en consideración los costos futuros del ciclo de vida para la operación, el mantenimiento, la renovación y el desecho.

7. Proporcionar valor social y cultural a través del tiempo y para todas las personas. Un edificio sostenible debe proporcionar un sentido de pertenencia para sus ocupantes, ser visto por los trabajadores como un medio para mejorar el estado del trabajo, y debe estar relacionado e integrado en la cultura local.
8. Ser saludable, confortable, seguro y asequible para todos. Los criterios de salud incluyen la calidad del aire interior, mientras que los criterios de confort incluyen el confort acústico, térmico, visual y olfativo. Debe permitir condiciones de trabajo seguras durante su construcción y vida útil, y accesibilidad total para todos en el uso de las instalaciones del edificio.
9. Ser fácil de usar, simple y rentable en su operación, con rendimientos medibles a lo largo del tiempo. Las normas de operación y mantenimiento deben estar disponibles en cualquier momento para operadores y ocupantes. Las personas deben comprender la filosofía y las estrategias incluidas en el edificio y deben recibir incentivos para comportarse de manera sostenible.
10. Ser adaptable a lo largo de la vida útil y presentar una estrategia de término de vida útil. El edificio debe permitir la adaptación al cambiar los requisitos de rendimiento y funcionalidad, de conformidad con las nuevas restricciones.

A partir de lo anterior, varios son los elementos que deben preverse para lograr una edificación sustentable. Consecuentemente, en la evaluación de sustentabilidad de una edificación no es simple identificar qué edificaciones resultan ser realmente sustentables o respetuosas con el medio ambiente, pues se requiere “cuantificar” el impacto de los edificios del punto de vista ambiental a partir de una metodología estandarizada. En esto resulta relevante diferenciar los métodos, los instrumentos y las herramientas en la definición de los sistemas de evaluación de sustentabilidad para edificios (Rivela, 2012).

Los sistemas de evaluación de sustentabilidad corresponden a instrumentos que permiten realizar la evaluación de las edificaciones conforme a diferentes métodos que han sido previamente definidos en el sistema de evaluación y que generalmente llevan asociados una herramienta de cálculo asistido por ordenador (Rivela, 2012).

En este sentido, los sistemas de certificación de edificios sustentables (Green Building Certifications - GBCs) como lo son BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology), LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), DGNB (German Sustainable Building Council) u otros análogos, corresponden a instrumentos que utilizan métodos y herramientas particulares para evaluar el desempeño sustentable de los edificios.

Desde que los sistemas de certificación presentan diferentes métodos y herramientas para clasificar, cuantificar y evaluar qué sistema de construcción, técnica o material resulta ser más sostenible conforme al análisis de varios aspectos de sustentabilidad (ver Tabla 36), resulta evidente que una edificación podría obtener una calificación o clasificación distinta (a partir de la obtención de créditos o puntajes como se muestra en la Tabla 36) dependiendo del sistema certificación utilizado en la evaluación (Zeinal Hamedani & Huber, 2011).

A modo de ejemplo, para la categoría de energía que presenta el peso más significativo de todos los requisitos evaluados en cada certificación, se aprecia en Fig. 5.1 que en LEED los requerimientos de energía representan el 30% del peso total de las nueve áreas evaluadas, en BREEAM el 23% de las diez categorías definidas, y en DGNB el 22.1% de los seis campos analizados (La pequeña variación entre la Tabla 36 y la Fig. 5.1 se debe a la versión de la certificación utilizada en el análisis de los investigadores).

Tabla 36 Comparación de aspectos de sustentabilidad para BREEAM, LEED y DGNB

	LEED (USGBC, 2015) (110 credits)	BREEAM (BRE Global Ltd., 2013) ⁽¹⁾ (143 to 151 credits)	DGNB (DGNB, 2013) ⁽²⁾ (percentage based)
Procedural	Integrative Process ≈ 1 credit Innovation ≈ 6 credits Total: 7 credits ≈ 6.5%	Management ≈ 12-14 credits Innovation ≈ 10 credits Total: 22 to 24 credits ≈ 16%	Process Quality ≈ 10% Total: ≈ 10%
Environmental	Location and Transportation ≈ 14 credits Sustainable Sites ≈ 9 credits Water Efficiency ≈ 11 credits Energy and Atmosphere ≈ 33 credits Material and Resources ≈ 12 credits Total: 79 credits ≈ 72%	Management ≈ 6 credits Energy ≈ 28 credits Transport ≈ 11-14 credits Water ≈ 9 credits Materials ≈ 10 credits Waste ≈ 6-7 credits Land use and ecology ≈ 12 credits Pollution ≈ 17 credits Total: 99 to 104 credits ≈ 69%	Environmental Quality ≈ 23% Technical Quality ≈ 8% Total: ≈ 31%
Economic	Regional Priority ≈ 4 credits Total: 4 credits ≈ 3.5%	Management ≈ 3 credits Materials ≈ 1 credit Total: 4 credits ≈ 2.5%	Economic Quality ≈ 22% Technical Quality ≈ 6% Total: ≈ 28%
Social	Location and Transportation ≈ 2 credits Sustainable Sites ≈ 1 credit Material and Resources ≈ 1 credit Indoor Environmental Quality ≈ 16 credits Total: 20 credits ≈ 18%	Management ≈ 1 credit Health and Wellbeing ≈ 16-18 credits Pollution ≈ 1 credit Total: 17 to 19 credits ≈ 12.5%	Sociocultural and Functional Quality ≈ 23% Technical Quality ≈ 8% Total: ≈ 31%

Notes to Table: (1) Section weighting not included in the percentage calculations

(2) DGNB New office and administrative buildings, Version 2012

Fuente: (Marjaba & Chidiac, 2016)

Fig. 5.1 Ponderación de las necesidades energéticas para LEED, BREEAM y DGNB Fuente:
(Romano & Riediger, 2020)

Dada esta variabilidad, se establece que el ACV debería ser el método por excelencia para evaluar el desempeño de una vivienda, pues sigue las reglas del método científico, las que quedan descritas con claridad en la serie de normas ISO 14040 (Rivela, 2012). Consecuentemente, presenta al ACV como un “sistema de evaluación”, diferenciándolo de los sistemas de calificación y/o certificación de edificaciones (sistema de puntuación, ver Tabla 36) como los son BREEAM, LEED, DGNB u otro análogo (Rivela, 2012).

5.2. Análisis de Ciclo de Vida en viviendas

Los primeros estudios sobre el ciclo de vida se remontan a principios de la década de 1970 y se centraron en el análisis del uso de energía en procesos industriales, el consumo de materias primas y, en menor medida, en la disposición final de los desechos generados. No fue hasta la década de 1990 que la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV, o en inglés LCA) se desarrolló lo suficiente para aplicarse aunque de modo bastante limitado. Así, en 1993, la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (Society of Environmental Toxicology and Chemistry - SETAC) definió el LCA como: “a process to evaluate the environmental burdens associated with a product, process, or activity by identifying and quantifying energy and materials used and wastes released to the environment; to assess the impact of those energy and materials used and releases to the environment; and to identify and evaluate opportunities to affect environmental improvements” y; en 1996, SETAC elaboró un documento titulado “Towards a Methodology for Life-Cycle Impact Assessment” que sirvió de base para el desarrollo del estándar ISO 14040 y posterior desarrollo de su adaptación al sector construcción a partir de un conjunto de estándares que aplica el enfoque del ACV a través de las tres dimensiones de la sustentabilidad (ambiental, social y económica). Siendo, para la dimensión ambiental, la norma EN 15978 “Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method” la que proporciona el método de cálculo para la evaluación del desempeño ambiental de edificios con base al ACV (Hernandez et al., 2018).

Desde entonces el ACV se ha convertido en una herramienta fundamental a la hora de evaluar el desempeño ambiental de las edificaciones, siendo habitual el uso de la estructura metodológica definida la norma ISO 14040 (Abd Rashid & Yusoff, 2015), pues surgen como una respuesta objetiva para la evaluación de mejoras de eficiencia energética o sustentabilidad en las viviendas. Mejoras que responden a diversos objetivos, por ejemplo, búsqueda de ahorros de energía, para responder a una reglamentación cada vez más exigente, o bien, para contrastar la incidencia ambiental de diversas soluciones de reacondicionamiento térmico en viviendas. Estos análisis presentan diversas variaciones producto de las características inherentes a los edificios (materiales, ubicación geográfica, diseño, etc.), a diferencias detectadas en la definición de los aspectos que las estructuran y a la carencia de bases de datos ambientales (Anand & Amor, 2017) (Vilches et al., 2017). Pese a esto, siguen siendo útiles y aceptados internacionalmente para evaluar el desempeño ambiental de las edificaciones (Abd Rashid & Yusoff, 2015)(Dossche, Boel, & De Corte, 2017).

Los ACV en viviendas suelen considerar la medición de las emisiones de los gases de efecto invernadero (Greenhouse Gas o GHG), que definen el potencial de calentamiento global (Global Warming Potential o GWP), y la energía demanda acumulada (Cumulative Energy Demand o CED) (Evangelista et al., 2018)(Vilches et al., 2017). Varios autores han establecidos estructuras útiles y simplificaciones a los modelos con el propósito de sortear brechas de información, o bien, prescindir de las fases del ciclo de vida que presentan menor incidencia para las categorías de impacto GWP y CED (Zabalza Bribián et al., 2009). Estos modelos resultan lo suficientemente precisos para evaluar los impactos ambientales y tomar decisiones respecto a los cambios o rehabilitaciones en edificaciones (Vilches et al., 2017), pero para los cuales resulta importante establecer y transparentar el nivel de simplificación (Lewandowska, Noskowiak, Pajchrowski, & Zarebska, 2015).

Cada vez que se realiza un ACV se debe definir la estructura del análisis respectivo. La Fig. 5.2 muestra una estructura propuesta para el sector edificación a partir de la norma ISO 14040 y el estudio de varias publicaciones científicas. Los diferentes elementos que la estructuran, señalados con letras que van desde la “A” a la “D” en la Fig. 5.2, se explican en los apartados siguientes.

Fig. 5.2 Estructura de los ACV en edificaciones. Fuente: (Abd Rashid & Yusoff, 2015)

5.2.1. Objetivo y definición del alcance

El objetivo del ACV debe definirse al comienzo del estudio y debe indicar claramente el objetivo del estudio y la audiencia a la que se comunicarán los resultados. La definición del objetivo tiene implicaciones en todos los pasos y elementos que constituyen el ACV e influirán en los métodos y detalles de cómo se llevarán a cabo el análisis de inventario (Letra B. en Fig. 5.2, Life cycle inventory - LCI), el análisis de los impactos (Letra C. en Fig. 5.2, Life cycle impact assessment - LCIA) y la interpretación del análisis del impacto (Letra D. en Fig. 5.2) para la generación del informe de evaluación. (Hernandez et al., 2018)

Conforme a la Fig. 5.3, el objetivo y definición del alcance del ACV en la edificación considera tres elementos: a) Límite del sistema, b) Unidad funcional y c) Vida útil del edificio, cada uno de estos es abordado a continuación.

a. Límites del sistema (System Boundary)

Los límites del sistema determinan los procesos unitarios (fases) que son tomados en cuenta para el propósito de la evaluación. Es necesario una definición clara de los límites del sistema para una mejor comprensión e interpretación de los resultados

del ACV, así como para permitir su uso con fines comparativos. Varios factores determinan los límites del sistema, incluida la aplicación prevista del estudio, las suposiciones hechas, los criterios de corte, las restricciones de datos y costos, y la audiencia prevista. Los criterios utilizados para establecer los límites del sistema se identificarán y justificarán en el alcance del estudio. Para edificios nuevos, generalmente se evalúa el ciclo de vida completo. Para proyectos de renovación de edificios, desde que el objetivo más común del ACV es la evaluación de las opciones de renovación, el edificio existente antes de la intervención de renovación generalmente no se incluye en los límites del sistema, ya que no cumple con el objetivo del estudio. (Hernandez et al., 2018)

Al igual que para otros productos en otras industrias, los límites del sistema pueden ir desde la cuna a la tumba o “cradle-to-grave” (recorre todas las fases del ACV, tal como se muestra en la Fig. 5.3), desde la cuna a la puerta o “cradle-to-gate” (análisis de los productos de construcción, desde la fase de materiales a la fase de construcción), o bien, desde la puerta a la puerta o “gate-to-gate” (para el análisis del proceso de construcción). En la mayoría de los casos el enfoque escogido va desde la cuna hasta la tumba (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Sin embargo, existe el ACV simplificado. El que se caracteriza porque algunos de los elementos que deben abordarse dentro de las fases que se muestran en la Fig. 5.3 no son considerados, ya sea porque no son incidentes en las categorías de impacto ambiental que se estudian, o bien, porque no son relevantes para los objetivos del análisis (Zabalza Bribián et al., 2009). Cada uno de los elementos asociados a cada fase fue abordado en la Fig. 2.3 en el título 2.2 más atrás.

Fig. 5.3 Límites del sistema para los ACV en viviendas. Fuente: (Oregi et al., 2017)

En los ACV en edificaciones, las etapa de materiales y de uso u operación resultan ser más incidentes para las categorías de impacto CED y GWP (GHG) analizadas con

mayor frecuencia (Abd Rashid & Yusoff, 2015). En la Tabla 37 se aprecian las incidencias para diferentes fases a partir de los resultados de 7 casos de ACV para viviendas de Australia y Europa (fases de materiales y construcción aparecen fusionadas).

Tabla 37. Incidencias de las etapas del ACV en viviendas sobre las categorías de impacto GWP (GHG) y CED.

Study System description and assumptions	GHG	CED
Australian climate (Brisbane, Sydney, and Melbourne), 5 star rating, 50-year lifetime; excludes interior decorations and household appliances; assumes a COP of 3.5 with 20% ducting loss for cooling, 70% efficiency for heating; disposal phase includes dismantling of the original construction materials and their transport to recycling and land fill	<ul style="list-style-type: none"> • Construction 31–43% • Operation 53–68% • Maintenance 4–6% • Disposal –1 to –5% 	<ul style="list-style-type: none"> • Construction 31–44% • Operation 52–64% • Maintenance 5–6% • Disposal (–1 to –3%)
Australian climate (Victoria), various 0.8 to 5.1 star rating, 100-year lifetimes; excludes interior decorations and household appliances; includes appliances efficiency for operational energy; assumes 65% appliances efficiency for heating and a COP of 3 and no duct losses for cooling; disposal phase includes dismantling of all the materials to landfill, with no carbon sequestration or material energy recovery from land fill	<ul style="list-style-type: none"> • Construction, maintenance and disposal ranged 7–24% • Operation 76–93% 	<ul style="list-style-type: none"> • Construction, maintenance and disposal 4–18% • Operation 82–96%
Australian climate (Newcastle, Melbourne and Brisbane), 50-years lifetime; excludes interior decorations and household appliances and major renovation; star rating and appliances energy efficiency not specified; disposal phase includes only transportation impact for construction materials to recycling and land filling	(Newcastle climate) <ul style="list-style-type: none"> • Construction 47% • Operation 51% • Disposal (2%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Not specified
Australian climate, 60-year lifetime; includes interior decorations, heating/cooling, lighting and household appliances; excludes major renovations, the appliances efficiency not specified	<ul style="list-style-type: none"> • Construction 3–5% • Operations 90% 	<ul style="list-style-type: none"> • Not specified
Hungarian residential house, 50-year lifetime; includes heating and cooling, hot water, lighting; excludes interior decorations; using tabulated values for gross operation energy; disposal phase includes recycling (50%) as well as their transportation	<ul style="list-style-type: none"> • Construction 14–21% • Operation 67–72% • Maintenance 7–11% • Disposal 3–5% 	<ul style="list-style-type: none"> • Construction 14–20% • Operation 68–77% • Maintenance 6–13% • Disposal 1–2%
UK residential house, 50-year lifetime; includes heating/cooling, water heating, cooking, lighting, and appliances energy consumption; assumes reuse, recycling and landfill for waste treatment; energy ratings and appliances energy efficiency not specified	<ul style="list-style-type: none"> • Construction 9% • Operation/use 90% • Disposal 1% 	<ul style="list-style-type: none"> • Not specified
Spanish and Columbian house, 50-year lifetime; includes space heating/cooling, water heating, cooking, lighting, and appliances energy consumption; assumes a COP of 2.35 for heating and 1.85 for cooling; disposal phase includes dismantling of materials and their transport to land fill	<ul style="list-style-type: none"> • Construction 8–28% • Operation/use 69–91% • Disposal 1–3% 	<ul style="list-style-type: none"> • Not specified

Fuente: (Islam et al., 2015)

b. Unidad funcional (Functional Unit)

La unidad funcional debe ser consistente con el objetivo del estudio. Uno de los propósitos principales de una unidad funcional es proporcionar una referencia con la que se relacionan los datos de entrada y salida. Esta referencia es necesaria para asegurar la comparabilidad de los resultados del ACV, lo cual es particularmente crítico cuando se evalúan diferentes sistemas, para asegurar que tales comparaciones se realicen de manera común. Una vez elegida la unidad funcional, se definirá el flujo de referencia, es decir, la cantidad de producto examinado requerida para cumplir la función expresada por la unidad funcional. Las comparaciones entre sistemas se realizarán sobre la base de la(s) misma(s) función(es), cuantificadas por

la(s) misma(s) unidad(es) funcional(es) en forma de sus flujos de referencia. (Hernandez et al., 2018)

La unidad funcional define la unidad sobre la cual se cuantificarán los indicadores de impacto, en general se suele utilizar el metro cuadrado (m²) de área de piso (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Aunque también se ha visto que en algunos ACV se definen como unidad funcional la vivienda, sin embargo, esta unidad hace difícil el contraste de resultados entre investigaciones (Islam et al., 2015). La ilustra algunas de las unidades funcionales más características que se han utilizado en los ACV de edificaciones. Según la norma EN 15978, la unidad funcional también debe incluir el tipo de edificio (por ejemplo, oficina, fábrica, etc.), los requisitos técnicos y funcionales relevantes (por ejemplo, los requisitos reglamentarios y específicos del cliente, etc.), el patrón de uso (por ejemplo, ocupación) y la vida útil requerida (Hernandez et al., 2018).

Tabla 38. Unidades funcionales aplicadas en el ACV del edificio

Functional Unit	Unit Description
m ²	Net floor area
	Heated area
	Gross internal area
	Usable floor area
	Gross floor area
	Living area
	Floor area without detailed specifications
m ² /year	Heated area
	Liveable area
	Usable area
	Total area
	Floor area without detailed specifications
Year	
Inhabitant (person)	
Person /year	

Fuente: (Hernandez et al., 2018).

c. Vida útil del edificio (Building Lifespan)

El período de estudio de referencia se define como el período de tiempo durante el cual se analizan las características dependientes del tiempo del objeto bajo evaluación.

Este periodo de análisis define la fase de uso del edificio evaluado, es decir, su vida útil para la evaluación. Las actividades de mantenimiento, reparación, reemplazo y renovación, así como el uso operativo de energía y agua, son muy sensibles a la definición de este periodo de tiempo y pueden contribuir de manera diferente a los impactos durante el ciclo de vida. Para cualquier producto fabricado, la vida útil se puede calcular o estimar a partir de la experiencia o de productos similares. Sin embargo, debido a factores no técnicos como el perfil y el comportamiento de los ocupantes, el entorno del edificio, la severidad del clima, los cronogramas de mantenimiento, etc., no es fácil fijar un valor como periodo de estudio de referencia para las edificaciones. (Hernandez et al., 2018).

Una vida útil de 50 años se usa con frecuencia como valor predeterminado cuando no hay datos más precisos disponibles sobre la vida útil real. La Fig. 5.4 muestra la alta frecuencia en la definición de un horizonte de 50 años para la vida útil de los edificios en una muestra de 95 casos. En este contexto, resulta conveniente definir la vida útil igual a 50 años, pues facilita el contraste de los resultados de los ACV en edificaciones con otras investigaciones. Menos frecuentes se muestran investigaciones con horizontes de 80 y hasta 100 años (Islam et al., 2015) (Abd Rashid & Yusoff, 2015).

Fig. 5.4 Vida útil considerada en 95 casos de estudio (CS) de edificios residenciales (NS: No se indica). **Fuente:** (P. Chastas et al., 2017)

5.2.2. Análisis de inventario (Life-Cycle Inventory – LCI)

El paso LCI implica crear un inventario de flujos desde y hacia la naturaleza para un sistema de producto. Los flujos de inventario incluyen entradas de recursos y materias primas; salidas de emisiones a la atmósfera, tierra y agua; subproductos; y otras emisiones (ver Fig. 2.9 en el apartado 2.2 más atrás). Para desarrollar el inventario, el modelo de flujo del sistema técnico se construye utilizando datos de entradas y salidas, y abarca todas las actividades dentro de los límites del sistema. Todos los datos utilizados en un estudio LCA deben modelarse con una metodología uniforme. Esto generalmente se logra mediante el uso de bases de datos públicas o privadas disponibles comercialmente y modelando el edificio de manera consistente. Algunas de las bases de datos existentes para productos de construcción se muestran en la Tabla 44 más adelante. Además del uso de bases de datos específicas para realizar los estudios, también es importante comentar sobre la

creciente disponibilidad de información ambiental disponible en las DAP (Declaración Ambiental de Producto o EPD del inglés Environmental Product Declaration). Un EPD es un documento verificado y registrado de forma independiente que comunica información transparente y comparable sobre el impacto medioambiental del ciclo de vida de los productos. Tener una EPD para un producto no implica que el producto declarado sea ambientalmente superior a las alternativas, es simplemente una declaración transparente de los impactos ambientales del ciclo de vida. La norma ISO14025 especifica los procedimientos para desarrollar las EPD, denominadas "declaraciones ambientales tipo III". (Hernandez et al., 2018).

Consecuentemente, este paso considera la recopilación y la cuantificación de entradas y salidas en las fases del ciclo de vida del edificio (Cabeza, Rincón, Vilariño, Pérez, & Castell, 2014). Por tanto, y conforme a la Fig. 5.2, este elemento asocia la búsqueda de datos vinculados a los materiales de construcción (¿Cuál es la energía incorporada en un ladrillo o m³ de madera aserrada?), a datos de transporte (¿Cuál es la magnitud de las emisiones contaminantes por cada km recorrido de camión?), a datos de construcción, operación y mantención de los edificios (¿Cuál es la eficiencia de los equipos de construcción?, ¿Cuál es la magnitud de las emisiones contaminantes por cada kWh demandado por el edificio? ¿Cuál es la periodicidad de las mantenciones o las rehabilitaciones en el edificio?, etc.), o bien, a datos relativos al término de la vida útil de edificio (¿Qué proporción de materiales se recicla?, ¿se necesita procesamiento o va directo a botadero? ¿Cuál es energía incorporada por unidad de procesamiento de material?, etc.). Estos datos permitirán cuantificar las variables asociadas a los indicadores de impacto ambiental en las fases del ACV consideradas (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Debido a los numerosos materiales, a los procesos involucrados y la naturaleza dinámica de los edificios, el análisis de inventario (LCI) corresponde al paso más complejo dentro de la estructura definida para los ACV en viviendas (Anand & Amor, 2017).

La fase de uso (ver Fig. 5.3) cobra gran relevancia en el análisis de inventario (LCI), pues corresponde a la fase más incidente en el ACV de las edificaciones. Siendo las menos incidentes, las fases de construcción y fin de vida del edificio. Estas últimas además pueden presentar falta de información, datos difíciles de encontrar, datos poco precisos, o bien, datos que son confidenciales (Anand & Amor,

2017)(Abd Rashid & Yusoff, 2015)(Zabalza Bribián et al., 2009)(Islam et al., 2015). Este inconveniente puede eludirse a partir del uso de herramientas computacionales como lo son SimaPro, ATHENA, GaBi, entre otros, (Islam et al., 2015) (Cabeza et al., 2014).

Varias herramientas computacionales están disponibles hoy para estimar el impacto del ciclo de vida de los edificios. Las Tabla 39 presenta la lista de herramientas de ACV utilizadas para la evaluación del ciclo de vida de los edificios. En las que se listan herramientas genéricas y específicas para el ACV. Los indicadores de energía y GEI (gases de efecto invernadero) que pueden calcularse utilizando un software particular se indican en la respectiva tabla. La disponibilidad de la categoría de impacto en un software ACV depende de la metodología de evaluación de impacto disponible para el software. Herramientas populares como GaBi y SimaPro proporcionan una amplia gama de metodologías, desde la evaluación energética y la huella hídrica hasta diversas evaluaciones de categorías de impacto (Anand & Amor, 2017)

Tabla 39. Herramientas genéricas y específicas de ACV

Generic LCA tools applicable to building LCA cases.		Building specific LCA tools.	
Name	Indicators included	Name	Indicators included
GaBi	C, E, GHG	Athena (Impact Estimator for Buildings)	E, GHG
SimaPro	C, E, GHG	LEGEF-Life cycle Assessment	C, E
Umberto NXT LCA software	C, E, GHG	Envest 2	C, E
		ECOSOFT	E
OpenLCA	C, E	BeCost	E, C
TEAM™ 5.2	E, C	BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability)	C, E, GHG
EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment)	C, E, GHG	EQUER	E, GHG
Boustead Model	E, GHG	EcoEffect	E, GHG
		ECO-BAT 4.0	E

*(C-Cost, E-Environmental impacts, Green House Gases - GHG).

Fuente: (Anand & Amor, 2017)

Cabe destacar que los programas requieren bases de datos de inventario específicas a cada región. Las que no están disponibles para Chile, e incluso para Sudamérica, lo que se ha sorteado en otras investigaciones a partir del uso de bases de datos internacionales contextualizadas a la realidad chilena, o simplemente, a

partir criterios del investigador (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Cárdenas et al., 2015) (Lewandowska et al., 2015).

5.2.3. Análisis del impacto (Life-Cycle Impact Assessment – LCIA)

La asociación de los datos inventariados con las categorías de impacto seleccionadas (GWP, GHG, CED, eutrofización, uso del suelo, uso del agua, acidificación, residuos sólidos, agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos, contaminación del aire o del agua, entre otros) y el cálculo resultante de los indicadores de estas categorías caracterizan a este paso (Evangelista et al., 2018) (Islam et al., 2015). La Tabla 40 lista las categorías de impacto más comunes encontradas en la literatura con sus respectivos indicadores, para cada categoría de impacto pueden existir varios modelos de caracterización, cada uno con sus diferencias y particularidades (Hernández-Sánchez, 2013).

Dos métodos existen para realizar la evaluación de impacto, los orientados al problema (midpoint) y los orientados a los daños (endpoint) (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Los puntos medios (midpoints), frecuentes en los ACV en viviendas, son considerados como un punto intermedio en la cadena causa-efecto de una categoría de un impacto particular antes del punto final (endpoint), por ejemplo, las categorías GWP y cambio climático corresponden a puntos medio y final respectivamente. Así, el método de evaluación de impacto “midpoint” considera efectos intermedios y el método “endpoint” el efecto final o último del impacto. Las categorías de impacto “midpoints” están más cercanas a la intervención ambiental, lo que permite establecer modelos de cálculo que se ajustan mejor a dicha intervención, proporcionando información más específica sobre cómo el medio ambiente se verá afectado. En cambio, las categorías de impacto “endpoint” están asociadas a daños que afectan a la sociedad, tales como la salud humana, la calidad del ecosistema y el agotamiento de recursos (ver Fig. 5.5) y a menudo su estimación asocia una alta incertidumbre lo que hace recurrente el uso de categorías de impacto intermedias o “midpoints” (Bovea & Powell, 2016)(Ismaeel, 2018) (Hernandez et al., 2018).

Fig. 5.5 Categorías de impacto intermedio (Midpoint) y final (Endpoint). Fuente: (Hernandez et al., 2018).

Tabla 40. Identificación de categorías de impacto frecuentes

Categoría de impacto	Indicador de categoría	Modelo de caracterización	Factor de caracterización	Unidad
Cambio climático	Forzamiento radiativo	IPCC	GWP	CO ₂ -eq
Disminución de la capa de ozono	Degradación del ozono estratosférico	WMO	ODP	CFC-11-eq
Acidificación	Carga crítica de acidez	RAINS	AP	SO ₂ -eq
Eutrofización	Enriquecimiento de nutrientes	CARMEN	EP	PO ₄ ³⁻ -eq
Oxidación fotoquímica (<i>smog</i>)	Formación de ozono troposférico	UNECE Trajectory	POCP	C ₂ H ₄ -eq
Toxicidad humana	PDI/ADI	EUSES o CalTOX	HTP	C ₆ H ₄ Cl ₂ -eq
Eco-toxicidad	PEC/PNEC	EUSES o CalTOX	AETP y TETP	C ₆ H ₄ Cl ₂ -eq
Disminución de recursos abióticos	Reserva final/uso anual	Guinée & Heijungs 95	ADP	Sb-eq

Fuente: (Hernández-Sánchez, 2013)

Conforme a la Fig. 5.2 Fig El LCIA consta de los elementos de selección, clasificación y caracterización que son mandatorios y, de los elementos de normalización, agrupación y ponderación que son opcionales (estos pueden realizarse según el objetivo y el alcance del estudio de ACV). Estos se explican a continuación (Hernandez et al., 2018):

- a. Selección: Corresponde al primer paso en el análisis del impacto (LCIA), pues es necesario seleccionar las categorías de impacto que se considerarán como parte del ACV. Este paso debería completarse como parte de la fase inicial en la definición del objetivo y alcance del ACV, pues permitirá guiar el proceso de recopilación de datos de inventario ambiental (LCI).
- b. Clasificación: El propósito de la clasificación es organizar y posiblemente combinar los resultados de los datos del inventario ambiental (LCI) en categorías de impacto.
- c. Caracterización: A través de la caracterización, los datos de inventario ambiental (LCI) ya categorizados son transformados en impactos. Utilizando las metodologías “midpoint” o “endpoint” en el LCIA. Varias metodologías existentes se muestran en la Tabla 41.
- d. Normalización: Cálculo de la magnitud de los resultados del indicador de categoría en relación con la información de referencia. El objetivo de la normalización es comprender mejor la magnitud relativa de cada resultado del indicador del edificio en estudio.
- e. Agrupación: Asigna categorías de impacto en uno o más conjuntos para facilitar mejor la interpretación de los resultados en áreas específicas de interés. Por lo general, la agrupación implica la clasificación o jerarquización de indicadores.

Tabla 41. Principales metodologías de evaluación del impacto en el ACV

Methodology	Description
<i>Midpoint approach</i>	
CML	The CML method groups the impact categories into two groups: Obligatory impact categories (base line impact categories) which are the impact categories used in most LCA studies, and additional impact categories which are operational impact categories that are dependent on the study requirements.
EDIP 2003	Midpoint method with normalization. Site-dependent characterization for European countries for most non-global impact categories
TRACI 2002	Midpoint oriented methodology developed by the Environmental Protection Agency (EPA) in USA
<i>Endpoint approach</i>	
Ecoindicador 99	Endpoint, including Normalization and default weighting sets
EPS 2000	Category indicators at endpoint level +weighting
Ecopoints7	Endpoint methodology, where the endpoint categories are specified according to political targets
JEPIX	The JEPIX methodology was released based on the Eco scarcity method but changing the political targets according to the Japanese political agenda and its environmental conditions.
<i>Combined midpoint and endpoint approach</i>	
IMPACT 2002+	Impact 2002+ is a methodology that combines the two approaches to damage modeling (midpoint and endpoint oriented method)
RECIPE	The Recipe methodology development was conducted by the cooperation of many developers, and follows a combined midpoint and endpoint approach. The indicator scores are determined in a similar way as in the EI99 method
LIME	The method was developed for quantifying the environmental impacts that are induced by environmental loads in Japan
LUCAS	The LUCAS method (LCIA method for a Canadian-Specific context) is an LCIA methodology similar to the RECIPE, Impact 2002+, and LIME methods

Fuente: (Hernandez et al., 2018).

- f. Ponderación: Es el proceso de convertir los resultados de los indicadores de diferentes categorías de impacto mediante el uso de factores numéricos basados en elecciones de valor. Estos factores confieren una importancia relativa a las distintas categorías de impacto que luego son sumadas para obtener un resultado ponderado como único índice ambiental global del sistema (Antón Vallejo, 2004).

En los estudios de ACV para el sector de la construcción, la normalización, la agrupación y la ponderación generalmente no se aplican y no se consideran dentro de la norma EN 15978 (Hernandez et al., 2018).

5.2.4. Interpretación

La interpretación del ciclo de vida es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, verificar y evaluar la información de los resultados del análisis de inventario y el análisis de los impactos ambientales. Los resultados de la interpretación pueden tomar la forma de conclusiones y recomendaciones para el estudio y sirven de referencia para la toma de decisiones de las partes interesadas. La Tabla 42 muestra la relación de los distintos actores de la edificación que intervienen en el ciclo de vida de la edificación, así como las fases en las que se toman decisiones.

Obtenidos los indicadores para los impactos que han sido caracterizados en el ACV de la vivienda, estos son interpretados conforme a los objetivos y el alcance que han sido definidos para evaluar la edificación. Esta interpretación permite, conforme a la Fig. 5.2, aportar a la toma de decisiones, destacar oportunidades de mejoras en el desempeño ambiental de un edificio, o bien, concluir en torno a los impactos de los materiales o de los subsistemas de construcción en el edificio (Evangelista et al., 2018) (Cabeza et al., 2014). En esta etapa se validan resultados comparándolos con otras investigaciones publicadas y realizando análisis de sensibilidad para evaluar la confiabilidad de las bases de datos no locales (Abd Rashid & Yusoff, 2015).

Consecuentemente, en la interpretación se deben identificar los problemas importantes asociados a la definición del objetivo y alcance del ACV, evaluar los resultados en términos de generar comprensión, confianza y credibilidad de los resultados y, establecer conclusiones, limitaciones y recomendaciones al ACV (Hernandez et al., 2018).

Tabla 42. Relación de los agentes de la edificación y las fases en la toma de decisiones

Agentes	Diseño	Producto	Construcción	Uso	Fin de vida
Promotor					
Proyectista					
Constructor					
Dirección facultativa					
Entidades de control de calidad					
Suministradores					
Propietarios					
Usuarios					
Instituciones financieras					
Compañías aseguradoras					
Gestor de residuos					
Administración					

Fuente: (Hernández-Sánchez, 2013)

5.3. Consideraciones en las fases del ciclo de vida.

a. Fase de materiales

Conforme Fig. 2.3 más atrás, esta fase asocia los procesos A 1-3. Es decir, incluye aquellos procesos que proporcionan la energía y los insumos, los procesos de transporte (transporte hasta la puerta de la fábrica y transporte interno) y el proceso de manufactura, así como también el procesamiento de cualquier desperdicio que surja de estos procesos. Esta etapa define, por tanto, la carga ambiental a los productos de construcción.

En esta fase se mensuran todos los elementos que constituyen la edificación. Esta cuantificación cubre los materiales de construcción y todos los subproductos de construcción, de modo que el edificio en sí mismo pueda ser considerado como un producto final derivado de la sumatoria de los elementos que le constituyen. Esta visión multiproductos para una edificación se muestra en la Fig. 5.4.

Fig. 5.6 Esquema de multiproductos en un edificio. Fuente: (Claudia Muñoz, 2013)

De este modo, conforme a la Fig. 5.6, si se tiene el inventario ambiental a nivel de elemento (nivel 2) será más sencillo determinar la carga ambiental del edificio. Este se presenta en general para sistemas complejos como lo son los equipos HVAC, las ventanas, las puertas, etc. elementos que derivan de un proceso industrializado de producción y que podrían contar con la declaración ambiental de producto (EPD). Si se parte desde el nivel de materiales (nivel 4), por ejemplo para una albañilería, entonces se tendrán que determinar los impactos conforme a los coeficientes de paso respectivos para la energía incorporada o las emisiones de CO₂ equivalentes en el proceso de construcción del componente (nivel 3). En general, se considera como unidad funcional el kilogramo. Ahora bien, los kilogramos de material que se necesitarán dependerán de la eficiencia del proceso productivo, donde las pérdidas variarán dependiendo de la competencia de los trabajadores, de la tecnología, de las condiciones de trabajo, entre otras variables vinculadas a la producción in-situ de los

elementos o subproductos de construcción. En Chile estas pérdidas rondan, en general, entre el 5% y 15% dependiendo del elemento constructivo que se trate (ONDAC, 2018).

Los rendimientos permitirán determinar los materiales o productos realmente consumidos en el edificio. Cantidades que multiplicadas por los coeficientes de paso – para los indicadores de las categorías de impacto de interés – por ejemplo, energía y carbón incorporados (MJ/kg y kgCO₂eq/kg, respectivamente), permitirán determinar la energía incorporada (en MJ o kWh) y las emisiones de efecto invernadero (en kgCO₂eq) asociadas al edificio. Esto queda planteado, para cualquier categoría de impacto, en la Fig. 5.7.

Fig. 5.7 Determinación del impacto ambiental por categoría de impacto ambiental. Fuente: (Gregory, 2017).

El carbón y energía incorporados en los materiales de construcción dependen del proceso de producción (eficiencia, tecnología, tipo de energía, etc.), de la disponibilidad de las materias primas en los alrededores (disponible a nivel local, trasladada dentro del país o importada), del tipo de combustible utilizado, del momento de medición (tiempo), de los supuestos en los cálculos, entre otras variables que hacen que la EE y el carbón incorporado dependan fuertemente de aspectos locales (Dixit, 2017). Esto explica la variabilidad que presentan los coeficientes de pasos en las diferentes investigaciones que abordan análisis de ciclo de vida en edificaciones. Esto se aprecia en la Tabla 43, donde la EE para la madera, el acero y el hormigón, a partir de datos extraídos de la literatura y donde el rango para todos los

datos (“all databas sources”) corresponde a 250 fuentes recolectadas para estos tres materiales (Hammond & Jones, 2008). Teniendo esto en consideración, existen varias bases de datos de inventario ambiental de materiales útiles para realizar los ACV en edificaciones.

La Tabla 44 muestra una comparación de bases de datos conocidas conforme a 6 características de contraste, mostrando que Ecoinvent y GaBi resultan ser las bases de datos más completas para realizar los ACV, y ELCD (European reference Life Cycle Database) la mejor base de datos gratuita aunque descontinuada el 28 de junio de 2018. A modo de ejemplo la Tabla 45 muestra la energía y el carbón incorporados en algunos materiales de construcción a partir de la base bases de datos de productos de la construcción BEDEC.

Tabla 43. Análisis comparativo de energía incorporada en madera, acero y hormigón.

Selected source	Embodied energy: MJ/kg		
	Steel	Timber	Concrete
Alcorn <i>et al.</i> ^{27,28}	35.9	0.3–24.2	0.81–2
Eaton and Amato ²⁹	31	13–36	0.84–1.36
Franklin Associates ³⁰	44.6	14.9	–
West <i>et al.</i> ³¹	32	5.7–10	–
Berge ³²	25	3–16	1
All database sources	6–81.8	0.3–61.3	0.07–23.9

Fuente: (Hammond & Jones, 2008)

Tabla 44. Comparación de bases de datos de inventario de materiales a partir de 6 características.

FEATURE	Criterion	Ecoinvent	ELCD	GaBi	PlasticsEurope	Athena	U.S.LCI	Base Carbone	BEDEC	CPM LCA	ProBas
SCOPE	Territory	+++	+++	+++	+++	++	+	+	+	+	+
	Categories	+++	++	+++	+	+++	+++	+++	+++	++	+++
COMPLETENESS	Variety	+++	++	+++	+++	++	++	++	+++	++	+++
TRANSPARENCY	Traceability	+++	+++	+++	+++	N.A.	+	+++	–	+++	+++
	Methodology	+++	+++	+++	+++	N.A.	++	+	–	++	++
COMPREHENSIVENESS	Documentation	+++	+++	+++	+++	N.A.	+	+	–	+++	+
	Last update	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2013	2013	2008	2012
LICENCE	Required	Yes	No	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No

Fuente: (Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán, & Marrero, 2016)

Tabla 45. Energía y carbón incorporado en materiales según base BEDEC.

Tipo	Material	ρ (kg/m ³)	Energía Incorporada		Emisiones
			MJ /kg	kWh /kg	kgCO ₂ /kg
Aislamiento convencional	EPS - poliestireno expandido (0,037 W / mK)	30	117.1	32.5	17.3
Aislamiento natural	aglomerados de corcho natural	160	3.0	0.8	0.2
Bituminoso	Asfalto	2100	3.4	0.9	0.5
Caucho	caucho celular	70	110.0	30.6	16.3
Cerámica	Azulejos de cerámica	2300	11.1	3.1	0.6
Cerámica	Las baldosas del suelo	2500	10.9	3.0	0.8
Yeso	Desnatado Yeso (1000 < ρ < 1300)	1150	1.8	0.5	0.2
Bloque cerámico de arcilla aligerada	bloques de cerámica con mortero aislante (140 mm de espesor)	1020	2.6	0.7	0.2
Bloque de hormigón ligero	bloques de hormigón ligero (espesor anulados 250 mm)	760	5.3	1.5	0.5
Bloque de hormigón convencional	bloques de hormigón convencional (espesor de 100 mm)	1210	1.3	0.3	0.2
Ladrillo	1 metro o catalán pedestal de ladrillo macizo (40 mm < espesor < 50 mm)	2140	2.3	0.6	0.2
Ladrillo	tabique de ladrillo hueco doble (60 mm < espesor < 90 mm)	930	2.3	0.6	0.2
Forjado unidireccional	Losas unidireccionales con relleno de viga de hormigón (profundidad 250 mm)	1330	2.7	0.8	0.3
Hormigón	Hormigón armado (2300 < ρ < 2.500)	2400	0.5	0.1	0.1
Losa de núcleo hueco	Con capa de compresión (profundidad 200 mm)	1810	3.7	1.0	0.4
Madera	Tableros de fibra orientada - OSB (ρ < 650)	600	15.0	4.2	1.4
Metal	Acero	7800	35.0	9.7	2.8
Morteros	Cemento o mortero de cal para albañilería (1000 < ρ < 1250)	1125	0.8	0.2	0.1
Pisos	Granito (2500 < ρ < 2700)	2600	0.2	0.1	0.0
Plástico	policarbonato	1200	79.0	21.9	11.7
Pinturas	Pintura de emulsión	50	20.0	5.6	3.0
Cristales	Doble acristalamiento, con acabado transparente placa de vidrio, de 4 mm de espesor cada una, y un espacio de aire de 6 mm	2530	349.9	97.2	21.8
Marcos	Marco de aluminio lacado con dos bisagras, hojas de tubo de acero galvanizado pre-marco y puerta enrollable de aluminio lacado de distancia de aproximadamente 120 x 120 cm	2700	5416.2	1504.5	755.1
Puertas	Interior puerta de madera en el interior de sapelly barnizadas de entrada de aproximadamente 70 x 200 cm	700	213.9	59.4	21.8

Fuente: (Quispe, 2016)

La energía incorporada inicial (IEE - Initial Embodied Energy) y la Energía total incorporada en el ciclo de vida del edificio (LCEE - Life-Cycle Embodied Energy) varía significativamente entre las diferentes regiones del mundo, como también entre los diferentes tipos de edificios conforme a su materialidad predominante. Un estudio sobre el análisis de ciclo de vida en edificios residenciales expuso la variabilidad que se muestra en la Tabla 46. Evidenciando además, en términos promedios, que las viviendas en madera resultan ser más sustentables para los indicadores de impacto que se indican.

Tabla 46. Resultados energéticos incorporados para diferentes tipos de construcciones residenciales.

Indicador de impacto energético en la vivienda	Viviendas de Ladrillo	Viviendas de Madera	Viviendas de concreto	Viviendas en acero
IEE máx. (GJ/m ²)	16,3	6,6	23,1	19,2
IEE prom. (GJ/m ²)	5,7	3,3	5,2	8,1
IEE mín. (GJ/m ²)	0,9	0,9	0,9	0,9
LCEE máx. (MJ/m ² año)	515,7	362,4	484,9	516,6
LCEE prom. (MJ/m ² año)	144	115,6	152,5	309,3
LCEE mín. (MJ/m ² año)	24,2	24	22,4	50,7

Fuente: (Dixit, 2017)

b. Fase de construcción

Esta etapa cubre los procesos unitarios desde la puerta de fábrica de los diferentes productos de construcción hasta la finalización práctica de los trabajos de construcción, es decir, asocia los procesos A 4-5 de acuerdo con la Fig. 2.3 más atrás. En esta etapa se mensura toda la energía y los recursos asociados al transporte de materiales y procesos de construcción (uso de maquinaria, herramientas, equipos, etc.). Esto incluye las obras e instalaciones provisionales y otros impactos discontinuos o temporales durante el proceso de construcción, como también todos los impactos y aspectos relacionados con las pérdidas debidas a la construcción y los procesos de gestión de residuos generados en el sitio de construcción (Hernandez et al., 2018).

La fase de construcción no representa una etapa incidente en el ciclo de vida de la edificación para las categorías de impacto más frecuentes (GWP/CED). Esto se desprende del análisis de la Tabla 37 más atrás. Tampoco se esperaría fuera incidente en el futuro, pues la industria de la construcción propende al desarrollo de procesos de producción cada vez más eficientes, vinculados especialmente a la industrialización y el uso de la tecnología (Craveiro, Duarte, Bartolo, & Bartolo, 2019). Esto incidiría positivamente en la sustentabilidad de las edificaciones, pues se trata de procesos de diseño y producción de edificios que son optimizados, que sumado a la

producción bajo contextos controlados, se propicia la productividad y, por tanto, la disminución de los desechos y emisiones contaminantes al medioambiente.

Con respecto al transporte de materiales a obra, estas distancias varían de proyecto en proyecto, dependen de la distancia a los centros de distribución y obedecen también a la naturaleza del proyecto, y quizás sea necesario importar un material que deba recorrer miles de kilómetros antes de llegar a destino. Además, el transporte varía de acuerdo al tipo de material o producto que se movilice (Evangelista et al., 2018). También una variable importante en esta etapa, la que definirá la carga asociada a las emisiones de GEI, es el tipo de combustible que utilizarán los vehículos de transporte, las herramientas, las maquinarias y otro tipo de equipamiento durante la construcción. El que puede ser electricidad, diésel, gas u otro tipo. Los coeficientes de paso respectivos, conforme a la Tabla 3 en el título 2.3.2 más atrás considerados en esta investigación son 0,4187 kgCO₂eq/kWh para electricidad, 0,2272 kgCO₂eq/kWh para gas licuado de petróleo (LPG) y para diésel 0,2667 kgCO₂eq/kWh.

c. Fase de uso

Esta etapa cubre el período desde la finalización práctica de los trabajos de construcción hasta el momento en que el edificio se deconstruye o demuele. Por tanto, y conforme Fig. 2.3 más atrás, esta fase asocia los procesos B 1-7. Los impactos y aspectos de los electrodomésticos, muebles y accesorios que no están relacionados con la construcción pueden evaluarse por separado. Cuando este sea el caso, estos impactos y aspectos se registrarán, informarán y comunicarán por separado (Hernandez et al., 2018).

En esta etapa se mensuran todos los recursos materiales y energéticos consumidos por la edificación durante su uso, lo que es proporcional al horizonte de análisis (en general 50 años, según Fig. 5.4). Esto involucra, además de la energía operacional, todos los recursos necesarios para que la edificación mantenga su estado funcional, es decir, se incluyen mantenciones, reparaciones, reemplazos de elementos y la rehabilitación. También se incluye el uso del agua operacional,

aunque es menos frecuente el análisis de su impacto en los ACV en viviendas, lo que podría deberse a la falta de desarrollo o consenso sobre los métodos de evaluación de estos impactos o la falta de conciencia suficiente de un impacto particular (Anand & Amor, 2017).

Conforme a la Tabla 37, esta fase resulta ser más incidente en el ACV de viviendas para las categorías de impacto CED y GWP (GHG), llegando a representar hasta el 96% y 93% respectivamente para los casos de estudio que se presentan en la Tabla 37. Cabe señalar que en análisis simplificados se prescinde de los procesos de mantenimiento y otros de menor incidencia, y se concentra el análisis en el consumo operacional, donde la energía consumida para generar las condiciones de confort térmico es la más incidente (Zabalza Bribián et al., 2009) (Abd Rashid & Yusoff, 2015) (Anand & Amor, 2017). La determinación de este consumo se puede determinar a partir de análisis estacionarios o dinámicos, como se muestra en los títulos 2.5.2 y 2.5.5 más atrás.

d. Fase de desuso

Esta etapa comienza cuando el edificio es desmantelado y no se pretende que este tenga un destino distinto al del término de su vida útil. Por tanto, y conforme Fig. 2.3 más atrás, esta fase asocia los procesos C 1-4. En este punto del ACV, la demolición y/o deconstrucción del edificio puede considerarse como un proceso de salida múltiple que provee una fuente de materiales, productos y elementos de construcción que deben descartarse, recuperarse, reciclarse o reutilizarse (Hernandez et al., 2018).

En esta fase se mensuran todos los recursos materiales y energéticos necesarios en la deconstrucción y/o demolición, como asimismo el transporte asociado a esas actividades y el procesamiento de desechos y su disposición a botadero. Conforme a la Tabla 37 no resulta ser una etapa incidente para las categorías de impacto frecuentes, por lo que no es habitual su incorporación en investigaciones de ACV en viviendas. Sin embargo, investigaciones recientes identifican que es una etapa importante debido al potencial de reciclaje de los materiales de construcción, lo que

disminuye el impacto del ciclo de vida y propende a la economía circular (Abd Rashid & Yusoff, 2015). En la Fig. 5.8 y en Tabla 47 se muestran los límites del sistema para el análisis de esta etapa y la composición de desechos de un edificio de referencia.

Fig. 5.8 Límites del sistema de la fase de término de la vida útil para un edificio de referencia. Fuente: (Vitale et al., 2017)

Tabla 47. Composición de desechos de construcción y demolición (CDW) generados en un edificio de referencia.

C&DW fraction	Tonnes	%
<i>Inert materials</i>	3227	80.0
Concrete	2290	56.70
Ceramic tiles	43.3	1.07
Adhesive mortar	6.5	0.16
Lime	0.4	0.01
Sand	529	13.11
Stucco	7.2	0.18
Base plaster	88	2.18
Cement mortar	61.5	1.52
Light clay brick	201	4.98
<i>Metals</i>	93.2	2.3
Steel and iron	92	2.28
Copper	1.1	0.03
Brass	0.1	0.00
<i>Plastics</i>	11.3	0.3
Polystyrene	5.5	0.14
Polyethylene	0.6	0.01
PVC	0.7	0.02
Bitumen seal	4.5	0.11
<i>Others</i>	702.8	17.4
Glass	2.1	0.05
Wood	5.7	0.14
Mixed fraction (not recovered)	695	17.22

Fuente: (Vitale et al., 2017)

5.4. Limitaciones de ACV en viviendas sociales chilenas

Chile no presenta una base de datos de inventario ambiental que permita recoger datos de materiales y productos de la construcción, sin embargo, en el pasado existieron esfuerzos por crear una base denominada ECOBASE que, según el portal de Construcción Sustentable (<http://csustentable.minvu.gob.cl/>), declara que contendría *“información ambiental para los principales materiales empleados en la construcción que, bajo la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), permita apoyar la toma de decisiones de diversas empresas de la cadena de valor de la construcción, desde el diseño a las inversiones, para incorporar atributos sustentables requeridos por el mercado para fortalecer su competitividad”* (CSustentable, 2018).

La base de inventario ambiental referenciada no está disponible y, conforme al “2do. Informe de Avance Revisión Técnica ECOBASE Construcción”, para la concreción de los primeros coeficientes de paso ambiental se necesitó de fuentes de información secundaria proveniente de bibliografía o de base de datos ambientales como Ecoinvent, entre otros (IDIEM, 2015). Por tanto, tampoco se puede establecer con precisión que los datos que se propusieron inicialmente responden a la realidad Chilena.

La falta de una base de inventario ambiental para materiales de construcción al día de hoy se puede deber a que algunas empresas productoras chilenas no desean transparentar sus procesos productivos. Esto se evidencia en la negativa de participar de las empresas de ladrillo y hormigones en el proceso de recolección de información primaria para la generación de ECOBASE (ver Tabla 48)

Tabla 48. Empresas productoras de materiales importantes en Chile y su decisión de entregar información primaria para desarrollo de base de inventario ambiental.

ACERO	YESO CARTÓN	HORMIGÓN	MADERA	LADRILLO
CAP y GERDAU: Datos recolectados, revisados, completados, verificados.	ROMERAL y VOLCÁN: Datos recolectados, revisados, completados, verificados.	TRANSEX: Datos recolectados, revisados, completados, verificados. POLPAICO: Finalmente Ricardo Figueroa, encargado de Medio Ambiente comunica la <u>no</u> participación de la empresa en Ecobase Construcción.	CMPC y MASISA: Datos recolectados, revisados, completados, verificados.	CERÁMICAS SANTIAGO: Finalmente decidió <u>no</u> concretar la firma del acuerdo de confidencialidad.

Fuente: (IDIEM, 2015)

Oyarzo y Peuportier (2014) ya habían identificado la carencia de información ambiental en Chile a partir del ACV en una vivienda social, estableciendo en sus conclusiones que la provisión de datos ambientales sobre los materiales de construcción chilenos y sudamericanos y de otros procesos (por ejemplo, la producción de electricidad y agua, el tratamiento de residuos) serían útiles para mejorar la precisión y la relevancia de los estudios de ACV en las viviendas chilenas, sugiriendo además una relación más estrecha entre los fabricantes, empresas de construcción, ingenieros y arquitectos (Oyarzo & Peuportier, 2014)

Pese a este escenario, existen algunas empresas productoras de materiales que ya cuentan con declaraciones ambientales para algunos de sus productos o materiales de construcción (EPD o DAP) como son, por ejemplo Volcán y Gerdau Aza. Esto en base a las normas ISO 14025 y EN 15804 (Volcán, 2016) (GERDAU, 2017). Sin embargo, empresas de hormigones, ladrillos y madera, no presentan EPD a la fecha para sus productos (LIGNUM, 2018). En este contexto, el año 2018 el MINVU lanzó el “Manual para la Implementación de Declaraciones Ambientales de Productos de Construcción” en respuesta a la necesidad de estandarización y de requerimientos de certificaciones sustentables de viviendas (LEED, DGNB, BREEAM, otras) y, como establece el documento, busca “...orientar y apoyar el proceso de desarrollo de declaraciones ambientales aplicables a la realidad nacional y la adopción de medidas concretas para mejorar el desempeño de los productos de construcción...” (MINVU, 2018b)

Frente a la carencia de una base de inventario medioambiental para Chile. La Tabla 49 propone coeficientes de paso para la energía y carbón incorporados en los materiales de construcción habituales. Los que están asociados al caso de estudio “Caso 3: Análisis de ciclo de vida en viviendas, caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social” que será abordado en el título 6.3 más adelante. Para la elaboración de la Tabla 49 se tomó en consideración la siguiente bibliográfica: a) La base de datos ambiental Ecoinvent v.2 (ecoinvent, 2007), b) La base de datos ICE v.2.0 2011 (Circular Ecology, 2011), c) La base de datos BEDEC (ITeC, 2018), d) Las declaraciones ambientales para productos de construcción disponibles en Chile, e) el informe “Desarrollo de factores de emisión específicos para el programa HuellaChile” (Estay & Ovalle, 2017) y f) el reporte “LCA databases focused on construction materials: A review” (Martínez-Rocamora et al., 2016). En torno a esta información se evidenciaron las variaciones en los coeficientes de paso de energía y carbón incorporados a partir de la razón entre el rango y el promedio entre el máximo y mínimo valor (columna variación en Tabla 49). Asimismo, se propuso un valor considerando las tipologías en las viviendas sociales (ver apartado 3.6 más atrás) y la tecnología esperada para el caso de estudio definido en apartado 6.3 más adelante. Estos valores aparecen en la columnas “propuesto” de la Tabla 49. También fue calculada una media geométrica entre la variación de los coeficientes de energía y carbón incorporados (columna MGV en Tabla 49).

De acuerdo con la Tabla 49, se evidencia que los materiales metálicos (aluminio, acero construcción y cobre) presentan una alta variabilidad. Lo que es debido, principalmente, a la consideración o no de material reciclado en el proceso productivo (es muy distinta la carga ambiental cuando se considera materia prima reciclada en la producción). En otros materiales como el yeso cartón o la cerámica, la variabilidad guarda relación con diferencias en las cargas ambientales asociadas a procesos productivos diversos (tipo de combustible usado, métodos de producción, obtención y tipo de materias primas, etc.). Por otro lado, la madera presenta una variabilidad importante. Esta es debida a la alta variabilidad en productos, familias (densidad, humedad de equilibrio, etc.) y consideraciones para la producción (Calkins, 2009). Además, en los análisis de ciclo de vida, puede considerarse un carga negativa derivada del efecto positivo del secuestro permanente del carbono biogénico o de su reutilización como combustible en sustitución de otro en la etapa de desecho (efecto

sustitución) (Kuittinen & Linkosalmi, 2015) (Fouquet et al., 2015). Otro caso a considerar son las pinturas, las que muestran una menor carga ambiental cuando son producidas en base agua versus las producidas con base a solventes (Circular Ecology, 2011).

Tabla 49. Energía y carbón incorporados en materiales de construcción.

Materiales	Densidad (kg/m3)	Energía (MJ/kg)				Carbón (kgCO2/kg)				MGV
		Mínimo	Máximo	Variación	Propuesto	Mínimo	Máximo	Variación	Propuesto	
Hormigón	2400	0,618	0,99	0,46	0,7	0,122	0,151	0,21	0,112	0,31
Acero construcción	7800	21,5	35	0,48	27,9	1,42	3,27	0,79	1,71	0,61
Lana de roca	30	13	22,6	0,54	13	1,05	1,46	0,33	1,46	0,42
Poliestireno expandido	10	83,81	106	0,23	93,3	2,07	4,39	0,72	4,2	0,41
Aluminio	2700	134,85	160	0,17	136	1,89	15,5	1,57	8,54	0,52
Cerámica	1920	10	15,3	0,42	12	0,25	0,81	1,06	0,74	0,67
Ladrillo MqH	1000	2,84	3	0,05	2,84	0,16	0,24	0,40	0,22	0,15
Madera pino insigne	410	3	10	1,08	4,5	0,41	1,09	0,91	0,41	0,99
Morteros y estucos	2000	1	1,5	0,40	1,33	0,14	0,22	0,44	0,19	0,42
Pinturas	-	59	97	0,49	69,9	2,54	3,76	0,39	2,516	0,43
PVC	1380	61,1	80	0,27	64,85	2,36	3,23	0,31	2,36	0,29
Yeso Cartón	650	3,3	6,75	0,69	6,1	0,125	0,39	1,03	0,38	0,84
Vidrio	2500	11,5	19	0,49	15	0,59	0,91	0,43	0,85	0,46
Acero Galvanizado	7850	22,6	69,1	1,01	38	1,54	6,15	1,20	2,32	1,10
Cobre	8600	16,5	57	1,10	42	0,74	3,81	1,35	2,8	1,22
Fibrocemento	1000	10,4	15,3	0,38	10,5	0,67	1,28	0,63	0,67	0,49

6. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO

6.1. Caso 1: Contraste de la demanda de energía para calefaccionar una vivienda con baja inercia por absorción a partir de un análisis estacionario y dinámico

6.1.1. Introducción al caso

Con el propósito de comprender las variables de eficiencia energética en viviendas, vinculadas a la determinación de la demanda de energía para generar las condiciones de confort térmico a partir de un análisis estacionario, se modelará la vivienda social descrita en el apartado 6.1.3 conforme de las ecuaciones definidas en el apartado 2.5.2 más atrás. Luego los resultados serán contratados con los obtenidos para la vivienda a partir de una simulación dinámica. Para esto será utilizando el programa CCTE definido en el apartado 2.5.5 más atrás (Fig. 2.81 más atrás).

En este contexto, se han definido los siguientes objetivos para el caso de estudio: a) Determinar la energía para calefaccionar y refrigerar la vivienda bajo régimen estacionario, b) Contrastar los resultados con los obtenidos en la modelación de la vivienda en programa CCTE y, c) Analizar las diferencias en los resultados y el desempeño energético de la vivienda para generar condiciones de confort térmico. Desde que la vivienda presenta baja inercia por absorción (El panel SIP usado presenta una densidad de 140kg/m^3 , ver Fig. 6.2), se plantea como hipótesis que los resultados no presentarán una diferencia importante para los meses de invierno, es decir, cuando se necesite de energía para calefaccionar ($T_{\text{interior}} > T_{\text{exterior}}$).

6.1.2. Aspectos metodológicos

Serán recolectados los inputs necesarios para determinar la energía requerida para generar las condiciones térmicas de confort durante un año. Esto, conforme a la determinación de P_i' a partir de la ecuación de balance de calor ($P_i + Sc_v + Sc_o = Q_v + Q_t$) establecido en el apartado 2.5.2 más atrás. El resultado para P_i' definirá los requerimientos de calefacción o refrigeración (ver esto en la página 112). Entre estos inputs destacan:

- a) La radiación solar incidente, la que ha sido tomada del registro solarimétrico de Chile (CNE/PNUD/UTFSM, 2008),
- b) Las temperaturas promedio exteriores presentes en la norma NCh1079 (INN, 2008),
- c) Condiciones de potencia interna promedio en una vivienda con equipamiento tradicional equivalente a $100\text{Wh/m}^2\text{día}$ (H. Hernández, 2016),
- d) Factores solares en ventanas con vidriado monolítico igual a 0,85 y absorptividad térmica para materiales de construcción promedio igual a 0,75 conforme a los parámetros definidos en el apartado 2.5.1 más atrás,
- e) Temperatura de confort igual a 20°C y tasa de renovación de aire promedio derivada de ventilación e infiltraciones igual a 1h^{-1} ,
- f) Se consideran puentes térmicos en sobrecimientos para pisos corrientes según NCh853 de tasa igual a $1,4\text{W/m}^\circ\text{C}$,
- g) Para los cálculos de transmitancias, y otros factores, se considera la norma chilena NCh853, ver Anexo 2, y
- h) Se considera entretecho completamente ventilado. Los resultados obtenidos serán contrastados con los obtenidos de la modelación de la vivienda en el programa CCTE, conforme a lo establecido en el apartado 2.5.5 más atrás.

La Fig. 6.1 muestra la interface para el ingreso de datos iniciales en el programa y, la Fig. 6.4 contrata la vivienda en proceso de construcción con su simulación tridimensional en el programa CCTE.

The screenshot shows the CCTE software interface with the following sections:

- Información climática:** Region: Del Lib. Grl. Bdo. O'Higgins, Comuna: RANCAGUA Zona 3, Latitud: -33.00, Altitud: 500.00.
- Orientación del edificio:** Ángulo: 270.00, with a compass rose diagram.
- Tipo edificio:** Vivienda unifamiliar (selected), Vivienda en bloque.
- Datos del Proyecto:** Nombre del proyecto: Vivienda Biocasa Modular Termo Estructural, Region: Del Lib. Grl. Bdo. O'Higgins, Comuna: Rancagua, Dirección: XXXXX.
- Datos del Evaluador:** Nombre: HÉCTOR ENRIQUE HERNÁNDEZ LÓPEZ, Empresa o Institución: Universidad Central de Chile, E-mail: XXXXX, Teléfono: XXXXX.

Fig. 6.1 Interface para definir el nombre y la ubicación geográfica del proyecto en Software CCTE.

Fig. 6.2 Panel SIP 75mm de espesor. Fuente: (Termocret, 2019)

6.1.3. Descripción de la vivienda caso de estudio

Corresponde a una vivienda social denominada “Biocasa Modular Termo Estructural” (BMTE). Esta vivienda fue diseñada para responder a la reconstrucción post sismo el 27 de febrero de 2010 y presenta un costo de construcción aproximado de 380UF. La vivienda está certificada por la División Técnica de Estudios del MINVU según registro DITEC-0022-NTC-01-57 y, por tanto, atribuible a subsidio CSP (Construcción en Sitio Propio, subsidio que permite elegir el modelo de la vivienda que cada beneficiario desea construir a partir de un catálogo de proyectos de las diferentes empresas constructoras, previamente certificado por con el SERVIU o la División Técnica de Estudios (DITEC) del MINVU). La vivienda de 57 m² en dos pisos (ver Fig. 6.3 y Fig. 6.4), está construida en base a muros y tabiques termo estructurales de tecnología SIP (Structural Insulated Panel).

El muro de panel SIP presenta un espesor de 75mm. Está compuesto por planchas de OSB de 9,5mm de espesor y un alma de poliestireno expandido de densidad 15 kg/m³ y espesor de 56mm, el que está unido al resto de la estructura a través de soleras y montantes de madera de pino impregnado de 41x54mm (ver Fig. 6.2). Estos presentan una transmitancia térmica igual a 0,51 W/m²°C. Estos muros se aprecian en la Fig. 6.3 en color rojo. La vivienda presenta ventanas con vidriado

monolítico de transmitancia térmica igual a $5,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$, puertas de madera de transmitancia térmica igual a $3,4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ y una techumbre con un cielo aislado de transmitancia igual a $0,47 \text{ W/m}^2$. La vivienda está emplazada en la ciudad de Rancagua, la que corresponde a la Zona Térmica 3 conforme al apartado 3.4 más atrás.

Fig. 6.3 Biocasa Modular Termo Estructural.

Las áreas de ventanas con orientación al norte suman 5m^2 , con orientación al sur suman 4m^2 , con orientación al este suman $1,7\text{m}^2$ y al oeste suman $2,4\text{m}^2$. Las superficies de las elevaciones con orientación al norte y sur son de 24m^2 cada una y al este y oeste son 39 m^2 . El área de la puerta principal (este) es de $1,7\text{m}^2$ y al sur $1,6 \text{ m}^2$. El sobrecimiento es de hormigón armado y recorre una longitud de $22,4\text{m}$. La vivienda, en dos pisos, genera un volumen de 285m^3 y presenta una losa de entrepiso estructurada en vigas de madera. La losa entrepiso no es considerada en los análisis, pues se asume que no existe transferencia entre el piso superior e inferior debido a que se asume presentan igual temperatura.

6.1.4. Resultados de la modelación de la vivienda

a. Resultados de modelación en CCTE

La vivienda se modeló en un software de evaluación del comportamiento térmico de edificios en Chile CCTE_ v2.0. (Fig. 6.4). Las consideraciones para la modelación de la vivienda son congruentes con las establecidas para análisis bajo régimen dinámico en el apartado 2.5.5 más atrás. A partir de esto se obtuvo una demanda para calefacción igual a 93,5 KWh/m² y una demanda para refrigeración de 19,1 KWh/m², donde la vivienda de referencia – Aquella que bajo mismas condiciones de diseño y clima cumple con los requerimientos normativos mínimos según OGUC establecidos en el apartado 3.4 “Reglamentación térmica en Chile” – muestra requerimientos de 208,6 KWh/m² y 101,8 KWh/m² respectivamente. Generan ahorros en relación a la vivienda de referencia (la que cumple con la OGUC) de 55,2% y 81,3%, respectivamente. Los resultados se aprecian en la Fig. 6.5.

Fig. 6.4 Biocasa Modular Termo Estructural en proceso de construcción y vistas de la modelación 3D en software CCTE_v2.0.

Fig. 6.5 Resultados para calefacción y refrigeración de BMTE en CTE.

b. Resultados de la modelación estacionaria

Conforme al apartado 2.5.2 y dadas las condiciones de clima y arquitectura establecidas previamente, los meses en los que la vivienda necesitará de calefacción ($T_{\text{interior}} < T_{\text{confort}}$) son: abril (0,1 kWh/m² mes) mayo (13,48 kWh/m² mes), junio (30,51 kWh/m² mes), julio (27,10 kWh/m² mes), agosto (19,05 kWh/m² mes) y septiembre (8,07 kWh/m² mes). La demanda anual para calefacción estimada suma 98,32 kWh/m². Los meses que necesitará de refrigeración ($T_{\text{interior}} > T_{\text{confort}}$) son: enero (35,85 kWh/m² mes), febrero (27,46 kWh/m² mes), marzo (21,30 kWh/m² mes), octubre (3,10 kWh/m² mes), noviembre (15,52 kWh/m² mes) y diciembre (27,39 kWh/m² mes). La demanda anual para refrigeración estimada suma 130,6 kWh/m². Estos resultados se muestran en la Fig. 6.6.

Fig. 6.6 Demanda de energía de calefacción y enfriamiento para BMTE bajo análisis estacionario.

A continuación se ejemplifican los cálculos para el mes más crítico en relación a la demanda de energía resultante (mes junio):

Los resultados del mes de junio para las cargas P_i y Q_v , conforme a las ecuaciones Ecuación 14 y Ecuación 17 son:

$$P_i = (100 * 57) / 24 = 237,5 \text{ W}$$

$$Q_v = 0,34 * 285 * 1 * (T_{im} - T_{em}) = 96,9 \text{ W/}^\circ\text{C} * (20 - 7,9)^\circ\text{C} = 1172,49 \text{ W}$$

La carga solar sobre elementos vidriados suman 718,4W y, sobre elementos opacos suma 122,3W. Estos resultados se desprenden de la Tabla 50 y Tabla 51 respectivamente, ambos calculados a partir de las ecuaciones Ecuación 15: $Scv = \sum(fv * Av * FS * Es / 24) \text{ [W]}$ y Ecuación 16: $Sco = \sum(fo * Ao * \alpha * U * Rse * Es / 24) \text{ [W]}$, respectivamente.

Tabla 50. Determinación de cargas solares en elementos vidriados en BMTE (junio)

	Av	Es	F.S.	fv	W
VENTANAS N	5,0	1933	0,85	1	342,3
VENTANAS S	4,0	800	0,85	1	113,3
VENTANAS E	1,7	1810	0,85	1	109,0
VENTANAS O	2,4	1810	0,85	1	153,8
CARGAS EN ELEMENTOS VIDRIADOS (Scv)					718,4

Tabla 51. Determinación de cargas solares en elementos opacos en BMTE (junio)

Rse = 0,05	Ao	U	Es	α	fo	W
MUROS N	19,0	0,51	1933,1	0,75	0,8	23,4
MUROS S	18,4	0,51	799,7	0,75	0,8	9,4
PUERTA S	1,6	3,4	799,7	0,75	0,8	5,5
MUROS E	35,6	0,51	1810,0	0,75	0,8	41,1
PUERTA E	1,7	3,4	1810,0	0,75	0,8	13,1
MUROS O	18,0	0,51	1810,0	0,75	0,8	20,8
CIELO	57	0,47	1625,9	1,00	0,1	9,1
CARGAS EN ELEMENTOS OPACOS (Sco)						122,3

La tasa de transferencia de calor a través de los elementos de la envolvente, asciende a 191,8 W/°C, la que se desprende de la Tabla 52.

Tabla 52. Tasa de transferencia de calor (W/°C) a través de la envolvente de BMTE (junio)

	Av / Ao	U	L	KI	W/°C
VENTANAS	13,1	5,8			76,0
MUROS	91,0	0,51			46,4
PUERTAS	3,3	3,4			11,3
CIELO	57	0,47			26,8
PISO			22,4	1,4	31,4
CARGAS POR TRANSMISIÓN (Qt)/ΔT					191,8

Consecuentemente, y aplicando la Ecuación 19: $(T_{im} - T_{em}) = (P_i + Sc_v + Sc_o) / (0,34 * V * N + U_g)$, para lograr el equilibrio térmico dada una temperatura deseada igual a $T_{im} = 20^{\circ}\text{C}$, el valor esperado para P_i' es:

$$(20 - 7,9)^{\circ}\text{C} = (P_i + 718,4\text{W} + 122,3\text{W}) / (96,9 \text{ W/}^{\circ}\text{C} + 191,8 \text{ W/}^{\circ}\text{C})$$

$$\rightarrow P_i' = 2652,6 \text{ W.}$$

Desde que P_i es igual a 237,5W, entonces, se requiere una potencia adicional ($P_i' - P_i$) de 2415,1W. Lo que en energía requerida al mes se traduce a 1738,9kWh (30 días mes junio y 24 horas día). Es decir, para la vivienda de 57m², se demandan 30,5kWh/m² en el mes de junio para calefaccionar la vivienda BMTE. El cálculo es análogo para el resto de los meses, y se presenta negativo para los meses que se requiera refrigeración (ver Fig. 6.6)

6.1.5. Análisis de los resultados

Lo primero que se puede analizar es que la vivienda de referencia, es decir, la que cumple con los requerimientos mínimos normativos para vivienda en la zona térmica respectiva, presenta una demanda de calefacción que dobla el requerimiento de la vivienda BMTE. Esto evidencia por un lado la ventaja del aislamiento térmico en los

muros y, por otro, cómo la normativa vigente no da cumplimiento a requerimientos de viviendas eficientes energéticamente. Esto ratifica lo planteado por Blender (2015) cuando hace referencia a que todavía se requiere mucho trabajo para reducir el consumo de energía, sobre todo a nivel reglamentario. De ahí que las exigencias para las transmitancia térmicas deben ser, en principio y para buscar eficiencia energética, mucho mayores a las planteados por la OGUC (ver apartado 3.4 “Reglamentación térmica en Chile” más atrás).

En el contraste de resultados, el programa de simulación dinámica mostró una demanda para calefacción cercana a la determinada bajo régimen estacionario. La simulación estacionaria presentó una demanda para calefacción mayor (de aproximadamente 5%) en contraste a la determinada por el programa CCTE. Lo que sería esperable según lo planteado por Lavigne (2011) para época de invierno, cuando la diferencia de temperatura es importante y prácticamente constante durante el día. Además, se trata de un material que presenta baja inercia térmica por absorción (asociada a materiales livianos), considerando que variaciones entre simulaciones dinámicas y estacionarias muestran ser mayores cuando las soluciones constructivas presentan mayor inercia por absorción (Evangelisti, Battista, Guattari, Basilicata, & Vollaro, 2014).

Por otro lado, y en contraste a lo anteriormente expuesto, las demandas para enfriamiento presentaron una diferencia realmente significativa. La demanda bajo el modelo estacionario resultó aproximadamente 6 veces mayor. Esto podría deberse a que el análisis estacionario no considera la radiación solar absorbida por los elementos internos en la vivienda, sobre todo los elementos de madera presentes al interior de la vivienda BMTE, los que presentan difusividades y efusividades medias (no es un material aislante como el poliestireno expandido, pero no trasmite calor como lo hace el hormigón; tampoco es un material pesado y absorbente como el hormigón, pero tampoco liviano como lo es el poliestireno expandido). Lo anterior ratifica la conveniencia de combinar la inercia térmica por transmisión y absorción para minimizar la oscilación térmica al interior de las viviendas conforme a la Fig. 2.72 más atrás. Cabe destacar que la demanda para enfriamiento disminuiría considerablemente si es considerada una mayor ventilación en verano ($N > 2h^{-1}$) y un

temperatura de confort mayor a 20°C en verano conforme a la teoría adaptativa del confort térmico expuesta en el apartado 2.4.3 más atrás.

Finalmente, establecer que para la comparación del método dinámico y estacionario, en la modelación de la vivienda, se deberían considerar los mismos parámetros de entrada. Sin embargo, es relevante destacar la existencia de parámetros, condiciones o supuestos que por defecto incorpora el programa CCTE y sobre los cuales el usuario no tiene control de edición. Pese a esto, las variables de mayor interés e incidencia en los resultados sí pueden editarse, tales como, clima, orientación, zona térmica, materialidad de envolvente, entre otras. Lo que permite realizar el contraste tomando en consideración las restricciones y ventajas propias de cada método.

6.1.6. Conclusiones del caso

Se logró determinar la energía para calefaccionar y refrigerar la vivienda BMTE bajo régimen estacionario conforme a lo establecido en el apartado 2.5.2, cuyos resultados fueron contrastados con los obtenidos en la simulación dinámica utilizando el programa CCTE. Resultados que evidenciaron que para el caso de estudio las diferencias se acentúan en verano, corroborando lo planteado por Lavigne (2011). No fue posible incorporar en la modelación las mismas variables de entrada, pues existieron restricciones impuestas por el programa de simulación dinámico y por las simplificaciones en presentes los modelos estacionarios.

En la determinación la demanda de energía para climatización, donde primen la inercia térmica por absorción en las soluciones constructivas divisorias y de envolvente, o bien, condiciones de verano o climas que presenten una variación importante de temperaturas durante el día, la recomendación será utilizar modelos dinámicos para la determinación de la energía demandada por la vivienda.

En el caso de estudio se evidencia que, independiente de la metodología usada en la estimación de la demanda para calefacción, la normativa vigente no responde a

requerimientos de eficiencia energética, pues la demanda para generar las condiciones de confort térmico en la vivienda alcanza, en el mejor escenario, los 112,6kWh/m² al año (modelo dinámico). Valor que se aleja de los 15kWh/m² exigidos para el consumo de energía anual para calefacción en edificios ULEB, o bien, los 30kWh/m² para edificios LEB evidenciado en el apartado 2.5.4 más atrás. Pese a esto, la vivienda social BMTE, que responde a las restricciones de costo para obtener un subsidio habitacional, presenta mucho mejor desempeño que la vivienda de referencia (la que da cumplimiento a la reglamentación térmica en la zona 3, por ejemplo, una albañilería con $U=1,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$ habitual en Chile conforme al apartado 3.5.1 más atrás), evidenciándose la necesidad de actualización de la normativa térmica en Chile para dar respuesta a las metas de eficiencia energética en viviendas al año 2050.

6.2. Caso 2: Eficiencia energética en una vivienda social – Análisis de mejoras en aislamiento térmico a partir de la reglamentación térmica

6.2.1. Introducción al caso

Conforme a lo establecido en los apartados 3.4 y 3.5, la normativa térmica vigente desde el año 2007 que, entre otras justificaciones, daba respuesta a los nuevos requerimientos globales de construcción sustentable, a la escasez de recursos energéticos y la necesidad de disminuir la gran dependencia energética en hidrocarburos que presentaba el país, no responde a las nuevas políticas energéticas para Chile, las que buscan conseguir al año 2050 que el 100% de las edificaciones nuevas posean altos estándares de construcción eficiente y cuenten con sistemas de control de energía. Esto hace oportuno la actualización de la normativa térmica, para lo cual ya existe una propuesta de cambio normativo desde el año 2014 denominado NTM 011/2 2014 (“Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento

ambiental de las edificaciones. Parte 2: Comportamiento higrotérmico”) (MINVU, 2014a).

En este contexto, el presente caso se busca analizar el desempeño energético de una vivienda social a partir de tres situaciones de acondicionamiento térmico: a) que dé respuesta a la actual reglamentación térmica, b) que dé respuesta a la propuesta de anteproyecto de Norma NTM 011/2 2014 y, finalmente, c) que dé respuesta a un alto estándar de construcción eficiente (ULEB o Passive House). Para esto se proponen los siguientes objetivos específicos: a) Especificar una vivienda social caso de estudio, b) Estudiar la temperatura interior media (T_{im}), el riesgo de condensación y la demanda de energía para calefaccionar y refrigerar en los tres casos y, c) Evidenciar que la actual reglamentación térmica chilena, al igual que su propuesta de cambio, no propician altos estándares de desempeño energético para viviendas.

6.2.2. Aspectos metodológicos

La vivienda se especificó a partir de las características esperadas para una vivienda social tipo. Lo anterior conforme a lo establecido en el título 3.5 “Vivienda social chilena y su desempeño térmico” más atrás. Esta tarea inició con la búsqueda de proyectos, licitados o contruados, de subsidio habitacional que cumplieran con la normativa térmica vigente en el portal <https://www.mercadopublico.cl>. El proyecto seleccionado correspondió a la vivienda especificada según ficha 3499-2-LR17 (ver Anexo 7). La temperatura interior media (T_{im}), el riesgo de condensación y la demanda de energía se determinaron conforme al modelo de balance de calor descrito en el título 2.5.2 más atrás y a los aspectos energéticos vinculados al aire abordados en el apartado 2.5.1 letra c “Aspectos vinculados al aire” más atrás. En la estimación del riesgo de condensación se contrastaron las temperaturas de rocío para humedades relativas interior (HR_i) de 50% y 70% (dentro de rangos de confort conforme a Tabla 7 más atrás). Para evidenciar que la actual reglamentación térmica chilena, al igual que su propuesta de cambio, no propicia altos estándares de desempeño energético en viviendas, se contrastaron resultados para tres casos: CB,

CMPN y CMPH. CB (Caso Base) corresponde a la vivienda seleccionada de referencia y que da cumplimiento a la reglamentación vigente. CMPN (Caso Mejorado Propuesta Normativa) corresponde a la vivienda CB con coeficientes de transmitancia (U-value) ajustados a la normativa propuesta NTM 011/02 2014 (Fig. 3.13 en el título 3.4 más atrás) y; CMPH (Caso Mejorado Passive House) corresponde a la vivienda CB ajustada a los coeficientes de transmitancias y pérdidas por infiltración y ventilación asociados a viviendas ULEB o Passive House conforme al apartado 2.5.4 más atrás. Para este último caso se tomaron como referencia las transmitancias térmicas de la vivienda “Lansdowne Drive”, vivienda ganadora del premio “UK Passivhaus Awards 2016” en la categoría urbana, la que presentó un consumo de energía primaria total (calefacción, ACS, iluminación, etc.) igual a 83,73 kWh/m² año y para calefacción de 13,64kWh/m² año. (Passivhaustrust, 2016).

6.2.3. Vivienda base de estudio y propuestas de mejora

Según el CENSO 2017, el 79,51% de las viviendas en Chile corresponden a la tipología “casa” (vivienda permanente con entrada directa desde la calle, jardín o terreno) y el 45% están materializada en albañilería (ver apartado 3.5.1 más atrás). Por otro lado, el “Estudio de Usos Finales y Curva de Oferta de Conservación de la Energía en el Sector Residencial de Chile” establece que solo el 0,8% de las viviendas presentan equipos de aire acondicionado y que el 36,6% de las viviendas se concentran en la zona térmica 3 (CDT, 2010). Por tanto, una vivienda social materializada en albañilería y emplazada en la zona térmica 3 resulta ser representativa para el estudio. Este escenario justificó la selección de la vivienda que se muestra en la Fig. 6.7 y que se especifica en Anexo 7. Esta corresponde a una vivienda social unifamiliar, materializada en albañilería y que da respuesta a la actual reglamentación térmica para la Zona 3.

La vivienda, diseñada en albañilería armada, presenta una planta de 50,5m², contempla un recinto de estar-comedor, dos dormitorios, un baño y una cocina con lavadero exterior. Las superficies para ventanas, muros, puertas y cielo son de 7m²,

57m², 4,5m² y 50,5m² respectivamente, con un perímetro de piso igual a 28,5m. Esta vivienda se ajusta al cuadro normativo D.S. N° 49 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Lo que permite a familias vulnerables, que no pueden acceder a un crédito hipotecario, financiar la adquisición o construcción de una vivienda. Esta vivienda corresponde al modelo CB (caso de referencia), cuyos valores de transmitancias térmicas (U-Value) exigidos por la normativa vigente se contrastan con los planteados para los casos CMPN (caso mejorado en base a la propuesta normativa, donde Zona 3 pasa a ser Zona D ver Fig. 3.13 en el título 3.4 más atrás) y CMPH (caso mejorado a partir de parámetros para edificios ULEB o Passive House) en Tabla 53.

Fig. 6.7 Vivienda social tipo (caso base CB).

Tabla 53. U-Value para dar cumplimiento a los casos planteados.

Elementos envolvente	U (W/m ² *K)		
	CB	CMPN	CMPH
VENTANAS	5,8	3,6	0,06
MUROS	1,9	0,6	0,113
PUERTAS	3	1,2	0,113
CIELO	0,47	0,38	0,074
PISO*	1,2	1	0,18

*Piso no ventilado, transmitancia térmica lineal (W/m*K).

6.2.4. Determinación de T_{im} , demanda de energía y riesgo de condensación.

Con base en la metodología de análisis estacionario propuesta por Lavigne (2003) y su aplicación en el caso previo (ver apartado 6.1.4 letra b “Resultados de la modelación estacionaria” más atrás), se determinaron las demandas de energía para los casos CB, CMPN y CMPH en la ciudad de Santiago (Región Metropolitana, zona 3, ver Tabla 23 más atrás). Los supuestos y bases de datos (radiación solar, temperaturas, etc.) para la determinación de la energía demanda para refrigerar y calefaccionar fueron análogos a los planteados para el caso previo (apartado 6.1.4).

A excepción de la tasa de renovación de aire que fue mayor en los meses de verano igual a 2^h igual que la temperatura de confort igual a 22°C.

Por otro lado, la temperatura interior media en la vivienda para cada mes se determinó a partir del balance calórico sin inyección de energía (sin calefaccionar o refrigerar) conforme a la Ecuación 19: $(T_{im} - T_{em}) = (P_i + S_{cv} + S_{co}) / (0,34 * V * N + U_g)$. Un ejemplo de cálculo para la determinación de la temperatura interior media (T_{im}) y la demanda de energía de enfriamiento (kWh/m²) para el mes de enero en el modelo CMPN se muestra en el Anexo 8. Conforme a este cálculo, y para cada caso (CB, CMPN, CMPH), las Fig. 6.8 y Fig. 6.9 muestran las temperaturas interior media (T_{im}) y las demandas de energía mensuales (para calefacción positiva y para enfriamiento negativa) respectivamente. En la Fig. 6.10 se contrastan las demandas de energía anuales para cada caso.

Fig. 6.8 Temperatura interior media (T_{im}) para casos CB, CMPN y CMPH

Fig. 6.9 Demanda de energía mensual para casos CB, CMPN y CMPH

Fig. 6.10 Contraste de energías demandas para calefacción y refrigeración en los casos analizados.

Conforme a la Fig. 6.8, y para los meses más fríos en el caso CB (temperatura interior media menor a 19°C), se determinaron las temperaturas superficiales interiores T_{si} para los muros y ventanas conforme a la Ecuación 11: $T_{si} = T_i - U \cdot R_{si} \cdot \Delta T$ (°C) y, las temperaturas de rocío $T_{rocío}$ conforme diagrama psicrométrico (ver Fig. 2.63 más atrás, Se trabajó con el diagrama psicrométrico online en <http://www.flycarpet.net/en/PsyOnline>). Dadas las temperaturas exteriores medias T_{em} para cada mes, y las transmitancias definidas para cada caso en la Tabla 53, se obtuvieron los resultados que se presentan en Tabla 54, Tabla 55, Tabla 56, Fig. 6.11, Fig. 6.12 y Fig. 6.13. Estos resultados permitirán analizar el riesgo de

condensación entre los meses de mayo a septiembre para cada uno de los casos definidos en Tabla 53.

Tabla 54. T_{si} en muros para las T_{im} y $T_{rocío}$ para HR_i de 50% y 70%

		CB	CMPN	CMPH	CB		CMPN		CMPH	
		T_{si} (°C)	T_{si} (°C)	T_{si} (°C)	T_r (°C)		T_r (°C)		T_r (°C)	
Meses	T_{em} (°C)	U = 1,9	U = 0,6	U = 0,113	50%	70%	50%	70%	50%	70%
Mayo (°C)	11,1	13,8	15,5	22,6	4,3	9,2	5,5	10,4	11,8	17,0
Junio (°C)	9,1	11,5	13	19,4	2,1	6,9	3,1	8,0	8,8	13,9
Julio (°C)	7,6	10,4	12,1	19,3	1,1	5,9	2,3	7,1	8,8	13,9
Agosto (°C)	9,3	12,8	14,9	23,7	3,6	8,4	5,0	9,9	12,8	18,1
Septiembre (°C)	11,4	15,1	17,1	26	5,7	10,7	7,0	12,1	15,0	20,3

Fig. 6.11 Diferencias entre las T_r para humedades de 50% y 70% en los casos CB, CMPN y CMPH sin calefaccionar.

Tabla 55. T_{si} en muros para temperatura interior igual a 20°C y $T_{rocío}$ para HR_i de 50% y 70%.

		CB	CMPN	CMPH	CB/CMPN/CMPH		CB		CMPN		CMPH	
		T_{si} (°C)	T_{si} (°C)	T_{si} (°C)	T_r (°C)		$(T_{si} - T_r)$ °C		$(T_{si} - T_r)$ °C		$(T_{si} - T_r)$ °C	
Meses	T_{em} (°C)	U = 1,9	U = 0,6	U = 0,113	50%	70%	50%	70%	50%	70%	50%	70%
Mayo (°C)	11,1	18	19,4	19,9	9,3	14,4	8,7	3,6	10,1	5,0	10,6	5,5
Junio (°C)	9,1	17,5	19,2	19,9	9,3	14,4	8,2	3,1	9,9	4,8	10,6	5,5
Julio (°C)	7,6	17,2	19,1	19,8	9,3	14,4	7,9	2,8	9,8	4,7	10,5	5,4
Agosto (°C)	9,3	17,6	19,2	19,9	9,3	14,4	8,3	3,2	9,9	4,8	10,6	5,5
Septiembre (°C)	11,4	18	19,4	19,9	9,3	14,4	8,7	3,6	10,1	5,0	10,6	5,5

Tabla 56. T_{si} en ventanas para temperatura interior igual a 20°C y $T_{rocío}$ para HR_i de 50% y 70%

		CB	CMPN	CMPH	CB/CMPN/CMPH		CB		CMPN		CMPH	
		T_{si} (°C)	T_{si} (°C)	T_{si} (°C)	T_r (°C)		$(T_{si} - T_r)$ °C		$(T_{si} - T_r)$ °C		$(T_{si} - T_r)$ °C	
Meses	T_{em} (°C)	U = 5,8	U = 3,6	U = 0,06	50%	70%	50%	70%	50%	70%	50%	70%
Mayo (°C)	11,1	13,8	16,2	19,9	9,3	14,4	4,5	-0,6	6,9	1,8	10,6	5,5
Junio (°C)	9,1	12,4	15,3	19,9	9,3	14,4	3,1	-2,0	6,0	0,9	10,6	5,5
Julio (°C)	7,6	11,4	14,6	19,9	9,3	14,4	2,1	-3,0	5,3	0,2	10,6	5,5
Agosto (°C)	9,3	12,6	15,4	19,9	9,3	14,4	3,3	-1,8	6,1	1,0	10,6	5,5
Septiembre (°C)	11,4	14	16,3	19,9	9,3	14,4	4,7	-0,4	7,0	1,9	10,6	5,5

Fig. 6.12 Diferencias entre la T_{si} en muro y $T_{rocío}$ para humedad de 70% y temperatura interior igual a 20°C.

Fig. 6.13 Diferencias entre la T_{si} en ventana y $T_{rocío}$ para humedad de 70% y temperatura interior igual a 20°C

6.2.5. Análisis de los datos y resultados de la modelación

En la Fig. 6.8 se aprecia que las viviendas con menores transmitancias térmicas presentan en promedio una mayor temperatura interior, donde en los meses de mayo a agosto (más fríos del año) el modelo CPMH presenta una T_{im} cercana a la de confort térmico, por tanto, se prescindiría de energía para calefaccionar, lo que es ratificado en la Fig. 6.10. Contrariamente, entre los meses de mayo a septiembre los modelos CB y CMPN no alcanzan la temperatura de 18°C, requiriendo energía para calefaccionar si se considera una temperatura de confort de 20°C. Pese a lo anterior, el modelo CMPN presenta un mejor desempeño que el modelo de referencia CB.

Al observar la Fig. 6.9 se aprecia que el modelo CPMH presenta menor variabilidad en los requerimientos de demanda a través del año (curva más achatada) en contraste a las demandas en los modelos CB y CMPN. La sumatoria de estas demandas definen los requerimientos para calefacción en invierno y enfriamiento en verano. Estos resultados se aprecian en la Fig. 6.10, destacando que el modelo que responde a la reglamentación vigente CB, y el modelo que responde a la propuesta de cambio normativo CMPN, requieren de energía para calefaccionar a diferencia del modelo CPMH. En este último caso, el requerimiento energético es casi nulo.

Aunque el modelo CMPN presenta una disminución en la demanda de 53% en relación a CB, la mejora aún no es suficiente para prescindir de energía de calefacción al igual que lo hace la edificación planteada para el modelo CPMH. En este último modelo, la demanda para calefacción cayó en 99,3% en relación al caso base CB.

La demanda de energía para enfriamiento presentó menor variabilidad que para calefacción (ver Fig. 6.10). Esto se desprende al contrastar los resultados de cada modelo con la demanda promedio de los tres casos propuestos igual a 70,15kWh/m² año. También se aprecia en la Fig. 6.10 que la vivienda CPMH requerirá mayor energía para refrigerar, sin embargo, y como fue abordado en el caso previo, el modelo estacionario tiende a sobredimensionar los requerimientos de refrigeración.

Por tanto, la demanda de energía para enfriamiento debiera ser menor que la planteada por los resultados. Esto sustentado por estudios que han demostrado que resultados para la demanda de refrigeración bajo simulación dinámica, resultan menores en comparación con resultados determinados bajo condiciones estacionarias o semi-estacionarias, pues el software de simulación dinámica tiene en consideración la inercia térmica por absorción de la estructura y, particularmente, durante la noche el edificio libera el calor almacenado durante el día. En esto se estima que, durante el tiempo de enfriamiento, la diferencia porcentual crece hasta aproximadamente 38% en edificios con alta inercia térmica que son simulados bajo un modelo dinámico (Evangelista et al., 2018)

En la Tabla 54 se aprecia que la temperatura superficial interior en los muros T_{si} , cuando la vivienda no está calefaccionada (vivienda a T_{im}), se acerca a la temperatura exterior media T_{em} para los casos CB y CMPN. A diferencia del caso CPHM que presenta una temperatura superficial interior T_{si} en muros que se aleja de la temperatura exterior media T_{em} . Además, dada la baja transmitancia que presentan los muros en CMPH, la temperatura superficial interior T_{si} se acerca a la temperatura interior media T_{im} , la que además presenta temperaturas que responden a los rangos de confort térmico para invierno conforme a Tabla 7 más atrás. Otro aspecto a destacar en la Tabla 54, es la diferencia que se produce entre las variables T_{si} y $T_{rocío}$, las que crecen a menor transmitancia térmica. Esto es debido a la mayor capacidad del aire para contener humedad a mayor temperatura T_{im} . Esto se aprecia al analizar las diferencias en las temperaturas de rocío $T_{rocío}$ para diferentes humedades relativas interior HR_i (de 50% y 70%) para cada caso en la Fig. 6.11.

Por otro lado, al contrastar las diferencias entre las temperaturas $T_{rocío}$ y temperatura interior media deseada a 20°C (ver Tabla 55 y Tabla 56) se aprecia claramente que el riesgo de condensación superficial cae a menor transmitancia térmica. Existiendo cambios favorables en muros y ventanas al contrastar los casos CB y CMPN. Sin embargo, estos son más significativos en ventanas, pues con la actual normativa – dentro de rangos de confort higrotérmico – se produce condensación en la ventana. Esto se aprecia claramente en la Fig. 6.13, donde se produce condensación en la ventana durante los meses de junio a agosto para una

humedad relativa interior $HR_i=70\%$ y temperatura interior igual a 20°C . A diferencia de lo que ocurre en los muros para las mismas condiciones, ver la Fig. 6.12.

Ahora bien, a pesar de que el riesgo de condensación disminuye a menor transmitancia térmica, se amplifica el riesgo de condensación en los puentes térmicos que estarán más fríos. Esto evidencia la necesidad de aislamiento uniforme en la vivienda, lo que no se aprecia en los casos CB y CMPN (ver Tabla 53). En este contexto, los coeficientes de variación, considerando el promedio y desviación estándar para las transmitancias térmicas de CB, CMPN y CMP (conforme a la Tabla 53 y sin considerar piso), son de 96,5%, 102,3% y 30,2%, respectivamente. Por consiguiente, la propuesta de cambio normativo no presenta mejoras en este aspecto respecto a la normativa vigente.

Es importante destacar que a pesar de que no se produce condensación en el muro bajo las condiciones propuestas en la Fig. 6.12, esto no garantiza la inexistencia de riesgo de condensación intersticial conforme a lo planteado en la Fig. 2.65 en el apartado 2.5.1 más atrás. Por lo que es necesario considerar, dado el gradiente de temperaturas desde el interior al exterior en muros durante invierno, una barrera de vapor cercana a la superficie interior para evitar el paso de vapor al interior del muro (CDT, 2012) y, además, ventilar propiciando el intercambio de calor entre los flujos de aire viciado (de salida) y aire de renovación (de entrada) a partir del sistema que se muestra en Fig. 2.66 más atrás.

6.2.6. Conclusiones sobre el caso

Aunque existe un cambio, de CB a CMPN, no menor en los requerimientos de transmitancia térmica para elementos de envolvente de viviendas construidas en la Zona 3; por ejemplo, el muro pasa de $U=1,9(\text{W}/\text{m}^2\text{C})$ a $U=0,6U (\text{W}/\text{m}^2\text{C})$, estos cambios no lograron que la vivienda estudiada presente una demanda de energía a niveles de viviendas con alto desempeño energético (consumo de energía primaria menor a $15\text{kWh}/\text{m}^2$ año calefacción). Un acondicionamiento con alto desempeño, caso CMPH, prescindió del uso de energía para calefaccionar en invierno.

Considerando el número importante de viviendas sociales en la región metropolitana, que no han sido reacondicionadas y que probablemente no respondan a la reglamentación vigente (construcción antes del 2007), se puede concluir que para un buen número de viviendas es altamente probable que estas presenten problemas de condensación en sus ventanas durante los meses más fríos del año. En este contexto, se aprecia que el principal aporte de la propuesta de cambio normativo para la ciudad de Santiago (Zona 3) es minimizar el riesgo de condensación en las ventanas, sin embargo, en el mes más frío el riesgo se restringe al límite conforme a las condiciones modeladas en la Fig. 6.13.

La actual normativa y su propuesta de cambio no evidencian parámetros de transmitancia térmica uniformes. Propiciando que las áreas de la envolvente en la vivienda presenten resistencias térmicas disímiles, aumentando el riesgo de condensación en aquellas superficies de menor resistencia y cuyos encuentros, esperablemente, conformen puentes térmicos (ver Fig. 2.54 y Fig. 2.55 en apartado “Aspectos vinculados al calor” más atrás). Esto se evidencia en los coeficientes de variación presentados en el análisis previo, aunque basta con mencionar la relación existente entre los valores de transmitancia térmica para ventanas y muros en los casos modelados CB y CMPN, donde la relación sube de 3 a 6 respectivamente.

Se confirma que a mayor acondicionamiento térmico la variabilidad de la temperatura interior media T_{im} en la vivienda disminuye. Esto producto de la menor transmitancia térmica en los elementos de la envolvente de las viviendas modeladas CMPN y CMPH, lo que redundó en la caída de los requerimientos de energía para calefaccionar en los meses más fríos del año.

Bajo análisis estacionarios se debe prestar atención a la estimación de los requerimientos de energía para enfriar las viviendas durante el verano. Desde que estos análisis no consideran la inercia térmica, las estimaciones para el enfriamiento en viviendas donde prime la masa (como es el caso de la albañilería) debieran ser algo más bajas, hasta un 38% menor en algunos casos cuando la inercia térmica por absorción es importante (Evangelista et al., 2018)

Finalmente, la propuesta normativa mejoró las condiciones energéticas y térmicas en la vivienda de estudio, pero no a un nivel que responda a los requerimientos para viviendas chilenas al año 2050 como sí lo fue en el caso CMPH (modelo que presenta transmitancias térmicas para la vivienda con estándares Passive House).

6.3. Caso 3: Análisis de ciclo de vida en viviendas, caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social

6.3.1. Introducción al caso

En el presente caso se aplicarán los conceptos abordados en el apartado 5.2 “Análisis de Ciclo de Vida en viviendas”. Esto, centrado en las características de las viviendas chilenas (ver título 3.5 más atrás) y, especialmente, en el contexto definido para las viviendas sociales en apartado 3.5.1. Donde se establece que en las zonas más pobladas, y con mayor cantidad de viviendas sociales, prima la construcción en albañilería y vidriado monolítico. Viviendas que ha mostrado ser ineficientes energéticamente, poco confortables (Bustamante et al., 2013) (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Blender, 2015) y, además, presentar riesgos de condensación a partir de los resultados que derivan del caso previo. Por consiguiente, es fundamental hacer de estas viviendas espacios más eficientes y confortables con el propósito de dar respuesta a las políticas energéticas en viviendas chilenas al año 2050, que buscan que el 100% de las nuevas edificaciones presenten altos estándares de construcción eficiente y cuenten con sistemas de control de energía.

Conocido que Chile es un país productor de madera importante a nivel global, que los muros estructurados en madera aislados térmicamente presentan un mejor desempeño energético que las albañilerías y, que la albañilería se presenta predominante en la vivienda chilena y también en la vivienda social, el presente caso plantea evidenciar los beneficios medioambientales y de confort térmico que brindaría

el uso de muros estructurados en madera por sobre los muros de albañilería en viviendas sociales chilenas, sobre todo en aquellas zonas térmicas donde no prevalece su uso. Para responder a esta interrogante se llevará a cabo un ACV simplificado, el que permitirá contrastar indicadores de sustentabilidad y confort térmico en una vivienda unifamiliar estructurada con muros de madera o muros de albañilería en tres zonas climáticas.

Al igual que en otros países menos desarrollados de la orbe, la aplicación de los ACV en edificaciones es relativamente reciente y los trabajos se han enfocado, principalmente, a incorporar el concepto de energía incorporada (Embodied Energy o EE) (Cárdenas et al., 2015) (Anand & Amor, 2017). Por consiguiente, los resultados del presente caso serán un aporte al conocimiento en el ámbito de los ACV en viviendas sociales chilenas.

Consecuentemente, el objetivo es contrastar la evaluación del desempeño ambiental de dos modelos, uno denominado VMA (Vivienda Muro Albañilería) y otro VMM (Vivienda Muro Madera). El primero corresponde una vivienda modelada con muros de albañilería y, el segundo, a la misma vivienda modelada con muros estructurados en madera aislados térmicamente. La evaluación se hará con énfasis en los requerimientos de calefacción y en tres zonas climáticas donde el uso de la albañilería predomina por sobre la madera. Para esto se han tomado de referencia las ciudades de Antofagasta (ubicada en la Zona térmica Z1), Santiago (ubicada en la Zona térmica Z3) y Concepción (ubicada en Zona la térmica Z4). La unidad funcional para el análisis será el metro cuadrado de área de construcción, el horizonte de análisis será de 50 años y las categorías de impacto ambiental seleccionadas para la evaluación ambiental serán GWP y CED. Además, se abordarán aspectos de confort térmico en la fase de uso a partir de la determinación del Tiempo No Confortable (TNC) conforme a la ASHRAE 55-2004.

6.3.2. Antecedentes metodológicos

La presente investigación adoptará un ACV simplificado a partir de un enfoque midpoint. Se determinarán los indicadores de impacto ambiental para las categorías GWP y CED, el primero medido en kgCO₂eq y, el segundo, medido en kWh. Para analizar las condiciones de confort térmico se determinará el tiempo no confortable en horas (TNC) basado en la ASHRAE 55-2004, el que es entregado por el programa de simulación EnergyPlus.

Tabla 57 lista cada uno de los elementos generalmente considerados e los ACV en edificaciones (Oregi et al., 2017)(Abd Rashid & Yusoff, 2015) (Zabalza Bribián et al., 2009). En ella se muestran qué elementos serán recogidos y cuáles no para el presente caso de estudio, donde los elementos asociados a la fase de término de la vida útil de la vivienda no serán abordados debido a la carencia de datos específicos para Chile (Oyarzo & Peuportier, 2014) y debido a la menor incidencia que presenta dicha fase en las categorías de impacto GWP y CED (Islam et al., 2015).

Las principales fuentes de información consultadas para responder a los objetivos del presente caso de estudio, se muestran en la cuarta columna de la Tabla 57. Estas se asocian por fila a cada uno de los elementos que serán considerados en el ACV simplificado, entre los que destacan las declaraciones ambientales de productos (EPD - Environmental Product Declaration) que algunas empresas chilenas publican en la Internet, bases de datos contextualizadas desde Ecoinvent u otras que destacan por su integridad y facilidad de uso para analizar los materiales de construcción (Martínez-Rocamora et al., 2016), información proveniente de normativa chilena e informes técnicos derivados de instituciones públicas o privadas tales como la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) de la Cámara Chilena de la Construcción. Es decir, serán considerados los aspectos que han sido abordados en los apartados 5.3 y 5.4 del título 0 del presente documento.

Tabla 57. Elementos considerados en los ACV simplificado para la presente investigación

Fases conforme a Fig. 5.3	Elementos generalmente considerados en los ACV de edificaciones por fase	Elementos incorporados en el ACV	Fuentes de información y justificación de la no inclusión en el ACV
Fase de materiales o productos	Suministro de materias primas	SI	Se usaron datos de inventario ambiental de materiales de construcción de producción chilena (EPD). Frente a la inexistencia información se utilizó literatura o bases de datos internacionales (Ecoinvent, ICE, BEDEC, Athena EcoCalculator, otras). Esto dio origen a la Tabla 49. Energía y carbón incorporados en materiales de construcción. Para la mensura y caracterización de los materiales se utilizaron las especificaciones técnicas y los planos de arquitectura, estructura y especialidades de la vivienda de estudio.
	Transporte	SI	
	Manufactura de productos	SI	
Fase de construcción	Transporte de materiales	SI	Se usaron distancias promedios a los proveedores y bases de datos chilenas para determinar la energía consumida en las operaciones de transporte de materiales y construcción, algunas bases que se utilizaron provienen de la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción y del Manual Chileno de Costos, Materiales y Actividades para la Construcción.
	Transporte de maquinarias	SI	
	Energía consumida durante el proceso de construcción	SI	
Fase de uso	Energía consumida en la generación de condiciones de confort térmico	SI	Se modeló la vivienda en 3D y se determinaron los requerimientos de energía con la ayuda del programa de simulación energética EnergyPlus (https://energyplus.net/) a partir del uso de la interface Euclid para SketchUp. (ver apartado 2.5.5)
	Energía consumida por equipos y luminaria	NO	No se incorporaron debido a que se supusieron constantes, asociando principalmente su uso a las personas, las que no variarán frente al cambio de materialidad en los muros de la vivienda de estudio.
	Energía para ACS	NO	
	Uso operativo del agua	NO	
	Mantenimiento	NO	No se incluyeron debido a su baja incidencia en las categorías de impacto GWP y CED que abordan los ACV en edificaciones (Islam et al., 2015) y debido a la carencia de información específica para Chile (Oyarzo & Peuportier, 2014).
	Reparaciones, reemplazos o rehabilitación	NO	
Fase de término de la vida útil	Deconstrucción o demolición	NO	
	Transporte	NO	
	Reciclaje	NO	
	Reutilización	NO	
	Vertedero	NO	

Consecuentemente, y en congruencia la Tabla 57, la Fig. 6.14 muestra el flujograma para determinar los indicadores de sustentabilidad para las categorías de impacto de interés (GWP y CED) y el tiempo no confortable en horas (TNC) basado en la ASHRAE 55-2004. El contraste de estos indicadores, para tres zonas climáticas en Chile, permitirá evaluar el desempeño ambiental de la vivienda de estudio frente al cambio de materialidad propuesta para los muros de envolvente.

Fig. 6.14 Flujo metodológico para la obtención los indicadores de evaluación ambiental y confort térmico.

6.3.3. Descripción del caso de estudio

Para los propósitos de este estudio se tomó como referencia una vivienda social unifamiliar, materializada en albañilería armada, planta de 50,5m² y volumen de calefacción igual a 121,2m³. Las Fig. 6.15 y Fig. 6.16 muestran la planta de la vivienda y la elevación de uno de sus muros perimetrales estructurado en albañilería armada. Los muros, que descansan sobre una fundación de hormigón corrido, son reforzados con vigas y sobrecimientos de hormigón armado, algo necesario en un país altamente sísmico como lo es Chile (Camus, Arenas, Lagos, & Romero, 2016). La vivienda da cumplimiento al cuadro normativo del MINVU y responde a una tipología habitual en viviendas sociales, las que cuentan con un baño, una cocina, dos dormitorios y un living comedor (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Bustamante et al., 2013).

La techumbre está estructurada en madera de pino, tipología que prevalece en las viviendas sociales chilenas (Bunster & Noguchi, 2015)

Fig. 6.15 Planta de la vivienda de estudio, muros achurados en negro corresponden a la albañilería y en color claro a la tabiquería interior.

La vivienda que se muestra en la Fig. 6.15 y Fig. 6.16 corresponden a la vivienda base para el estudio, denominado VMA (vivienda con muro de albañilería). La vivienda con la propuesta de cambio en muros se ha denominado VMM (vivienda con muro estructurado en madera). Ambas soluciones se especifican en el “Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico” con los códigos 1.2M.B9.1 y 1.2.M.C8 respectivamente (MINVU, 2014b). La Tabla 58 muestra, para ambos casos, las principales características técnicas de los subsistemas en la vivienda.

Fig. 6.16 Elevación estructural de un muro de albañilería en la vivienda de estudio.

Tabla 58 Principales características técnicas de los elementos para los modelos VMA y VMM

Elementos en la vivienda	VMA	VMM
Ventanas (6,88m ²)	Ventanas con transmitancia térmica (U) igual a 5,8 W/m ² °C, las que presentan un vidriado monolítico de 3mm de espesor y marcos de aluminio.	Igual a VMA
Muros (57,03m ²)	Muros de albañilería armada con ladrillos de ladrillo hecho a máquina de 329mmx154mmx94mm, unidos con mortero de dosificación 1:3 en volumen y de espesor 15 mm +/- 3 mm. Solución corresponde a codificación 1.2.M.B9.1 listado oficial soluciones constructivas del Ministerio de Vivienda y Urbanismo en Chile (MINVU). U = 1,7 W/m ² °C.	Muro-tabique con aislación térmica de poliestireno expandido de espesor 50mm y densidad 10 kg/m ³ en el núcleo del tabique. El elemento está formado por una estructura de madera hecha con listones de pino radiata de 2"x3" cepillado. Estructura revestida interiormente con placa de yeso cartón de 12,5mm de espesor y exteriormente con placa de fibrocemento de 5mm de espesor. Solución corresponde a codificación 1.2.M.C8 del listado oficial de soluciones constructivas del MINVU. U=0,73 W/m ² °C
Puertas (4,5m ²)	Puertas estructuradas en madera de pino con U=3 W/m ² °C	Igual a VMA
Estructura de techo y cielo (50,5m ²)	Cerchas de madera de pino, cubierta de acero galvanizado y cielo estructurado en entramado de madera cubierto con placa de yeso catón y aislado con lana de roca que presenta un U=0,47 W/m ² °C	Igual a VMA
Fundaciones y piso (50,5m ²)	Zapata corrida de hormigón y sobrecimiento de HA, radier de hormigón de 8cm con cerámica en zonas húmedas y solo afinado en resto de la vivienda. U= 4,5 W/m ² °C promedio.	Zapata aislada y cadena de fundación, radier de hormigón de 8cm con cerámica en zonas húmedas y solo afinado en resto de la vivienda. U= 4,5 W/m ² °C promedio.

6.3.4. Aplicación del ACV simplificado

En conformidad a la Fig. 5.2 del apartado “Análisis de Ciclo de Vida en viviendas” 5.2 más atrás, se tiene:

a. Objetivo y definición del alcance

Evaluar el desempeño ambiental de los modelos VMA y VMM, con énfasis en la energía demandada para calefaccionar, en las ciudades de Antofagasta (ubicada en la Zona térmica Z1), Santiago (ubicada en la Zona térmica Z3) y Concepción (ubicada en Zona la térmica Z4). La unidad funcional será el metro cuadrado de área de construcción, el horizonte de análisis 50 años y las categorías de impacto ambiental que se analizarán serán GWP y CED. Además, en la fase de uso, se analizará el TNC para ambos modelos.

b. Análisis de inventario

En la fase de materiales o productos, se mensuraron todos los elementos constituyentes de la vivienda y las necesidades de transporte al sitio de construcción. Esta cuantificación inició por los elementos constructivos presentes en las viviendas tipos VMA y VMM (m^2 de ventanas, m^3 de cimientos de hormigón, m^2 de albañilería o tabiquería en madera, etc.). Luego se determinaron los kilogramos de material de construcción realmente consumidos en los procesos constructivos. Esto a partir de la definición de rendimientos para las operaciones de construcción, para lo que se consideraron pérdidas que van entre un 5% y 15% dependiendo de la partida constructiva. Los materiales que presentaron diferencias en las mensuras están asociados a los elementos o subsistemas que varían entre VMA y VMM. Conforme a los resultados que se muestran en la Tabla 59, no solo los muros cambian, sino también las fundaciones, principalmente, debido a que el modelo VMM resulta más liviano. Producto de esto, los materiales hormigón, acero de construcción, poliestireno expandido, ladrillos, madera, yeso cartón, fibrocemento, mortero y estucos, presentes en muros o fundaciones, fueron los materiales que presentaron las principales diferencias entre los casos VMA y VMM. Por otro lado, materiales tales

como, lana de roca, aluminio, vidrio, cerámicas, PVC, cobre, acero galvanizado, entre otros, fueron materiales que se supusieron constantes para los casos VMA y VMM. Los que se muestran como “Otros materiales” en la Tabla 59.

Las cantidades mensuradas, conforme a las fuentes de información establecidas en la Tabla 57, fueron multiplicadas por los factores o coeficientes de paso respectivos, ya sea para el estudio de los materiales (MJ/kg y kgCO₂eq/kg), o bien, para el estudio de los elementos o sistemas constructivos (MJ/m² y kgCO₂eq/m², por ejemplo, para una ventana o una tabiquería). Para esto se usaron de referencia los coeficientes que se muestran en la Tabla 49. Cabe destacar que para la madera se consideraron las emisiones derivadas de su ciclo industrial y no se incluyó el carbono biogénico contenido en ella por considerarlo carbono neutro (Kuittinen & Linkosalmi, 2015)

En la definición de las características físicas de los materiales (densidades, conductividades térmicas, calor específico, entre otras) se consideraron, en orden de prevalencia, las definidas por los fabricantes de materiales, la normativa chilena, o bien, las definidas por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Estas últimas disponibles en la biblioteca de datos para materiales de construcción dentro del programa de simulación energética EnergyPlus.

En la fase de construcción se procedió de manera análoga que en la fase previa. Se identificaron los recursos necesarios para materializar los casos VMA y VMM, luego se cuantificaron los recursos energéticos derivados del transporte, del uso de herramientas, maquinarias o equipos y, los recursos materiales asociados a las estructuras auxiliares o temporales necesarias para la construcción (se supusieron 3 usos y madera). Para esto se generó un programa de construcción para VMA y VMM, donde a cada actividad constructiva en el tiempo se asociaron los recursos demandados para la construcción.

Con respecto al transporte de materiales a obra, se definió un camión diésel de capacidad 9 toneladas y rendimientos de 6km/l cargado y 10km/l vacío. Se estimó una distancia promedio de 20km entre el sitio de construcción y los diferentes proveedores de materiales o productos de construcción, los que se sabe varían

respecto al tipo de material o producto que se movilice (Evangelista et al., 2018). Estas distancias se supusieron análogas para las diferentes ciudades, puesto que corresponden a capitales regionales con centros de provisión de materiales que podrían suponerse comunes. Dada la estimación de los viajes necesarios en el tiempo, donde se supuso un transporte cargado y otro vacío, el total de kilómetros en transporte para la vivienda VMA y VMM resultaron iguales a 520km y 400km respectivamente.

Determinada la cantidad de combustible y energía demanda en el proceso de construcción, se determinaron las emisiones contaminantes a partir de los coeficientes de paso respectivos. Para electricidad se utilizó el promedio del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) igual a 0,4187 kgCO₂eq/kWh y para gas licuado de petróleo (LPG) y diésel los coeficientes 0,2272 kgCO₂eq/kWh y 0,2667 kgCO₂eq/kWh respectivamente. Estos coeficientes fueron tomados desde las Tabla 2 Tabla 3 2.3 más atrás

En la fase de uso la vivienda y sus variaciones fueron modeladas en el programa de simulación energética EnergyPlus versión 8.6, el cual es uno de los programas de simulación más completos y aceptados internacionalmente para modelar viviendas (Sousa, 2012). Aspectos sobre su uso son abordados en el apartado “EnergyPlus software” dentro del título 2.5.5 más atrás.

La Fig. 6.17 muestra la vivienda modelada en SketchUp utilizando la interface Euclid para EnergyPlus. Los casos VMA y VMM fueron modelos suponiendo los elementos, materialidades, superficies y transmitancias térmicas que se muestran en la Tabla 58. Algunos supuestos para la modelación son una tasa de renovación de aire promedio de 1,5 renovaciones por hora, temperatura de confort 20°C, 4 usuarios y entretecho completamente ventilado.

Tabla 59. Mensura de los materiales presentes en las viviendas VMA y VMM

Material	Mensura en (kg)	
	VMA	VMM
Hormigón	37056	20562
Acero construcción	583	166
Poliestireno expandido	26	56
Ladrillos	8023	0
Madera	1785	2826
Morteros o estucos	7876	690
Yeso Cartón	988	1631
Fibrocemento	0	293
Otros materiales	679	679

Fig. 6.17 Modelación tridimensional de la vivienda para simulación energética con EnergyPlus

La Tabla 60 muestra las zonas climáticas para las cuales fueron modelados los casos VMA y VMM. Se obtuvieron promedios de energía demanda en kWh/m² al año para cuatro orientaciones (norte, sur, este y oeste). De igual modo se obtuvo el tiempo no confortable en horas (TNC), basado en el estándar ASHRAE 55-2004 para 8760 horas anuales de simulación energética.

Tabla 60. Especificación de zonas y archivos climáticos (.epw) para la modelación en EnergyPlus

Ciudad	Archivo de clima EnergyPlus	latitud (grados)	longitud (grados)	elevación (m)	límites grados día
Antofagasta (Z1)	CHL IWECC Data WMO#=854420	-23,4	-70,4	120	<500
Santiago (Z3)	CHL IWECC Data WMO#=855740	-33,4	-70,8	476	750 - 1000
Concepción (Z4)	CHL IWECC Data WMO#=856820	-36,8	-73,0	16	1000 - 1250

En la determinación de las emisiones contaminantes derivadas de la calefacción, se consideró el tipo característico de equipo y combustible para calefaccionar en las diferentes zonas climáticas. Para responder a esto, se determinaron los factores de emisión que se detallan en la Tabla 61, donde el gas licuado y la leña predominan en las ciudades de Antofagasta y Concepción, y el gas licuado y el kerosene en la ciudad de Santiago (CDT, 2015c). En la determinación de estos factores se tomaron de referencia los estudios “El dilema de la leña, ¿cómo reducir la contaminación del aire sin incrementar el costo en calefacción?” (Reyes et al., 2015) y “Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera” (CDT, 2015c). En los que se referencian la distribución de los sistemas de calefacción utilizados en las diferentes zonas climáticas chilenas, sus rendimientos y los factores de emisión por tipo de combustible. Estos aspectos han sido abordados en los apartados 2.3.2, 2.3.4 y 2.5.4 más atrás.

Tabla 61. Factores de emisión estimados a partir del tipo de energía para calefaccionar.

Ciudad	Gas licuado	Electricidad	Leña o derivados de la madera	Kerosene	Factor de emisión (kgCO ₂ eq/kWh)
Antofagasta (Z1)	40,0%	2,6%	31,6%	25,8%	0,2565
Santiago (Z3)	56,3%	6,2%	9,5%	28,0%	0,2730
Concepción (Z4)	14,4%	0,6%	74,2%	10,8%	0,2310

6.3.5. Resultados para el ACV en los casos de estudio

En la fase de materiales se identificaron, entre otros, los siguientes materiales para los modelos VMA o VMM: hormigón, acero de construcción, lana de roca, poliestireno expandido, aluminio, cerámica, ladrillos, madera, morteros y estucos, pinturas, PVC, yeso cartón, vidrio, acero galvanizado, cobre, fibrocemento, fieltro asfáltico, plástico y pinturas. El total de EE en las viviendas tipo VMA y VMM ascendió a 33812kWh y 22991kWh respectivamente. El total de GHG en las viviendas tipo VMA y VMM ascendió a 11273 kgCO₂eq y 7257 kgCO₂eq respectivamente.

En la Fig. 6.18 se individualizan los materiales asociados a los elementos constructivos muros y fundaciones, los cuales presentaron las principales diferencias en los casos VMA y VMM (ver Fig. 6.19). Dentro de los materiales no individualizados, agregados a “otros materiales” en la Fig. 6.18, destacan la lana de roca en el cielo, el PVC en las canalizaciones, el acero galvanizado en la cubierta y el aluminio en las ventanas. Estos materiales sumados, supuestos constantes en los modelos VMA y VMM, ascendieron a 4479kWh y 1039kgCO₂eq para la EE y los GHG respectivamente. Los resultados por tipo de elemento en la vivienda, se muestran en la Fig. 6.19.

Fig. 6.18 Cargas ambientales de los materiales presentes en las viviendas VMA y VMM

Fig. 6.19 Cargas ambientales de los elementos o subsistemas presentes en VMA y VMM

En la fase de construcción la energía demandada en VMA y VMM ascendieron a 1878kWh y 1529kWh respectivamente. Por otro lado, las emisiones contaminantes asociadas a esta fase ascendieron a 583 kgCO₂eq y 481 kgCO₂eq para VMA y VMM respectivamente. Estos resultados por tipo de recurso demandado se muestran en la Fig. 6.20.

Fig. 6.20 Cargas ambientales de los principales recursos usados durante la construcción de las viviendas VMA y VMM.

En la fase de uso, la vivienda VMA mostró para Antofagasta (Z1), Santiago (Z3) y Concepción (Z4) demandas de energía anual para calefaccionar iguales a 48,43kWh/m², 104,55kWh/m² y 110,94kWh/m² respectivamente. Para el caso VMM estas demandas ascendieron a 48,19kWh/m², 96,67kWh/m² y 101,07kWh/m² al año

para cada ciudad respectivamente. Esta demanda de energía y las emisiones contaminantes para un horizonte de 50 años, conforme a los coeficientes de paso mostrados en la Tabla 61, se muestran en la Fig. 6.21.

Fig. 6.21 Cargas ambientales en la fase de uso para casos modelados VMA y VMM

Los resultados para el TNC se muestran en la Fig. 6.22. En ella se muestran los resultados promedios que arrojó el programa de simulación EnergyPlus cuando las viviendas VMA y VMM fueron modeladas para cuatro orientaciones (norte, sur, este y oeste) por zona climática (Antofagasta, Santiago y Concepción). En la Fig. 6.22 también se aprecia la fracción del TNC, por tipo de vivienda y ciudad, para un total de 8760 horas modelas en EnergyPlus.

Fig. 6.22 Horas y proporción de tiempo no confortable para casos modelados VMA y VMM

Conforme a los resultados en las fases de materiales, de construcción y de uso, la Fig. 6.23 muestra los indicadores de impacto ambiental, por unidad funcional (m^2), para las categorías de impacto CED y GWP conforme ha sido planteado en el objetivo y alcances para el ACV.

Fig. 6.23 CED y GWP por m^2 para los casos modelados VMA y VMM

Finalmente, conforme a los resultados previos, las Fig. 6.24 y Fig. 6.25 muestran las incidencias de las fases de materiales, de construcción y de uso para las categorías de impacto CED y GWP.

Fig. 6.24 Incidencia de las fases del ACV en la categoría CED

Fig. 6.25 Incidencia de las fases del ACV en la categoría GWP

6.3.6. Análisis y discusión sobre el caso

El hormigón, el acero de construcción, el acero galvanizado, los ladrillos, el yeso cartón y los morteros y estucos resultaron ser los materiales más incidentes en la etapa de materiales para VMA. Estos materiales representaron el 73,9% de la EE y el 81,8% de los GHG en la vivienda. En cuanto al modelo VMM, el hormigón, el acero de construcción, el acero galvanizado, el poliestireno expandido, la madera, las pinturas y el yeso cartón, resultaron ser los materiales con mayor incidencia en la EE, representado 71,8% del total de EE en la vivienda. Sin embargo, este conjunto de materiales solo representó el 58,6% de los GHG, pues la madera presenta alta energía incorporada en relación a sus emisiones contaminantes (Fig. 6.18).

En el modelo VMM, los GHG para el acero de construcción, la lana de roca, el poliestireno expandido, el aluminio, el fibrocemento y los morteros o estucos promediaron, con baja dispersión, el valor resultante para los GHG en la madera. Reflejando una distribución más uniforme y una menor carga ambiental de los

materiales cuando se modeló la vivienda social con muros estructurados en madera. Esto se evidencia al observar la distribución de las cargas ambientales en los elementos constructivos para las viviendas modeladas en la Fig. 6.19. En consecuencia, cuando el muro de albañilería es reemplazado por el muro estructurado en madera, la EE y los GHG caen en 32% y 35,6% respectivamente.

Los resultados previos no consideran el potencial uso de la madera en otros elementos constructivos (marcos en ventanas, por ejemplo), como tampoco los beneficios de su uso en todo el ciclo de vida de la vivienda, pues la madera – además de presentar una carga que puede ser considerada neutra –, también puede considerar una carga negativa derivada del efecto positivo del secuestro permanente del carbono biogénico o de su reutilización como combustible en sustitución de otro en la etapa de desecho (efecto sustitución) (Kuittinen & Linkosalmi, 2015) (Fouquet et al., 2015). Consideraciones de este tipo en el uso de la madera en la vivienda, han llegado a representar una carga negativa de hasta 5,5% para los GHG en la fase de desecho o desuso (Islam et al., 2015).

Los GHG derivados de la fase de materiales para VMA y VMM resultaron ser 223,2 kgCO₂eq/m² y 143,7 kgCO₂eq/m² respectivamente. Lo que es congruente con investigaciones previas que muestran para viviendas de albañilería valores entre 161 kgCO₂eq/m² y 393,1 kgCO₂eq/m² y, para viviendas estructuradas en madera, valores entre 128 kgCO₂eq/m² y 830 kgCO₂eq/m² (Panagiotis Chastas et al., 2018) (Ver apartado 2.3.3 “Energía y emisiones en edificaciones” más atrás). La mayor dispersión en estas últimas podría asociarse a los variados productos madereros existentes y a los múltiples escenarios posibles de considerar para determinar la carga ambiental de la madera (carbón secuestrado, efecto sustitución, otros) (Martínez-Rocamora et al., 2016) (Kuittinen & Linkosalmi, 2015).

La albañilería corresponde al subsistema constructivo con mayor impacto en las viviendas modeladas, más del doble respecto del subsistema que le sigue (ver Fig. 6.19). Este valor se presenta mayor que en otras investigaciones con muros de albañilería (Rossi, Marique, Glaumann, & Reiter, 2012). Esto debido que a la albañilería modelada se han incorporado elementos de refuerzo en acero y hormigón armado, lo que es frecuente en un país altamente sísmico (Ver Fig. 6.16). En

términos generales, y conforme a la Fig. 6.19, los muros (exteriores e interiores), la techumbre y las fundaciones representan, en ambos casos modelados, aproximadamente el 81% de la EE y 71% de las GHG, lo que al igual que en otras investigaciones, evidencia la importancia de estos subsistemas en la fase de producto y su consideración al momento de diseñar edificios sustentables (Zabalza Bribián et al., 2009)(Rossi et al., 2012) (Islam et al., 2015).

La energía demandada y los GHG en la fase de construcción también se presentaron mejores en el modelo VMM. Así, cuando se plantea el reemplazo de la albañilería por los muros estructurados en madera, la energía demandada y los GHG caen en 19% y 17% respectivamente. Estas diferencias se explican, principalmente, a que el modelo VMM prescindió de algunos elementos temporales para la construcción, presentó menor plazo de construcción y menores requerimientos de transporte debido a que los materiales en VMM resultaron más livianos (ver Tabla 59, aproximadamente un 50% menos de masa). Pese a esto, y conforme a los resultados presentados en las Fig. 6.24 y Fig. 6.25, estas disminuciones no resultan significativas a nivel global.

Las demandas de energía para calefaccionar VMA y VMM, para las diferentes zonas térmicas estudiadas, se mostraron congruentes con investigaciones previas para viviendas sociales en Chile (Bustamante et al., 2013)(Cárdenas et al., 2015). Los resultados superaron ampliamente los 15kWh/m² en todos los casos modelados. Por tanto estos diseños, que cumplen con la normativa vigente para las zonas estudiadas (Z1, Z3 y Z4) (MINVU, 2018c), no responden a los estándares de eficiencia energética perseguidos para las viviendas nuevas en Chile. Corroborando lo planteado por otros investigadores en el pasado (Oyarzo & Peuportier, 2014) (Blender, 2015) y los resultados en los casos previos.

Conforme a la Fig. 6.21, las demandas de energía para calefaccionar se presentaron más favorables en la vivienda VMM, pero más significativas en las ciudades con mayor cantidad de Grados-Día, es decir, en las ciudades de Santiago (Z3) y Concepción (Z4). De este modo, los GHG –proporcionales a las demandas de energía conforme a los factores de emisión en tabla Tabla 61– mostraron disminuciones de 0,5%, 7,5% y 8,9% cuando se reemplazó la albañilería por muros

estructurados en maderas en las ciudades de Antofagasta (Z1), Santiago (Z3) y Concepción (Z4) respectivamente. Pareciera que fuese indiferente el uso de la albañilería y el muro estructurado en madera para la vivienda en Antofagasta, sin embargo, esto es efectivo solo considerando calefacción y no refrigeración, pues se presentaron diferencias importantes en Antofagasta cuando se analizó el TNC.

Al analizar el confort térmico en la Fig. 6.22, frente al reemplazo del muro de albañilería por el estructurado en madera y considerando necesidad de enfriamiento y calefacción, se aprecia que TNC disminuyó 28%, 17% y 29% en las ciudades de Antofagasta (Z1), Santiago (Z3) y Concepción (Z4) respectivamente. Estos valores son especialmente importantes considerando la incidencia de la fase de uso en las categorías de impacto CED y GWP (Ver Fig. 6.24 y Fig. 6.25) y el aumento gradual de las temperaturas en el mundo que demandarán en el futuro mayores necesidades de confort para enfriamiento y menores para calefacción, especialmente en viviendas con climas más cálidos como es el caso de Antofagasta (Yang et al., 2014).

En conformidad a los análisis previos, y a los resultados que se muestran la Fig. 6.23, las categorías de impacto ambiental CED y GWP se mostraron más favorables para VMM en todas las ciudades analizadas. Las disminuciones en la categoría de impacto CED resultaron iguales a 7,5%, 10,4% y 11,4% para las ciudades de Antofagasta (Z1), Santiago (Z3) y Concepción (Z4) respectivamente. Por otro lado, las disminuciones en la categoría de impacto GWP resultaron iguales a 10,1%, 11,5% y 13% para las mismas ciudades respectivamente. Diferencias que se espera sean mayores si también fuesen incorporados los requerimientos de refrigeración. Los resultados denotan que a mayores exigencias climáticas (mayores Grados-Día), mayores serán las diferencias esperadas entre los modelos VMA y VMM, justificando así el predominio de la vivienda social estructurada con muros de madera en las zonas térmicas Z5, Z6 y Z7 de Chile (Bunster & Noguchi, 2015).

Al analizar las incidencias de cada fase en las categorías de impacto CED y GWP (ver Fig. 6.24 y Fig. 6.25), se aprecia que la fase de uso es la más incidente y que la fase de construcción es la menos incidente en todos los casos modelados. Lo que es congruente con lo establecido por la bibliografía y con los resultados de ACV en viviendas chilenas (Cárdenas et al., 2015)(Oyarzo & Peuportier, 2014)(C Muñoz,

Zaror, Saelzer, & Cuchí, 2012). Ahora bien, la bibliografía establece que en viviendas altamente eficientes, cuando se analiza la categoría de impacto CED, la incidencia de la fase de materiales se acerca a la de uso (Cabeza et al., 2014) (Gregory, 2017), lo que claramente acá no sucede para ningún caso.

Cabe destacar que los impactos ambientales medidos en las viviendas son sensibles a las variaciones en los coeficientes de emisiones asociados a la energía y a los materiales de construcción (Panagiotis Chastas et al., 2018)(Dixit, 2017). En este contexto, para el presente caso se debieron estimar algunos factores de emisión importes para el estudio, como fue el caso de la madera, pues en Chile la industria maderera se está abriendo a desarrollar EPD para sus productos, sin embargo, aún no hay resultados concretos al respecto (Wotherspoon, 2018). Esto se desprende del apartado 5.4 “Limitaciones de ACV en viviendas sociales chilenas” más atrás

A pesar de que no se estudiaron los costos de las soluciones constructivas, se podría decir que la diferencia de costos por m² entre los tipos de muros abordados no es muy alta (Ondac, 2018). Además, debido a que la vivienda de albañilería es más pesada, la vivienda en madera presenta una reducción de sus fundaciones y, por tanto, una reducción de costos. Lo que plantea la hipótesis de que no es el costo la principal variable que moviliza la decisión de optar por una solución u otra, sino más bien un elemento cultural.

Por último, reiterar que los resultados que se presentan en este caso de estudio corresponden a una vivienda social unifamiliar, por lo que se espera que los impactos ambientales medidos en las categorías CED y GWP sean menores cuando se trate de viviendas sociales pareadas o colectivas (ver Tabla 27 más atrás) (Evangelista et al., 2018).

6.3.7. Conclusiones en torno al caso

Los indicadores medioambientales para las categorías de impacto CED y GWP se mostraron mejores para la vivienda estructurada con muros de madera. Las diferencias favorables aumentarían si las viviendas sociales también se refrigeraran, lo que se evidencia en las mejoras significativas de confort térmico cuando se mide el TNC. Las mejoras en el TNC deben considerarse importantes debido al aumento gradual de las temperaturas en el mundo y, por tanto, a las mayores necesidades de refrigeración que éstas presentarán en el futuro (Yang et al., 2014).

La carga ambiental en la fase de materiales cae significativamente para la vivienda estructurada en madera, pudiéndose decir con relativa precisión que los indicadores ambientales analizados en esta fase caen en aproximadamente un tercio – 32% y 35,6% para EE y GHG respectivamente – cuando se opta por la solución con muros estructurados en madera.

Se confirma lo señalado por la literatura respecto a las incidencias de las fases analizadas para las categorías de impacto ambiental CED y GWP, donde la fase de uso es la más incidente, seguida por la fase de materiales y luego, muy poco incidente, la fase de construcción. Sin embargo, hay que considerar que este es un resultado esperado para las viviendas actuales. Previéndose en el futuro que otras etapas tomen mayor relevancia en la medida que las viviendas se hagan más sustentables, como es el caso de las fases de materiales y la desuso.

Conforme a lo abordado en el apartado 5.4 “Limitaciones de ACV en viviendas sociales chilenas” más atrás, al momento definir los coeficientes de emisiones, para la energía o los materiales de construcción, se encontró muy poca información formal desde los organismos gubernamentales chilenos. Lo mismo ocurrió con las empresas productoras de materiales de construcción en Chile, donde pocas exhibieron los EPD para sus productos construcción. Evidenciando que en materia de inventario de productos de construcción queda mucho por hacer en Chile, donde los vínculos entre el sector público y privado deben estrecharse para estandarizar los procesos

pertinentes. Proveer información de inventario ambiental más exacto y preciso para Chile, permitirá realizar ACV que permitan distinguir con mayor confiabilidad las diferencias ambientales entre proyectos de construcción. (Hoxha, Habert, Lasvaux, Chevalier, & Le Roy, 2017) (Dixit, 2017).

Los resultados en el presente caso responden solo una fracción menor de las tipologías para viviendas sociales chilenas, pero si a la materialidad frecuente en muros (albañilería). Para análisis globales se debieran incorporar nuevas materialidades y nuevas tipologías, tales como, viviendas pareadas, en fila o colectivas (departamentos) (ver Tabla 27 más atrás). Estos últimos tipos presentan menores consumos energéticos en relación a la vivienda aislada (Bustamante et al., 2013), por lo que la incidencia de la fase de uso en las categorías de impacto CED y GWP debiera ser algo menor en estos casos. Este nuevo aspecto, sumado a la incorporación de aspectos económicos, de consumo de energía para otras necesidades (agua caliente sanitaria, iluminación, etc.) y de energías alternativas, como también, la incorporación de la fase de desuso en los ACV y su respectiva sensibilización de variables, abren nuevas líneas de investigación futuras para los ACV en viviendas sociales chilenas.

El muro de albañilería presenta una carga ambiental importante en contraste a los otros subsistemas de las viviendas modeladas. Además, debido los refuerzos en acero u hormigón armado presentes en la albañilería chilena, los resultados para este tipo de muro se mostraron superiores a los presentes en otras investigaciones que han abordado la albañilería en el mundo. Esto refuerza lo planteado por la bibliografía al establecer que es difícil contrastar resultados entre investigaciones dado el gran número de variables que inciden en los resultados (Abd Rashid & Yusoff, 2015) (Anand & Amor, 2017)

Por último, sustentado en los indicadores obtenidos para TNC, CED y GWP, se concluye que la vivienda social materializada con muros estructurados en madera aislados presentó un mejor desempeño ambiental y un mejor confort térmico. Además, destacar que ninguna de las viviendas modeladas, las cuales responden a la normativa vigente en Chile, presentó consumos de energía que respondan a

estándares de eficiencia energética planteados como meta por el gobierno chileno al 2050.

6.4. Caso 4: Evaluación económica de inversiones de eficiencia energética para disminuir el consumo de energía para calefaccionar una vivienda social materializada en albañilería

6.4.1. Introducción al caso

Conforme a la “Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social” (Bustamante et al., 2013), al “Manual acondicionamiento térmico, criterios de intervención” para viviendas chilenas (CDT, 2015b) y al estudio sobre la “Evaluación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para una casa representativa en diferentes climas de Chile” (Ortega, 2017), en el presente caso se evaluarán alternativas de inversión en eficiencia energética que permitan disminuir la demanda de energía para calefaccionar la vivienda definida en el apartado 6.2 más atrás. Para abordar este caso se tomarán de referencia los resultados de demanda para calefaccionar en las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción en el caso previo (apartado 6.3.5). Las alternativas de inversión se evaluarán bajo un contexto convencional (estático), en el que se contrastará el NPV para escenarios donde variará el precio de la energía, el horizonte de tiempo y la tasa de descuento, pues son estas variables las que resultan incidentes al momento de evaluar las inversiones de eficiencia energética en las viviendas de acuerdo a lo establecido en apartado número 4 más atrás. Luego, para no dejar de considerar los aspectos de irrevocabilidad y el análisis secuencial dinámico, lo que podría llevar a decisiones equivocadas cuando se decide por mejoras en la dotación de desempeño energético de un edificio de acuerdo a lo establecido en el apartado 4.2, se adoptarán suposiciones plausibles sobre el futuro que llevarán a contrastar, para una de las alternativas de inversión en la ciudad de Santiago, la situación entre “escoger o

perder” (“Choose or Loose”) o “Esperar y aprender” (“Wait and Learn”) asociadas a los análisis convencionales o secuenciales respectivamente. En este contexto, se plantean los siguientes objetivos para el caso: a) Determinar los ahorros en el consumo de energía para calefaccionar en las tres zonas climáticas dada ciertas inversiones de eficiencia energética para la envolvente, b) Evaluar 4 alternativas de inversión en eficiencia energética que busquen minimizar el consumo de energía para calefaccionar una vivienda conforme a los criterios definidos en el apartado 4.2.3 más atrás y c) Contrastar la decisión entre invertir hoy (“escoger o perder”) en una mejora de desempeño energético, o bien, esperar a invertir mañana (“esperar y aprender”) en base a un escenario futuro incierto plausible (Verbruggen et al., 2011).

6.4.2. Antecedentes y alcances metodológicos

La secuencia metodológica para responder a los objetivos del caso es la siguiente:

1. Se tomarán los archivos .idf (EnergyPlus Input Data File) del caso de estudio anterior y serán ajustadas las envolventes de la vivienda conforme a dos propuestas de mejora. Una propuesta tradicional, que aborda cambios a partir de la asequibilidad de recursos materiales, humanos y de equipamiento en las diferentes ciudades a costos moderados. Esta propone cambiar ventanas y mejorar el aislamiento en cielo y muros conforme a las soluciones propuestas en la Fig. 6.27. Una segunda propuesta se ajustará a requerimientos de viviendas altamente eficientes, para lo cual se tomará de referencia el caso “The Eco-Refurbishment of a 19th Century Terraced House: Energy and Cost Performance for Current and Future UK Climates” (Mohammadpourkarbasi & Sharples, 2013). La primera y segunda propuesta de mejora se han definido como mejoras “A” y “B”, respectivamente. Las transmitancias para cada caso se aprecian en la Tabla 62.
2. Se determinarán las inversiones de la mejoras conforme al “Manual de costos, materiales y actividades para la construcción 2018” (ONDAC, 2018) (Un ejemplo se aprecia en el Anexo 9) e información suministrada por proveedores

- e instaladores de elementos o equipamiento de construcción (ventanas, puertas u otros subsistemas en la vivienda). Se determinará una tabla de inversiones donde se contrasten los casos de mejoras “A” y “B”, y una tabla que contraste las transmitancias térmicas antes y después de las mejoras.
3. Editados los archivos .idf en EnergyPlus, se determinarán las demandas de energía para cada caso. Luego se determinarán los consumos esperados para las viviendas mejoradas conforme al rendimiento promedio de los sistemas para calefaccionar. Estos se determinarán a partir de la distribución de los tipos de energía utilizados para calefaccionar en las diferentes ciudades y sus respectivos rendimientos por sistema (ver Tabla 66). Se tomarán de referencia los rendimientos de sistemas por tipo de combustible según el “Estudio comparativo del recambio de calefactores a leña por sistema eléctrico invierno” (Otárola, 2016).
 4. Determinados los consumos pre y post mejoras “A” y “B”, se determinarán los ahorros de energía a partir de diferentes escenarios para el precio de la energía (precios mínimos $P_{\min.}$, precios esperados $P_{\text{esp.}}$ y precios máximos $P_{\max.}$) a un costo de capital igual a $r=3,5\%$ real anual. Desde que la tasa de descuento es real, se trabajará con moneda reajutable UF (La Unidad de Fomento UF es una unidad monetaria reajutable que se utiliza en Chile. El tipo de cambio entre la UF y el peso chileno se ajusta constantemente a la inflación para tener su valor diario). Se tomarán como precios base los establecidos en la Tabla 6 “Estimación de precios para los combustibles habituales para calefaccionar en Chile por unidad de energía año 2018” determinados más atrás.
 5. A partir de los resultados previos, se generarán también una tercera (“C”) y cuarta propuesta (“D”) de mejoras en eficiencia energética, asociadas a la incorporación de un sistema de climatización por bomba de calor geotérmica; cuyas inversiones, costos de mantenimiento y otros supuestos derivan del estudio “Evaluación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para una casa representativa en diferentes climas de Chile” (Ortega, 2017). Estas alternativas de inversión se evaluarán y contrastarán

con las alternativas “A” y “B” para un horizonte de 20 años y, diferentes precios de energía ($P_{\min.}$, $P_{\text{esp.}}$ y $P_{\max.}$) y costos de capital anual ($r=3,5\%$ y $r=7,5\%$ real).

6. Determinado los ahorros de energía bajo diferentes escenarios y las inversiones de eficiencia energética, entonces, se procederá a determinar el indicador NPV conforme a la Ecuación 22 abordada en el apartado 4.2 más atrás. Luego se evaluarán, bajo un contexto convencional (“escoger o perder”), las mejoras conforme a la interpretación de este indicador NPV para cada escenario establecido. Algunos alcances y limitaciones para el análisis convencional son:

- a. No se consideran gastos de mantenimiento en la vivienda, pues se considera mínimo y común para los casos con mejoras en aislamiento, sin embargo, sí se considera mantención del sistema de bomba de calor en los casos “C” y “D”.
- b. Se considera que el costo de la inversión no varía conforme a la ciudad y que la variación de precios de la energía responde a las proyecciones al año 2050 descritas en el apartado 2.3.5 “Precio de la energía en el sector residencial” más atrás, variaciones que se supondrá distribuyen en el tiempo uniformemente.
- c. Se trabajará en moneda reajutable UF, la que equivale a \$27.579,51 al 12/04/2019 (\$747,62 equivale 1 euro al 12/04/2019).
- d. No se incluyen ahorros por enfriamiento, pues las viviendas sociales no suelen enfriarse conforme a lo establecido en el apartado 3.5.1 (Las viviendas que se refrigeran no alcanzan a ser el 1%).
- e. En la vivienda modelada no se considera variación en el tipo de combustible usado y en el tipo de sistema para calefaccionar en el futuro.
- f. Se asumen valores residuales iguales a cero (supone alta irrevocabilidad de la mejora y liquidez solo con la venta de la vivienda) y una vida útil

igual a 20 años para el sistema de climatización geotérmico con bomba de calor (AFEC, 2019).

- g. No se suponen restricciones de terreno para el desarrollo del sistema de climatización geotérmico con bomba de calor (subsidio de construcción en terreno propio).
 - h. Para el análisis económico se considerarán horizontes de 10, 20 o 30 años (definidos como $h=10$, $h=20$ y $h=30$ en los resultados), una tasa de descuento de 3,5% real conforme a Morrissey y Horne para análisis entre 0 y 30 años (Morrissey & Horne, 2011). La tasa propuesta de 7,5% real pensada en el financiamiento de las inversiones a mayor costo, es decir, a tasas corrientes considerando que la inflación en Chile ronda entre el 3% y 3,5% (Emol, 2019).
7. Finalmente, para contrastar la decisión entre invertir hoy (“escoger o perder”) o esperar invertir mañana (“esperar y aprender”), se tomará de referencia la alternativa de inversión “D” para la ciudad de Santiago (Capital de Chile, ubicada en la Región Metropolitana que concentra la mayor proporción de viviendas en Chile, ver Fig. 3.14 más atrás). Esta alternativa combina el aislamiento térmico (Alternativa “A”) – solución frecuente en el mejoramiento del desempeño energético de edificios (De Boeck, Verbeke, Audenaert, & De Mesmaeker, 2015), que además presenta material aislante EPS (Poliestireno Expandido, o en inglés, Expanded Polystyrene) con buen desempeño ambiental en la rehabilitación de viviendas (Nicolae & George-Vlad, 2015) – con el uso de una tecnología (bomba de calor geotérmica, alternativa “C”) que hoy presenta un alto costo relativo, pero que podría bajar en el tiempo conforme al aumento en su frecuencia de uso y a cómo lo han hecho otras tecnologías de eficiencia energética en el mundo (Ritchie & Roser, 2018) (Harfgard, Sánchez, Flores, & González, 2016). En este contexto, con base a lo establecido en los apartados 2.3.5 y 4.2 más atrás, se establece el siguiente escenario futuro incierto plausible para la modelación secuencial:

- a. Se invertirá hoy en aislamiento (alternativa de inversión “A”) y se modelará invertir hoy (escoger o perder) o mañana (esperar y aprender) en tecnología (alternativa de inversión “C”). La postergación de la decisión de invertir en tecnología (bomba de calor geotérmica, inversión “C”) será a 5 años y a 10 años en el futuro (tiempo futuro). El precio de la tecnología define, principalmente, el escenario de incertidumbre y desconocimiento.
- b. El precio de la energía se incrementa conforme a los valores en Tabla 69 más adelante y se modelará para tasas de descuento iguales a 3,5% y 7,5% conforme a la justificación previa. El precio de la energía esperado cuando se utiliza la bomba de calor geotérmica es asumido 100% electricidad y cuando esta inversión no se presenta igual al precio promedio para el mix de combustible esperado para calefaccionar en Santiago (ver Tabla 66 más adelante). Cuando se trate del uso de electricidad, el precio y el crecimiento asumido en el tiempo serán obtenidos de la Fig. 6.30 más adelante.
- c. Horizonte de análisis para 30 años con reinversión de la inversión de eficiencia energética cuando corresponda (bomba de calor presenta vida útil de 20 años).
- d. La inversión tecnológica asociada a la bomba de calor geotérmica bajará un 50% durante 30 años (entre 2018 y 2048), valor plausible conforme a la inversión en energías renovables (la masificación tecnológica puede generar un conjunto de factores que harán que los costos disminuyan, tal como lo ha hecho la tecnología fotovoltaica, ver Fig. 2.37 más atrás) y a que dicha tecnología en Chile todavía se encuentra en un punto medio de su curva de experiencia y dispone de potencial tanto en reducción de costos como en mejoras de rendimientos (Harfgard et al., 2016). Las características de la bomba de calor corresponden a las establecidas en el punto previo número 5, sin embargo, el costo de mantención decenal se estimará a partir de la proporción entre este

costo y el valor de la inversión, es decir, igual 38,54% para Santiago (ver Tabla 64 más adelante).

- e. El aumento en el precio de la energía y la baja en el valor de la inversión tecnológica en el tiempo (inversión en bomba de calor geotérmica) serán función de un “indicador de conciencia” (awereness index) establecido por Verbruggen como una probabilidad acumulada en el tiempo (Verbruggen et al., 2011). Para este caso de estudio, definido como el alcance de una conciencia social sustentable (frecuencia acumulada en el horizonte de análisis). De este modo, 0% representa que no ha habido conciencia social hacia un cambio sustentable y 100% cuando la sociedad ha volcado sus decisiones hacia la sustentabilidad completamente. En esto se generan tres posibles velocidades para este alcance de conciencia: Rápido (“Fast”), Lento (“Slow”) y Lineal (“Linear”). Este último corresponde al escenario definido para la evaluación convencional. Estas probabilidades se aprecian en la Fig. 6.26, la que muestra caminos de inicio rápido, lineal y lento, cada 5 años, en decisiones sociales hacia la sustentabilidad (escenario de incertidumbre), por ejemplo, la ruta rápida (“Fast”) asigna probabilidades de 0,35, 0,25, 0,20 y 0,20 (Verbruggen et al., 2011) para los años 2023, 2028, 2033 y 2038, respectivamente.
- f. Dado lo anterior, se supondrá que una mayor conciencia sustentable propiciará la mayor eficiencia e inversión tecnológica en el país, por tanto, la subida de precio de la energía en el tiempo (según los aumentos establecidos en Tabla 69 más adelante) y la caída en el precio de la tecnología sustentable serán “Slow” y “Fast” respectivamente. Contrariamente, menor conciencia (mayor uso de recursos fósiles, recursos contaminantes y cada vez más escasos), hará que el aumento del precio de la energía y la caída en el precio de la tecnología sustentable sea “Fast” y “Slow” respectivamente. Esto dentro del horizonte de análisis de 30 años según lo establecido en la Fig. 6.26.

Fig. 6.26 Patrones de conciencia climática supuestos para los próximos 30 años. Fuente: Adaptada para el presente caso de estudio de (Verbruggen et al., 2011).

6.4.3. Descripción de las mejoras

La propuesta de mejora “A” corresponde al cambio de ventanas y mejoras de aislamiento en cielo y muros. Para las ventanas se proponen vidriado termopanel de transmitancia térmica informada por el proveedor igual a $2,4 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Para el cielo se considera la incorporación de 50mm de aislación térmica adicional que incrementa en $1,19\text{m}^2\text{°C/W}$ la resistencia térmica del cielo, el cálculo de la nueva transmitancia térmica se realizó conforme a norma Nch853 (ver Anexo 2). En los muros de envolvente se consideró sistema de aislamiento exterior pintado (EIFS), el que aumenta la resistencia térmica del muro en $1,39 \text{ m}^2\text{°C/W}$. La determinación de las nuevas transmitancias térmicas para los elementos de la envolvente mejorados, se presentan en la columna “U mejora A” de la Tabla 62.

Para la propuesta B, se han tomado de referencia las mejoras definidas en el caso “The Eco-Refurbishment of a 19th Century Terraced House: Energy and Cost Performance for Current and Future UK Climates”. En este caso se propone una estanquidad a infiltraciones que cumplan parámetros Passive House (hermeticidad a 50Pa, es decir, $\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ y uso de ventilación mecánica con recuperación de calor.), límites en el valor U global de la envolvente externa, la eliminación de puentes térmicos, y un consumo general de energía para la calefacción de espacios limitada a 15 kWh/m^2 de superficie de suelo por año. Las nuevas transmitancias térmicas definidas, por proveedor o calculas conforme a NCh853, para esta propuesta de mejora se presentan en la columna “U mejora B” de la Tabla 62.

Conforme a la metodología planteada en el punto previo 6.4.2, en la Tabla 63 se presentan los costos iniciales (o inversiones de eficiencia energética) para el reacondicionamiento de la envolvente que responde a una mejora tradicional (Mejora A, color celeste) y una de alto desempeño energético (Mejora B, color verde). De este modo, se estiman inversiones de 97,76UF (\$53.390 por m^2 o €71,4 por m^2) para y 290,5UF (\$158.650 por m^2 o €212,2 por m^2) respectivamente.

Tabla 62 Transmitancias térmicas para la vivienda y sus mejoras A y B.

Elementos de envolvente	Área (m^2)	U original ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)	U mejora A ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)	U mejora B ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
Ventanas	6,88	5,80	2,40	0,82
Muros	57,03	1,70	0,51	0,15
Puertas	4,5	3,00	3,00	1,00
Cielo/piso	50,5	0,47	0,30	0,15

Fig. 6.27 Propuestas de cambios en muros, cielo y ventanas para mejora A.

Tabla 63. Inversiones iniciales para mejoras en acondicionamiento A y B.

	Ítem	Material (UF)	Instalación (UF)	Total (UF)
Mejora A	Nuevas ventanas en la vivienda de vidrioado doble mejora A	24,32	13,10	37,42
	Sistema de aislamiento exterior pintado	21,65	29,53	51,18
	Aumento aislamiento en cielo	6,41	2,75	9,16
Mejora B	Mejora en aislamiento y estanqueidad muros (tabiquería EIFS)	110,73	38,76	149,49
	Mejora aislamiento y estanqueidad en cielo	16,51	12,48	28,99
	Nuevas puertas y ventanas vidrioado Low-E, más sistema intercambiador de calor	84,07	27,93	112,00

Dada la estimación de los costos en Tabla 63, y los resultados del estudio “Evaluación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para una casa representativa en diferentes climas de Chile” (Ortega, 2017), la Tabla 64 presenta las estimaciones de las inversiones, mantenciones y los rendimientos para los sistemas dispuestos en las ciudades del presente caso. Estos costos definen las propuestas de mejoras en eficiencia energéticas “C” y “D”. La primera corresponde a prescindir de las mejoras en aislamiento en la vivienda y solo incorporar un sistema de climatización basado en el uso una bomba de calor geotérmica con alto rendimiento y, la segunda, a la incorporación de dicho sistema sumado a la mejora “A”.

Tabla 64. Inversiones, mantenciones y rendimientos para sistemas de climatización geotérmica con bomba de calor.

Ítem	Inversión t=0	Mantención (decenal)	rendimiento sistema para calefacción
Sistema de climatización con bomba de calor geotérmica en Santiago	161,9	62,4	378%
Sistema de climatización con bomba de calor geotérmica en Antofagasta	148,5	57,4	378%
Sistema de climatización con bomba de calor geotérmica en Concepción	149,7	58,1	352%

Considerando un valor promedio para la inversión y costos de mantención del sistema en Tabla 64 (dada la baja dispersión entre las ciudades), se pueden considerar los siguientes costos actualizados por tipo de inversión para los análisis más adelante: a) alternativa A=97,76UF, b) alternativa B=290,5UF, c) alternativa C=225,21UF para $r=3,5\%$ o alternativa C=196,1UF para $r=7,5\%$ y, d) alternativa D=322,97UF para $r=3,5\%$ o alternativa C=293,86UF para $r=7,5\%$.

6.4.4. Resultados para proyecciones de precio, ahorros de energía e indicadores económicos.

Editados los archivos .idf, conforme a las soluciones propuestas en Tabla 62 y Tabla 63, los resultados de las nuevas demandas se muestran en la Tabla 65.

Tabla 65. Demandas de energía para calefaccionar pre y post mejoras

Ítem	Energía demandada para calefaccionar en kWh/m ² año		
	Santiago	Antofagasta	Concepción
Demanda pre-mejora	104,55	48,43	110,94
Demanda post-mejora A	50,66	10,32	49,61
Demanda post-mejora B	3,91	0,00	1,66

Suponiendo los rendimientos para equipos de calefacción que utilizan gas licuado de petróleo, electricidad, leña y kerosene iguales a 95%, 100%, 60% y 95% respectivamente, conforme al “Estudio comparativo del recambio de calefactores a leña por sistema eléctrico invierno – 2016” (Otárola, 2016), y precios para la energía conforme a Tabla 6 “Estimación de precios para los combustibles habituales para calefaccionar en Chile por unidad de energía año 2018” en el título 2.3.5 más atrás, se presentan en la Tabla 66 los promedios ponderados para los rendimientos de los sistemas y los precios de la energía para calefaccionar en las ciudades de Antofagasta, Concepción y Santiago.

Tabla 66. Distribución del combustible utilizado para calefaccionar, promedios ponderados para los rendimientos de los sistemas usados y precio de la energía para calefaccionar por ciudad.

Ciudad	Gas licuado	Electricidad	Leña o derivados de madera	Kerosene	Rendimiento promedio ponderado de los sistemas para calefaccionar	Precio promedio ponderado para el mix de combustible (UF/kWh)
Antofagasta	40,0%	2,6%	31,6%	25,8%	84,1%	0,0024981
Concepción	14,4%	0,6%	74,2%	10,8%	69,1%	0,0018215
Santiago	56,3%	6,2%	9,5%	28,0%	92,0%	0,0029323

Conforme a los rendimientos determinados en Tabla 66, son calculados los consumos y ahorros respectivos a cada mejora conforme a Fig. 2.76 más atrás. Estos se evidencian en la Tabla 67.

Tabla 67. Consumo de energía y ahorros para calefacción frente a mejoras “A” y “B”.

Ítem	Energía consumida para calefaccionar en kWh/m ² año		
	Santiago	Antofagasta	Concepción
Consumo pre-mejora	113,65	57,58	160,54
Consumo post-mejora A	55,07	12,27	71,80
Ahorro anual mejora A	58,58	45,32	88,75
Consumo post-mejora B	4,25	0,00	2,40
Ahorro anual mejora B	109,40	57,58	158,14

Dados los resultados en las Tabla 65 y Tabla 67 y, los rendimientos para los sistemas de climatización con bomba de calor geotérmica en la Tabla 64, se determinaron los ahorros para las mejoras “C” y “D” que se presentan en la Tabla 68.

Tabla 68. Consumo de energía y ahorros para calefacción frente a mejoras “C” y “D”.

Ítem	Energía consumida para calefaccionar en kWh/m ² año		
	Santiago	Antofagasta	Concepción
Consumo pre-mejora	113,65	57,58	160,54
Consumo post-mejora C	27,66	12,81	31,52
Ahorro anual mejora C	85,99	44,77	129,03
Consumo post-mejora D	13,40	2,73	14,09
Ahorro anual mejora D	100,24	54,85	146,45

La Fig. 6.28 contrasta los precios esperados para el gas licuado de petróleo, electricidad, leña y kerosene. Por otro lado, las Fig. 6.29, Fig. 6.30, Fig. 6.31 y Fig. 6.32 muestran las modelaciones para escenarios de precios constantes, precios mínimos, precios esperados y precios máximos para gas licuado de petróleo, electricidad, leña y kerosene. Esta modelación obedece a las proyecciones para los precios de la energía abordados en el apartado 2.3.5 “Precio de la energía en el

sector residencial” más atrás. Estos precios en el tiempo permitirán determinar la tasa de crecimiento de los precios del mix de combustibles utilizados en cada ciudad para calefaccionar. Estas tasas de crecimiento se muestran en la Tabla 69. Cuando se modele la evaluación de las alternativas “C” y “D”, solo se considerará el crecimiento modelado para los precios de la electricidad conforme a la Fig. 6.30.

Fig. 6.28 Modelación para precios esperados de los combustibles para calefaccionar.

Fig. 6.29 Modelación de precios para gas licuado de petróleo

Fig. 6.30 Modelación de precios para electricidad

Fig. 6.31 Modelación de precios para Leña

Fig. 6.32 Modelación de precios para Kerosene

Tabla 69. Tasas de crecimiento anual estimadas para el precio del mix de combustible para calefaccionar por región.

Ciudad	Gas licuado	Electricidad	Leña	Kerosene	TASA CRECIMIENTO MÍNIMA	TASA CRECIMIENTO ESPERADA	TASA CRECIMIENTO MÁXIMA
Antofagasta	40,0%	2,6%	31,6%	25,8%	0,16%	1,96%	7,33%
Concepción	14,4%	0,6%	74,2%	10,8%	0,25%	2,29%	8,37%
Santiago	56,3%	6,2%	9,5%	28,0%	0,11%	1,80%	6,76%

Estimadas las tasas de crecimiento esperadas para el mix de combustible utilizados para calefaccionar en las ciudades respectivas, y considerando una tasa de descuento igual a 3,5% conforme a lo recomendado para las evaluaciones de eficiencia energética conforme a lo planteado en el apartado “a. El tiempo futuro” del título 4.2.1, las Fig. 6.33, Fig. 6.34 y Fig. 6.35 contrastan el NPV para las alternativas de mejoramiento en la envolvente “A” y “B” (Un ejemplo en la determinación del NVP para las alternativas A y B, considerando $r=3,5\%$ y $h=20$ años, se aprecia en el Anexo 11). Esto considerando horizontes de análisis para 10, 20 y 30 años y tasas de crecimiento para el precio de la energía conforme a la Tabla 69, es decir, crecimiento mínimo, ($P_{mín.}$), crecimiento esperado ($P_{esp.}$) y precios máximos ($P_{máx.}$).

Fig. 6.33 Contraste del NPV para las alternativas de mejoramiento en la envolvente A y B para diferentes horizontes de análisis, considerando un crecimiento mínimo en los precios de la energía y costo de capital igual a 3,5%.

Fig. 6.34 Contraste del NPV para las alternativas de mejoramiento en la envolvente A y B para diferentes horizontes de análisis, considerando un crecimiento esperado en los precios de la energía y costo de capital igual a 3,5%.

Fig. 6.35 Contraste del NPV para las alternativas de mejoramiento en la envolvente A y B para diferentes horizontes de análisis, considerando un crecimiento máximo en los precios de la energía y costo de capital igual a 3,5%.

Definidos las inversiones, los costos de mantenimiento (cada diez años) y los ahorros de energía para las alternativas “C” y “D”, conforme a tablas Tabla 64 y Tabla 68, fueron determinados los NPV de las alternativas “C” y “D” conforme a Ecuación 22. Esto considerando un horizonte de 20 años (periodo donde el NVP para la alternativa “A” es mayor a cero conforme a Fig. 6.34), un valor residual de cero en $t=20$ año (alta irrevocabilidad de la inversión, liquidez solo en la venta de la vivienda), estimación de precios conforme a Fig. 6.30 para electricidad y tasas de interés de 3,5% considerando una inversión de interés gubernamental o 7,5% considerando la

inversión de interés particular. Para estas condiciones, en horizonte de tiempo y tasas, el NPV para las alternativas de inversión “C” y “D” fue contrastado con los resultados para las alternativas de inversión “A” y “C”. Esto se muestra en las Fig. 6.36 a la Fig. 6.41.

Fig. 6.36 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\min.}$, $h=20$ y $r=3,5\%$.

Fig. 6.37 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\text{esp.}}$, $h=20$ y $r=3,5\%$.

Fig. 6.38 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\text{máx.}}$, $h=20$ y $r=3,5\%$.

Fig. 6.39 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{\text{mín.}}$, $h=20$ y $r=7,5\%$.

Fig. 6.40 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{esp.}$, $h=20$ y $r=7,5\%$.

Fig. 6.41 Contraste del NPV para alternativas A, B, C y D considerando $P_{máx.}$, $h=20$ y $r=7,5\%$.

Con respecto a la modelación secuencial para la propuesta de inversión “D” – invertir ahora en la bomba de calor geotérmica o esperar invertir mañana bajo un escenario futuro incierto plausible (Fast, Linear o Slow) –, cuyos supuestos han

quedado establecidos en el punto 7 dentro del apartado 6.4.2 más atrás, se consiguieron los siguientes resultados:

- a. Para el precio de la energía y su crecimiento esperado (P_{esp}), establecidos en la Fig. 6.30 para electricidad y en Tabla 66 y Tabla 69 para el mix de combustible, se obtuvieron los resultados que se muestra en la Fig. 6.42 para una tasa de descuento de 3,5%.
- b. Para el precio de la energía y su crecimiento máximo ($P_{máx}$), establecidos en la Fig. 6.30 para electricidad y en Tabla 66 y Tabla 69 para el mix de combustible, se obtuvieron los resultados que se muestra en la Fig. 6.43 para una tasa de 3,5%.
- c. Para el precio de la energía y su crecimiento esperado (P_{esp}), establecidos en la Fig. 6.30 para electricidad y en Tabla 66 y Tabla 69 para el mix de combustible, se obtuvieron los resultados que se muestra en la Fig. 6.44 para una tasa de descuento de 7,5%.
- d. Para el precio de la energía y su crecimiento máximo ($P_{máx}$), establecidos en la Fig. 6.30 para electricidad y en Tabla 66 y Tabla 69 para el mix de combustible, se obtuvieron los resultados que se muestra en la Fig. 6.45 para una tasa de 7,5%.

Las Fig. 6.42 a la Fig. 6.45 muestran, para la ciudad de Santiago, el NPV (eje de ordenadas) para la alternativa de inversión “D” conforme a diferentes precios de energía (P_{esp} . o $P_{máx}$.), tasa de descuento y momentos de decisión en el horizonte de análisis, presente (cero en eje de abscisas) o futuros (quinto y décimo año en eje abscisas) en el que se efectúa la inversión tecnológica respectiva (bomba de calor geotérmica). Lo anterior bajo un escenario futuro incierto establecido para en la Fig. 6.26 más atrás.

Fig. 6.42 NPV para alternativa de inversión "D" bajo escenarios futuros inciertos plausibles y diferentes momentos para invertir en la bomba de calor geotérmica ($r=3,5\%$, Pesp. y $h=30$ años)

Fig. 6.43 NPV para alternativa de inversión "D" bajo escenarios futuros inciertos plausibles y diferentes momentos para invertir en la bomba de calor geotérmica ($r=7,5\%$, Pesp. y $h=30$ años)

Fig. 6.44 NPV para alternativa de inversión "D" bajo escenarios futuros inciertos plausibles y diferentes momentos para invertir en la bomba de calor geotérmica ($r=3,5\%$, $P_{\text{máx.}}$ y $h=30$ años)

Fig. 6.45 NPV para alternativa de inversión "D" bajo escenarios futuros inciertos plausibles y diferentes momentos para invertir en la bomba de calor geotérmica ($r=7,5\%$, $P_{\text{máx.}}$ y $h=30$ años)

6.4.5. Análisis y discusión del caso

Conforme a la Tabla 62, la transmitancia global (considerando superficies de cielo, muros, ventanas y puertas) fueron de $1,46\text{W/m}^2\text{°C}$, $0,62\text{ W/m}^2\text{°C}$ y $0,22\text{W/m}^2\text{°C}$ para los casos original, mejora “A” y mejora “B” respectivamente. Es decir, se presentaron disminuciones en la transmitancia, respecto del caso original, de 57,5% y 84,9% para las alternativas “A” y “B” respectivamente. Conforme a estas reducciones, la alternativa “A” generó consumos para calefaccionar anuales iguales a $55,07\text{ kWh/m}^2$, $12,27\text{kWh/m}^2$ y $71,8\text{kWh/m}^2$ en las ciudades de Santiago, Antofagasta y Concepción respectivamente. Por otro lado, la alternativa “B” generó consumos para calefaccionar anuales iguales a $4,25\text{ kWh/m}^2$, cero y $2,4\text{ kWh/m}^2$ en las ciudades de Santiago, Antofagasta y Concepción respectivamente. Es decir, conforme a Tabla 67, reducciones en el consumo de energía para calefaccionar entre 51,5% y 78,7% para la primera alternativa y, para la segunda alternativa, reducciones entre 96,2% y 100%. Lo anterior evidencia la fuerte relación entre la disminución de la transmitancia promedio y la reducción en la demanda de energía. Por otro lado, señalar que a pesar de que la solución “B” no presenta una transmitancia global deseable menor o igual $0,15\text{ W/m}^2\text{°C}$ (Mohammadpourkarbasi & Sharples, 2013), el orden de las disminuciones obtenidas es significativa y responde a objetivos de eficiencia energética para viviendas ULEB (Schüwer, Klostermann, Moore, & Thomas, 2012).

Por otro lado, si se considera un PEF igual a 1,1 para GLP; 2,475 para electricidad; 1,07 para kerosene, (promedios entre mínimo y máximo conforme a Tabla 15 más atrás) y 1,037 para la leña (conforme a Tabla 14 más atrás), los PEF para Santiago, Antofagasta y Concepción (conforme a distribución de combustibles usados para calefaccionar en Tabla 66) serían de 1,11; 1,06 y 1,17 respectivamente. En este contexto, la energía primaria consumida para calefaccionar en “A” sería de $64,43\text{kWh/m}^2$, $13,62\text{kWh/m}^2$ y $76,11\text{kWh/m}^2$ en las ciudades de Santiago, Antofagasta y Concepción respectivamente y; para la alternativa “B”, anuales iguales a $4,97\text{ kWh/m}^2$, cero y $2,54\text{ kWh/m}^2$ en las ciudades de Santiago, Antofagasta y Concepción respectivamente. Es decir, la alternativa “B” presentaría consumos de energía primaria para calefaccionar menores a 15kWh/m^2 en todas las ciudades, y solo la ciudad de Antofagasta para la alternativa “A”. Esto evidencia el bajo consumo de

energía primaria en el caso “B” y la dependencia climática en la definición de las mejoras en las viviendas, como es el caso de la vivienda modelada en Antofagasta, ubicada en la zona climática NL (Norte Litoral, ver Tabla 21) que presenta una oscilación térmica más favorable para invierno en relación a las otras dos ciudades.

Al observar el nivel de inversiones entre las alternativas “A” y “B”, se aprecia que se debió triplicar la inversión de la alternativa A para obtener consumos en calefaccionar bajo los 15kWh/m² al año de energía primaria. Esta mayor inversión representa el 72,6% del valor esperado para una viviendas social en Chile (en principio 400UF de acuerdo al apartado 3.6 más atrás), evidenciando el alto costo de oportunidad en la decisión de mejora “B” y la necesidad de estructurar la vivienda desde un principio (dada las soluciones de mejora pensadas en tabiquerías EIFS) en madera con aislamiento térmico, pues no hacerlo presenta un alto costo de irrevocabilidad conforme a lo establecido en el apartado “c. La irrevocabilidad” del título 4.2.1 “Consideraciones para la evaluación de inversiones de eficiencia energética” más atrás.

Las alternativas “C” y “D” no logran mejores resultados en consumo para calefacción que la alternativa “B”. Sin embargo, los consumos anuales de energía primaria para calefaccionar la vivienda en Santiago, Antofagasta y Concepción con la alternativa “D” serían iguales a 14,74kWh/m²; 2,89kWh/m² y 16,48kWh/m²; no cumpliendo con el deseable menor o 15kWh/m² solo en la ciudad de Concepción, pero con un valor muy cercano. En este contexto, las alternativas de inversión en eficiencia energéticas “B” y “D” serían preferidas, sin embargo, queda por analizar el contexto económico.

En relación a las proyecciones en los precios esperados para la energía (modelados a partir de las proyecciones abordadas en el apartado 2.3.5 “Precio de la energía en el sector residencial” más atrás), se aprecia que el incremento en el precio para la electricidad se muestra más favorable que para los otros combustibles (Ver Fig. 6.28), lo que potencia la hipótesis de la migración al uso de electricidad en el futuro, sobre todo a partir de las brechas que se presentan entre los escenarios para precios esperados y máximos en los casos del GLP, la leña y el kerosene, ver las Fig. 6.29, Fig. 6.31 y Fig. 6.32 respectivamente. Brecha que es mucho menor para

electricidad, presentándose incluso disminuciones de precios en el escenario $P_{\min}$. (Ver Fig. 6.30). Esto ratifica esperar que los edificios futuros serán energizados en su mayoría por energía eléctrica según lo establecido en el Fig. 2.29 (demandas de fuentes de energía pronosticadas para el sector residencial a nivel global) más atrás.

Al analizar el NPV para las alternativas de inversión “A” y “B” en la Fig. 6.33, dado el escenario de **precios mínimos**, costo de oportunidad igual a 3,5% y tres horizontes de análisis (10, 20 y 30 años), se aprecia lo siguiente:

- a. La alternativa “A” se presenta inconveniente en todas las ciudades para un horizonte de 10 años y, conveniente para todas las ciudades para un horizonte de 30 años y solo en Santiago y Concepción para un horizonte de 20 años.
- b. La alternativa “B” solo se presenta conveniente en Santiago para un horizonte de 30 años, presentando un NPV = 11,6UF.

Al analizar el NPV para las alternativas de inversión “A” y “B” en la Fig. 6.34, dado el escenario de **precios esperados**, costo de oportunidad igual 3,5% y tres horizontes de análisis (10, 20 y 30 años), se aprecia lo siguiente:

- a. La alternativa “A” se presenta inconveniente en todas las ciudades para un horizonte de 10 años y, conveniente para todas las ciudades para un horizonte sobre 20 años. Con mayores NPV para las ciudades de Santiago y Concepción. Sobre 46UF para 20 años y sobre 105UF para 30 años.
- b. La alternativa “B” se presenta conveniente solo en Santiago y Concepción para un horizonte de 30 años, presentando valores para el NPV iguales a 89,5UF y 75,2UF respectivamente.

Para precios mínimos y esperados, los $NPV > 0$ en las ciudades de Santiago y Concepción se muestran relativamente cercanos para las alternativas de inversión “A” y “B”. Valores que se alejan cuando se evalúan las inversiones a precios máximos.

Al analizar el NPV para las alternativas de inversión “A” y “B” en la Fig. 6.35, dado el escenario de **precios máximos**, costo de oportunidad igual 3,5% y tres horizontes de análisis (10, 20 y 30 años), se aprecia lo siguiente:

- a. La alternativa “A”, a excepción de la ciudad de Antofagasta para un horizonte de 10 años, se presenta conveniente para todos los demás escenarios.
- b. La alternativa “B” se presenta inconveniente en todas las ciudades para un horizonte de 10 años y, conveniente para todas las ciudades para un horizonte de 30 años y solo en Santiago y Concepción para un horizonte de 20 años.

Al contrastar el NPV de las alternativas de inversión A, B, C y D, para un horizonte de 20 años y un costo de capital de 3,5% anual (Fig. 6.36, Fig. 6.37, Fig. 6.38) se aprecia lo siguiente:

- a. A precios mínimos de energía, ninguna alternativa de inversión es conveniente en Antofagasta.
- b. A precios mínimos de energía, las alternativas de inversión A, C y D se muestran convenientes en Santiago y Concepción, con mayor NPV para la alternativa C. Sin embargo, esta alternativa presenta mayor inversión inicial que “A”. Por tanto, la alternativa “A” se esperaría preferible en familias donde el financiamiento es una restricción importante (Feinstein & Lupton, 2007).
- c. A precios esperados el escenario se mantiene pero con mayores NPV, sin embargo, la alternativa “A” se muestra conveniente para todas las ciudades.
- d. A precios máximos todas las alternativas de inversión se muestran convenientes para las ciudades de Santiago y Concepción y, solo la alternativa “A” para Antofagasta. Cabe destacar que a mayores precios la

alternativa A se muestra más conveniente para Santiago y Concepción a partir de la relación entre NPV y costos actualizados.

Al contrastar el NPV de las alternativas de inversión A, B, C y D, para un horizonte de 20 años y un costo de capital de 7,5% anual (Fig. 6.39, Fig. 6.40 y Fig. 6.41), se aprecia lo siguiente:

- a. A precios mínimos solo la alternativa “C” es conveniente en Santiago y, las alternativas “C” y “D” en Concepción. Donde “C” presenta mayores NPV y menores inversiones. Por tanto, se esperaría preferible. Todas las alternativas se muestran inconvenientes para Antofagasta.
- b. A precios esperados, las alternativas “A” y “C” se presentan convenientes en Santiago, ninguna en Antofagasta y, las alternativas “A”, “C” y “D” convenientes en Concepción. Basado en el nivel de inversión, las alternativas “A” debieran ser escogidas. Basados en la relación entre NPV y costos actualizados, debiera ser escogida la alternativa “C”.
- c. A precios máximos todas las alternativas de inversión se muestran convenientes en Concepción. Las alternativas “A”, “B” y “C” se muestran convenientes en Santiago y solo la alternativa “A” en Antofagasta. La alternativa “A” debiera ser escogida debido a que presenta menor inversión y mayor relación entre el NPV y los costos actualizados.

Destacar que el análisis previo responde a una evaluación económica estacionaria con base a parámetros determinísticos, lo que podría llevar a decisiones distintas si se considerara un análisis dinámico. En este contexto, y tomando de referencia la alternativa “A” (mejora de aislamiento) y “C” (mejora tecnológica con bomba de calor geotérmica), que materializadas simultáneamente conducen a la alternativa de inversión “D”, se supuso un escenario futuro incierto plausible para sortear la complejidad del análisis dinámico o secuencial. De este modo, con base a que cada aplicación de la teoría de decisión de inversión y sus resultados resultan ser circunstanciales (Verbruggen et al., 2011), se definieron las variables estocásticas “Fast”, “Linear” y “Slow”, cuyos supuestos para la evaluación de la alternativa de

inversión “D” para la ciudad de Santiago quedaron establecidos en el punto 7 dentro del apartado 6.4.2 más atrás. Consecuentemente, a partir de los resultados para esta modelación (desde la Fig. 6.42 a la Fig. 6.45), se observa lo siguiente:

- a. Conforme a la Fig. 6.42, se aprecia que decidir invertir hoy en la alternativa “D”, es decir, aislar la vivienda con la solución descrita en la Fig. 6.27 (Alternativa “A”) e implementar la propuesta tecnológica definida por la alternativa “C” (bomba de calor geotérmica), considerando Pesp., $h=30$ años y $r=3,5\%$, resulta conveniente en todos los escenarios, sin embargo, más conveniente (Mayor NPV) bajo el escenario futuro incierto plausible “Lento”, es decir, cuando los cambios sociales (toma de decisiones sociales) hacia la sustentabilidad sean lentos. En este caso, cuando el precio de la energía suba rápidamente (“Fast”) – asumiendo la sociedad propicia el uso de combustibles fósiles como energía primaria (recurso escaso con mayor demanda) – y el precio de la tecnología sustentable baje lentamente (“Slow”) – no se propician economías de escala, alto costo de oportunidad frente al menor costo relativo de otras tecnologías menos limpias, etc. – ; en caso contrario, cuando el escenario futuro incierto plausible sea “Rápido o Lineal” (mayor conciencia social hacia la sustentabilidad que el escenario “Lento”), convendrá postergar la inversión en la bomba de calor geotérmica en 5 años (alternativa “C”), pues supone el precio de la tecnología caerá lo suficiente y los aumentos de precio serán más lentos (mayor eficiencia, menor demanda de recursos fósiles, maduración producción de energía secundaria limpia, etc.). Ahora bien, postergar la decisión a 5 años más, no compensará la pérdida de beneficios entre los años futuros 5 al 10.
- b. Cuando se mantienen los escenarios en la Fig. 6.42, pero cambia el valor del dinero en el tiempo a una tasa de $7,5\%$ (ver Fig. 6.43), la inversión inmediata se hace inviable bajo cualquier escenario futuro incierto plausible, siendo necesario postergar la alternativa de inversión “C” (bomba de calor geotérmica) más allá del 5to. año futuro en los escenarios “Rápido y Lineal” y al año futuro décimo en el caso del escenario “Lento” (los ahorros dados los incrementos de energía no suplen la falta de la caída en la tecnología).

- c. Cuando se mantienen los escenarios en la Fig. 6.42, pero cuando el aumento del precio de la energía en el tiempo es mayor (ver Fig. 6.44), se aprecia que invertir en la bomba de calor geotérmica ahora o en el futuro (dado un horizonte de 30 años) siempre será conveniente ($NPV > 0$), ratificando la importancia del valor de la energía en los análisis económicos de esta naturaleza. Sin embargo, se aprecia que postergar la decisión de invertir en la alternativa “C” (bomba de calor geotérmica) será más rentable. Esto debido a que frente a la usencia de la bomba de calor (que utiliza electricidad) se utilizarán combustibles fósiles los primeros años (mix probable para Santiago, ver Tabla 69) – se espera que el precio de los combustibles fósiles suba en mayor proporción de cómo lo hará la electricidad conforme a la Fig. 6.28 a la Fig. 6.32. –. En el caso del escenario “Rápido”, la postergación no debiera ser más allá del quinto año futuro, pues después el NPV cae. El contexto previo se evidencia la necesidad de establecer beneficios económicos, a nivel familiar, sobre las disminuciones en las emisiones de CO_2eq al ambiente. Ahora bien, si además de aumentar el precio de la energía en el tiempo a los niveles máximos esperados, lo hiciera también el costo del dinero (ver Fig. 6.45); entonces, la inversión inmediata en la bomba de calor geotérmica sería inviable, postergando necesariamente esta alternativa de inversión más allá del quinto año futuro, donde el escenario de consciencia sustentable “Lento” se muestra más rentable, ratificando la necesidad de establecer beneficios económicos a las disminuciones de CO_2eq y no solo establecer como beneficio el ahorro en el pago de energía familiar.

6.4.6. Conclusiones en torno al caso de estudio

Existe una fuerte relación entre la disminución de la transmitancia térmica global y la reducción del consumo de energía en los casos estudiados, relación que es distinta a la existente entre el ahorro conseguido y el costo de la inversión, aspectos que dependen fuertemente de la severidad climática asociada a cada ciudad analizada. Esto se evidencia al analizar el NPV, sobre todo para el caso de Antofagasta, donde

en la mayoría de los análisis la inversión de eficiencia energética no se justificaba y; de ser viable, esto fue a muy largo plazo, costo de capital bajo y precios de energía altos. Esta situación se contrapone a las ciudades de Santiago y Concepción, donde varias alternativas de inversión se justificaban a partir de los análisis económicos convencionales. Ahora bien, y lo que era esperable, los resultados fueron más favorables en la medida que aumentaba el horizonte de análisis, aumentaba el precio de la energía y disminuía el costo de capital.

De acuerdo a los resultados del NPV, con base al modelo estático o convencional, escoger la alternativa de inversión “C” se mostró más conveniente para horizontes de 20 años en la mayoría de las situaciones para Concepción y Santiago. Sin embargo, cuando los precios de la energía se simulaban máximos ($P_{\text{máx.}}$), las soluciones más convenientes para la ciudad de Santiago resultaron ser las que mejoraban la envolvente de la vivienda (Alternativas “A” y “B”), no así en la ciudad de Concepción. Esto debido a que el mix de combustible para Concepción primaba el uso de la madera (ver Tabla 66) y no los de origen fósil como el kerosene o el gas licuado en Santiago. Esto evidencia la relevancia del sistema que se utiliza para calefaccionar la vivienda.

Cuando se contrastaron las alternativas de inversión que incorporaban la componente de mejoramiento de envolvente, según parámetros convencionales (Alternativa “A”) o Passive House (Alternativa “B”) en Fig. 6.33 a Fig. 6.35, en la mayoría de los casos donde se justificó la inversión de eficiencia energética se mostró más conveniente la alternativa “A”, solo resultó más conveniente “B” cuando se simuló la evaluación económica a precios máximos. En este contexto, desde que la relación entre el costo de inversión y el precio de la vivienda es mucho mayor para la alternativa “C” que “A”, esta última debiera ser preferida. Además, la alternativa “A” corresponde a una alternativa de inversión que utiliza recursos humanos y tecnológicos fáciles de disponer y de uso frecuente en el mejoramiento del desempeño energético (De Boeck et al., 2015), que además presenta un bajo impacto ambiental en la rehabilitación de viviendas (Nicolae & George-Vlad, 2015). A lo anterior se suma que las familias que habitan este tipo de viviendas les es más difícil cubrir inversiones de mayor valor. Esto debido al mayor riesgo financiero que se les atribuye, lo que deriva de posibles problemas económicos, sobre población en el

hogar, falta de trabajo, entre otros eventos probables (Feinstein & Lupton, 2007) que dificultan el financiamiento.

Frente al contexto previo, se abre la posibilidad de postergar la inversión de la alternativa “C” (bomba de calor geotérmica). Esto conforme al planteamiento dinámico o secuencial propuesto para la alternativa “D”, que combina las alternativas de inversión “A” y “C”, esperando en que en el futuro baje su costo de inversión en relación al valor de la vivienda. Esto fue modelado en las Fig. 6.42 a la Fig. 6.45 para la ciudad de Santiago. Ciudad con la mayor concentración habitacional en Chile (ver Fig. 3.14 más atrás), para la cual se justifican la mayoría de las inversiones de eficiencia energética modeladas y donde la proporción del consumo energético de origen fósil es mayor (ver Tabla 66). De este modo, se establecieron supuestos para una modelación secuencial a partir de un escenario futuro incierto plausible (Verbruggen et al., 2011), los que mostraron que frente a un escenario de aumento en los precios de la energía, para un horizonte de análisis de 30 años, postergar la inversión tecnológica asociada a la alternativa “C” es económicamente preferible. Esto es a 5 años cuando se trata de una tasa recomendada para evaluar este tipo de inversiones. Cabe señalar que el alcance de una consciencia social sustentable “Alto” propicia la postergación de la decisión de inversión de la alternativa de inversión “C”. Esto sustentado, básicamente, en la baja del costo de la tecnología supuesta a futuro y al menor aumento en el tiempo del precio de la electricidad.

Bajo los supuestos dinámicos, un costo de oportunidad para el dinero alto (tasa de descuento igual a 7,5%) y precios de energía máximos para los combustibles de origen fósil, en general, se hizo poco atractiva la inversión inmediata de la tecnología propuesta por la alternativa “C”, lo que refleja la necesidad de subsidiar este tipo de tecnología, o bien, compensar económicamente las disminuciones de CO₂eq. derivadas de las mejoras en viviendas. Sobre todo cuando el alcance de la conciencia social sustentable sea “Lineal” o “Lento”.

La modelación secuencial, que permitió contrastar la decisión entre invertir hoy (“escoger o perder”) o esperar invertir mañana (“esperar y aprender”) para la alternativa “C”, mostró que esperar invertir mañana en nuevas tecnologías, o bien, las existentes a menores costos, resulta ser más conveniente bajo los supuestos

estocásticos definidos para el caso de estudio. Ahora bien, realizar este análisis no es simple, pues involucra ignorancia e incertidumbre (¿Qué nuevas tecnologías existirán mañana? ¿Habrá una disminución en los costos de la tecnología existente? ¿En qué proporción?, etc.) Estos aspectos hacen difícil la evaluación dinámica, pues predecir a 5 años eventos futuros y sus frecuencias ya es algo complejo y, por tanto, para evaluaciones a mayor plazo como las modeladas en este caso de estudio es aún más impreciso. Basta con contrastar las proyecciones a los precios de la energía eléctrica hace 10 años en Chile y los precios existentes hoy (precios actuales en Tabla 6), los que son bastante disímiles a los esperados en ese entonces (UTFSM - U. de Chile, 2008). Esta complejidad explica la poca frecuencia de las modelaciones dinámicas (Hector Hernández, 2017) y la necesidad de establecer escenarios futuros inciertos plausibles para lograr resultados que, a pesar de todo, resultan ser circunstanciales (Verbruggen et al., 2011).

Desde que pocos analistas están familiarizados con la irrevocabilidad y su análisis (Verbruggen et al., 2011), destacar que decidir construir viviendas sociales en albañilería presenta una alta irrevocabilidad económica, pues lograr mejorar su desempeño energético posterior, a través de mejoras en aislamiento térmico, involucra costos e impactos ambientales que habrían sido menores de haber decidido invertir en una vivienda materializada con muros de madera aislados térmicamente desde un principio. Esto de acuerdo a lo establecido en el caso descrito en el apartado 6.3 más atrás. Corroborando que las características de irrevocabilidad de las inversiones en eficiencia energética estimulan edificios inmediatos más eficientes en lugar de edificios que obedecen a las normas (Verbruggen et al., 2011). Lo que no es el caso para la bomba de calor geotérmica, que corresponde a una tecnología que presenta menor irrevocabilidad para este caso, pues la decisión de inversión depende fuertemente de variables técnicas asociadas al sitio de emplazamiento y menos a la naturaleza de la envolvente de la vivienda.

6.5. Contraste de resultados para los casos de estudio

A partir de los resultados que se desprenden de los casos de estudio expuestos en los apartados previos, y considerando los aspectos que presentan en común, se han construido las tablas 70 a la 73 para contratar las siguientes variables de interés: vivienda modelada, demanda de energía estimada, zona térmica, confort y sustentabilidad. Cada tabla inicia con un resumen del caso, para luego abordar las variables que permitirán contextualizar y justificar la discusión final en el apartado siguiente.

Tabla 70. Contraste de variables de interés en vivienda modelada en el caso 1

Variables	Caso de estudio 1	
Resumen del caso	Se determina la demanda de energía para climatizar, bajo un enfoque dinámico (herramienta CCTL) y un enfoque estacionario, una vivienda social denominada Biocasa Modular Termo Estructural (BMTE) con registro técnico DITEC-0022-NTC-01-57. La vivienda es de 57m ² , dos plantas, estructurada en panel SIP y su U _g (promedio ponderado para la transmitancia de la envolvente de la vivienda) igual a 0,98 W/Km ² .	
Viviendas modeladas	Vivienda BMTE modelada en programa CCTL, el que además entrega resultados de demanda de energía para una vivienda con igual envolvente pero que responde a las restricciones de normativa térmica chilena.	Vivienda BMTE modelada a partir de enfoque estacionario conforme a ecuaciones de equilibrio térmico en la vivienda.
Demanda de energía determinada	La modelación dinámica entrega una demanda de calefacción de 93,5kWh/m ² año y refrigeración de 19,1kWh/m ² año. Donde la vivienda de referencia, demanda para calefacción 208,6kWh/m ² año y 101,8kWh/m ² año para refrigeración.	El modelo estacionario arroja para la vivienda una demanda de calefacción igual a 98,32kWh/m ² año y de refrigeración de 130,6kWh/m ² año.
Confort y sustentabilidad	Dada la demanda estimada, la vivienda social BMTE emite 63,72% menos respecto a la vivienda de referencia.	Con la modelación estacionaria, también se evidencia una disminución, pero menor, igual a 26,25%

Zona térmica de estudio	Ciudad de Rancagua, VI. Zona Z3
-------------------------	---------------------------------

Tabla 71. Contraste de variables de interés en viviendas modeladas en el caso 2

Variables	Caso de estudio 2		
Resumen del caso	Para una vivienda social característica (análoga a la del caso 3) se han supuesto transmitancias térmicas exigidas por la normativa chilena, transmitancias que responden a la propuesta de cambio normativo NTM 011/2 2014 y, transmitancias y supuestos que responden a viviendas altamente eficientes (estándar Passive House). Consecuentemente, tres modelos son obtenidos: CB, CMPN y CMPH.		
Viviendas modeladas	CB (Caso base, vivienda que responde a normativa), presenta un $U_g = 1,58 \text{ W/Km}^2$	CMPN (Caso mejorado propuesta normativa), $U_g = 0,45 \text{ W/Km}^2$	CMPH (Caso mejorado a partir de estándar Passive House), $U_g = 0,13 \text{ W/Km}^2$
Demanda de energía determinada	Para calefacción igual a $119,47 \text{ kWh/m}^2$ año; para refrigeración igual a $70,67 \text{ kWh/m}^2$ año.	Para calefacción igual a $56,02 \text{ kWh/m}^2$ año; para refrigeración igual a $60,03 \text{ kWh/m}^2$ año.	Para calefacción igual a $0,79 \text{ kWh/m}^2$ año; para refrigeración igual a $79,75 \text{ kWh/m}^2$ año.
Aspectos de confort y sustentabilidad	Existe riesgo de condensación en invierno y menor temperatura interior media (T_{im}) durante el año igual a $19,18^\circ\text{C}$. La vivienda no es confortable.	Disminuye riesgo de condensación respecto a CB, pero por sobre 70% de HR y 20°C hay riesgo de condensación en ventanas. Aumenta T_{im} promedio anual en $5,8\%$ respecto a CB. No es significativo.	Mucho menor riesgo de condensación respecto a CB y CMPN. Aumenta la T_{im} promedio anual en $36,3\%$ respecto a CB. CMPH más confortable y sustentable, al prescindir de energía para calefaccionar cae la emisión en igual proporción.
Zona térmica de estudio	Ciudad de Santiago, RM, Zona Z3.		

Tabla 72. Contraste de variables de interés en viviendas modeladas en el caso 3

Variables	Caso de estudio 3	
Resumen del caso	Se modela una vivienda social estructurada en muros de albañilería en las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción para obtener indicadores de impacto ambiental y confort térmico (Ficha del proyecto 3499-2-LR17, la que responde al cuadro normativo DS-49). También es modelada su homóloga con muros estructurados en madera aislados termicamente para evaluar la decisión inicial de inversión.	
Viviendas modeladas	VMA (Vivienda Muros de Albañilería) presenta un $U_g = 1,46 \text{ W/Km}^2$	VMM (Vivienda homóloga estructurada con muros madera aislados) presenta un $U_g = 0,68 \text{ W/Km}^2$
Demanda de energía determinada	Demanda de calefacción para Antofagasta de $48,43 \text{ kWh/m}^2$ año, para Santiago de $104,55 \text{ kWh/m}^2$ año y para Concepción de $110,94 \text{ kWh/m}^2$ año.	Demanda de calefacción para Antofagasta de $48,19 \text{ kWh/m}^2$ año, para Santiago de $96,67 \text{ kWh/m}^2$ año y para Concepción de $101,07 \text{ kWh/m}^2$ año.
Aspectos de confort y sustentabilidad	El TNC en Antofagasta, Santiago y Concepción es de 20,3% 40,1%, 36,1% respectivamente.	De VMA a VMM el TNC cae en 28%, 17%, 29% para las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción respectivamente. La EE y los GEI incorporados caen en 32% y 36% respectivamente. GEI totales caen en 10,1%, 11,5% y 13% para las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción respectivamente.
Zona térmica de estudio	Antofagasta (Z1), Santiago (Z3), Concepción (Z4)	

Tabla 73. Contraste de variables de interés en viviendas modeladas en el caso 4

Variables	Caso de estudio 4			
Resumen del caso	Para la vivienda VMA del caso 3, cuatro alternativas de inversión de eficiencia energética son analizadas para su reacondicionamiento térmico o disminución de consumo. Las alternativas A y B corresponden a mejoras de envolvente, la alternativa C corresponde a la implementación de una bomba de calor geotérmica y la cuarta alternativa (D) corresponde a la combinación de A+C. Para esto se supusieron escenarios para el precio de la energía y escenarios futuros inciertos plausibles (EFIP)			
Viviendas modeladas	Vivienda VMA reacondicionada a partir de alternativa de inversión "A", la que corresponde a una mejora en la aislación de ventanas, cielo y muros. El nuevo U_g es 0,43W/Km ² , cae 70,55% respecto a la vivienda VMA.	Vivienda VMA reacondicionada con alternativa de inversión "B", la que además de mejorar la aislación de ventanas, cielo y muros, mejora la estanqueidad de la vivienda. El nuevo U_g es 0,35W/Km ²	Vivienda VMA a la que se le incorpora un Sistema de Climatización con Bomba de Calor Geotérmica (SCBCG). Corresponde a la alternativa de inversión "C", la que presenta un rendimiento promedio de 369%. (378% para Santiago)	VMA reacondicionada a partir de las alternativas de inversión combinadas "A" y "C"
Demanda de energía determinada	Demanda de calefacción para Antofagasta de 10,32kWh/m ² año, para Santiago de 50,66Wh/m ² año y para Concepción de 49,61kWh/m ² año.	Demanda de calefacción para Antofagasta de 0,0 kWh/m ² año, para Santiago de 3,91Wh/m ² año y para Concepción de 1,66kWh/m ² año.	Mismas demandas para calefacción VMA del caso 3, sin embargo, cae el consumo a 12,81kWh/m ² año para Antofagasta, 27,66kWh/m ² año para Santiago y 31,52kWh/m ² año para Concepción.	Mismas demandas que alternativa "A", cae el consumo a 2,73kWh/m ² año para Antofagasta, 13,40kWh/m ² año para Santiago y 14,09kWh/m ² año para

				Concepción.
Aspectos de confort y sustentabilidad	Caen los GEI durante la fase de uso, lo que es proporcional a la demanda, por tanto, caen en 78,69% para Antofagasta, 51,54% para Santiago y 55,28% para Concepción.	Caen los GEI durante la fase de uso, lo que es proporcional a la demanda, por tanto, caen en 100% para Antofagasta, 96,26% para Santiago y 98,50% para Concepción.	Conforme al coeficiente de paso para el SIC igual a 0,4187 kgCO ₂ eq/kWh y a los consumos en Tabla 68, los GEI para la fase de uso caen en 77,75% para Antofagasta, 75,66% para Santiago y 80,37% para Concepción.	Conforme al coeficiente de paso para el SIC igual a 0,4187kgCO ₂ eq /kWh y a los consumos en Tabla 68, los GEI para la fase de uso caen en 95,26% para Antofagasta, 88,21% para Santiago y 91,22% para Concepción.
Zona térmica de estudio	Antofagasta (Z1), Santiago (Z3), Concepción (Z4)			

A partir de la información contenida a las tablas precedentes, desde la Tabla 70 a la Tabla 73, se puede contruistruir la Tabla 74 para las viviendas modeladas en la Zona 3. Conforme a esto se puede establecer la relación entre el aislamiento global de la vivienda (U_g) y la demanda de energía (Fig. 6.46). Es claro que existe una fuerte relación entre estas variables, lo que es corroborado por el coeficiente de determinación igual R^2 igual a 78% (Ver Fig. 6.46). La variación se puede explicar a partir de las variables que no son controladas, por las diferentes suposiciones adoptadas en la modelación dinámica o estacionaria, por las diferencias climáticas asociadas, o bien, por la base de datos climática considerada o por las las diferencias en emplazamiento, entre entre otras. Sin embargo, y a pesar de estas diferencias, se ratifica lo expuesto por la teoría en el sentido que el aislamiento térmico determina la demanda de energía. Por otro lado, debido a la influencia del rendimiento de los sistemas de instalaciones (ver modelos VMA + “C” y VMA + “D” en la Tabla 74), es claro que no se debe correlacionar U_g con el consumo.

Tabla 74. Demanda y consumo de energía para calefaccionar en las viviendas modeladas en los casos de estudio.

Modelo	U_g (W/Km ²)	Demanda (kWh/m ² año)	Rendimiento	Consumo (kWh/m ² año)
BMTE	0,98	93,5	92%	101,63
CB	1,58	119,47	92%	129,86
CMPN	0,45	56,02	92%	60,89
CMPH	0,13	0,79	92%	0,86
VMA	1,46	104,55	92%	113,64
VMM	0,68	96,67	92%	105,08
VMA+"A"	0,43	50,66	92%	55,07
VMA+"B"	0,35	3,91	92%	4,25
VMA+"C"	1,46	104,55	378%	27,66
VMA+"D"	0,43	50,66	378%	13,40

Fig. 6.46 Relación transmitancia térmica de envolvente v/s demanda para calefaccionar las viviendas modeladas dentro de los casos de estudio.

7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN FINAL

7.1. En torno a la revisión bibliográfica

La llegada de la revolución industrial (entre mediados del siglo XVIII y mediados del XIX) y la aparición del hormigón armado (fines siglo XIX), resultaron hitos transformadores de la anterior arquitectura vernácula. Los diseños dejaron de responder al entorno climático (micro y macro clima) para generar las condiciones de confort en las viviendas, privilegiando el uso del combustible de origen fósil e ideando viviendas poco sustentables, que más bien respondían a desafíos arquitectónicos asociados a la estética y admiración. Ejemplo de esto resultaron ser las viviendas “The Mobius House” y “The glass house” (ver Fig. 2.1). Sin embargo hoy, producto del calentamiento global y los impactos ambientales antropogénicos, la edificación ha retomado la noción de arquitectura bioclimática y sustentable, que incorporando aspectos económicos a los procesos productivos, han definido nuevos lineamientos para la construcción de edificios con base a los principios de la economía circular. Esto es, diseñar pensando en la reducción de desechos y contaminación del edificio, mantener los materiales o productos de construcción en uso para retener la energía incorporada de los edificios y favorecer el uso de recursos renovables, por ejemplo, el uso de energía solar, eólica o recursos naturales como la madera en la generación de edificios bajo un enfoque regenerativo que ofrece oportunidades para el secuestro de carbono. Lo que ha sido evidenciado por Pomponi y Moncaster (2017) en el establecimiento de la evolución y dimensiones para el estudio de las edificaciones, que recorre desde los edificios verdes (green buildings), luego edificios sustentables (Sustainable Buildings) hasta los edificios circulares (Circular Buildings) (Fig. 2.2).

En congruencia con lo anterior, el proyecto habitacional ha perdido su visión lineal – desde la cuna o nacimiento hasta el botadero como desperdicio al término de su vida útil – y se ha establecido una nueva visión circular y de procesos donde las edificaciones no terminan en botaderos, sino más bien, en el nacimiento de un nuevo

producto. Es decir, desde la cuna a la cuna (del inglés Cradle to Cradle). Esto recoge el principio “desperdicio es igual a alimento” (waste=food) del metabolismo biológico, de manera que un desperdicio generado durante el ciclo de vida de una vivienda, al igual que un nutriente en la naturaleza, se convierte en un “alimento” para un nuevo proceso productivo después de su “muerte” a partir del reciclaje, reutilización o recuperación, ya sea para la materialización de un nuevo edificio, o bien, como recurso para otro proceso productivo (conservación de la energía y carbón incorporados). Lo que claramente conlleva una nueva actitud y conducta hacia el desarrollo de los proyectos y una acción gubernamental para favorecer los flujos económicos asociados a estos procesos que propicien el metabolismo técnico que los permitan. En esto es muy importante la visión de proceso para las fases del ciclo de vida de las viviendas – o de la edificación en sí misma –, de manera que se consideren la reducción, la reutilización y el reciclaje en los recursos de entrada (energía, agua, materiales, etc.) para que, a partir de un “método” de transformación inteligente (industrialización, prefabricación, optimización, etc.), se materialicen los productos de construcción con la menor carga ambiental incorporada y con el menor impacto medioambiental (minimizar los desechos y emisiones contaminantes). Esta concepción de proceso, que ha derivado de la industria ecológica, da sustento teórico a los ACV en viviendas definidos por la norma ISO 14040.

En torno al uso de la energía, se evidencia que los combustibles fósiles siguen siendo los más demandados (ver Fig. 2.11), sin embargo, su tasa de crecimiento es mucho menor que para los combustibles de origen renovable, sobre todo para la producción de energía eléctrica. Previéndose, bajo escenarios sustentables, que gran parte de la matriz energética para la producción de electricidad al 2040 será de origen renovable (ver Fig. 2.14 y Fig. 2.15). Aspecto en el que hoy Chile destaca, pues en enero de 2019 el 48,3% de la producción de electricidad provino de fuentes renovables (ver Fig. 2.18). Dado esto, sumado a los problemas de calentamiento global derivados de la emisión de gases contaminantes al ambiente y el impacto de la edificación a nivel global (ver Fig. 2.27), se prevé un futuro para edificios eléctricos. Esto se evidencia en la mayor proporción de energía eléctrica que demandarán los edificios en el futuro (Fig. 2.29 y Fig. 2.30). Por tanto, frente a edificios sustentables y eficientes energéticamente, es de esperar que en el futuro la huella de carbono de las edificaciones ya no esté centrada en la etapa de operación, sino más bien, en la etapa

de materiales o producto, donde además la proporción de energía usada para calefaccionar disminuya y comiencen a tomar relevancia otros consumos, como por ejemplo, el uso de energía para ACS.

En torno a los precios de la energía, se aprecia que los combustibles fósiles presentan mayor variabilidad entre los pronósticos para mayores y menores precios. Además, son los que presentan un mayor crecimiento esperado promedio, lo que se puede explicar debido a que trata recursos limitados, a diferencia de la energía eléctrica cuyo crecimiento promedio se espera menor, e incluso, bajo escenarios sustentables una caída en el precio futuro. Lo que se puede explicar debido a que su producción incorporará recursos renovables o inagotables (solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, otras), a la disminución del costo de la tecnología para la producción de energía eléctrica renovable, a la reducción del costo marginal de producción en el tiempo o a la mayor eficiencia en los diferentes sectores económicos, sobre todo en el sector residencial.

Con respecto al confort térmico, se establece que este depende de muchas variables, más allá de las que tradicionalmente se les asocia (humedad relativa y temperatura, por ejemplo). Unas variables más bien objetivas, que guardan relación con el balance térmico entre el ser humano y su entorno y; otras variables, más bien cualitativas, que guardan relación con la adaptabilidad de las personas al entorno, por ejemplo, una variable binaria para determinar si una persona se encuentra o no a gusto en un espacio habitacional (porcentaje de personas insatisfechas). Las variables que surgen a partir del balance de calor, pero que se expanden incorporado la evaluación de la sensación térmica, se muestran en la determinación del voto medio previsto (PMV) en la Ecuación 8 (actividad metabólica, vestimenta, temperatura ambiente, temperatura radiante, velocidad del viento y humedad relativa). Consecuentemente, se identifican dos líneas de investigación del confort térmico, una basada en aspectos estáticos de equilibrio térmico propuesto por Fanger (ver Ecuación 4) y que da origen al Estándar 55 de ASHRAE (“el edificio responde a una persona tipo”) y una basada en aspectos dinámicos o adaptativos propuesta por Humphreys. Esta última propone la adaptación del ser humano (por ejemplo, se abriga en invierno) y de su entorno (por ejemplo, abre ventanas en verano) en búsqueda de confort térmico, aspecto que luego es recogido por la ASHRAE en el

modelo adaptativo de edificios naturalmente acondicionados (Fig. 2.51). Esto evidencia que en la determinación del confort, al igual que en la determinación de la demanda de energía y en la evaluación económicas de inversiones de eficiencia energética, se abordan aspectos estacionarios y dinámicos en la definición de modelos para los análisis. Siendo estos últimos modelos mucho más complejos debido a la diversidad de variables involucradas. Sin embargo, basado en el modelo de equilibrio térmico y una persona promedio, los resultados derivados de la Ecuación 4 mostraron que considerar una temperatura de confort de 20°C es, en promedio, lo suficientemente preciso.

Existen dos métodos para determinar los requerimientos de energía para climatizar los espacios habitacionales, los estacionarios y los dinámicos (existiendo también modelos intermedios semi-estacionarios). El primero de ellos basado en la simplificación de las variables físicas y ambientales caracterizadas por valores promedios mensuales (temperatura promedio, radiación solar promedio, etc.) que, basados en el principio de superposición de fenómenos físicos, permiten determinar la energía demandada para calefaccionar o enfriar un espacio habitacional conforme al balance de calor definido por la Ecuación 12 y, gráficamente, por las Fig. 2.68 y Fig. 2.69. Por otro lado, los modelos dinámicos, que incorporan mayor variabilidad de los parámetros físicos y ambientales en el tiempo, necesariamente deben abordarse a partir del uso de herramientas computacionales debido al gran número de variables que inciden en el modelo y su complejidad de cálculo. Donde los programas computacionales EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS resultan internacionalmente aceptados y útiles para responder a este desafío; sin embargo, no son simples de utilizar y han requerido de interfaces para hacer más amigable la modelación y la interpretación de los resultados. Algunas interfaces resultan tan avanzadas que son reconocidas como un nuevo programa, por ejemplo, DesignBuilder que usa el motor de cálculo EnergyPlus. Más allá que el modelo estacionario sea más simple y manejable que el modelo dinámico, hay que rescatar que este último es más preciso, sobre todo cuando las diferencias de temperatura durante el día son pronunciadas y cuando prima la inercia por absorción en los elementos que restringen el flujo de calor (envolvente con masa importante). En este contexto, un modelo estacionario será útil cuando las temperaturas durante el día sean más menos estables (invierno) o se requiera determinar datos de demanda de manera simple y rápida aceptando las diferencias

que podrían generarse en viviendas con alta masa. Cabe destacar que no es simple contrastar los resultados entre dos viviendas modeladas a partir de métodos distintos, pues las variables de entrada que se definen, tanto para el modelo estacionario y como dinámico, abren un espectro importante de variabilidad. Por lo que siempre será importante transparentar los parámetros de entrada para la modelación, tales como, temperatura de confort, el número de habitantes, datos climáticos, transmitancias térmicas de los elementos constructivos, la superficie de la vivienda, tasas de renovación de aire, entre otros.

Una vivienda eficiente energéticamente es aquella que consume nula o muy poca energía en relación a una vivienda de referencia; o bien, conforme a la severidad climática a la que se expone, pues resulta obvio que en zonas con climas extremos (mucho calor o mucho frío) prescindir del uso de energía para calefaccionar o refrigerar los espacios será más complejo. Así se establecen los siguientes tipos de edificios: convencionales (CEB Conventional Energy Building), de bajo consumo energético (LEB - Low Energy Building), de muy bajo consumo energético (ULEB – Ultra Low Energy Building o Passive House), los cercano a cero consumo (nZEB nearly Zero Energy Building) y los que aportan energía (PEB – Plus Energy Building), cuyos niveles de consumo de energía primaria se evidencia en la Tabla 17. Conforme a esto, y a los datos presentados para viviendas chilenas, la mayoría de las viviendas en Chile corresponden a edificaciones convencionales (CEB), pues el consumo de energía primaria sobrepasa los 120kWh/m² al año. Basta con mencionar que solo para calefaccionar una vivienda promedio en Santiago de Chile se demandan cerca de 100kWh/m² al año en promedio, que suponiendo un rendimiento general para los sistemas de instalación igual a 95%, donde la calefacción representa el 56% del consumo, y un PEF igual a 2 (50% electricidad y 50% gas aproximadamente), esta vivienda consumiría 375,9kWh/m² al año de energía primaria. Consecuentemente, las viviendas chilenas en general están lejos de ser eficientes energéticamente, pues este ejercicio puede ser replicado en las zonas con mayor población de Chile (Ver Fig. 3.14 y Tabla 29) y la interpretación de los resultados obtenidos será análoga.

Chile presenta una diversidad climática importante de norte a sur y de oeste a este debido a su forma alargada y a la presencia en su ancho, desde el oeste al este, de costa, cordilla de la costa, depresión intermedia y cordillera de los Andes. Lo que

justifica las 7 zonas térmicas vigentes en la OGUC (ver Tabla 23) o las 9 zonas propuestas para su cambio en la NTM 011/2 2014 (Tabla 25). En torno a estas normativas, cabe destacar que la norma vigente no ha presentado cambios desde el año 2007 y se ha evidenciado, también en esta tesis, que no responde a parámetros de confort y eficiencia energética, por lo que urge su actualización. Por otro lado, su propuesta de cambio NTM 011/2 2014, disponible desde el año 2014, aún no ha sido considerada. Lo que se cree es derivado de la presión de la industria del ladrillo y del cemento, iniciada ya en la primera etapa de la reglamentación térmica, pues los muros de mampostería de ladrillos o bloques de concreto necesitarían de aislamiento, encareciendo la solución constructiva frente a muros estructurados en madera aislados térmicamente. Además, como se ha concluido en los casos de estudio abordados en el título apartado 6, la albañilería presenta un mal desempeño energético (consumo importante durante la operación), presenta alta irrevocabilidad económica en el mejoramiento de su desempeño energético y necesita de refuerzos de hormigón armado debido a que Chile es un país altamente sísmico, por tanto, asocia alta energía y carbón incorporados. Esto haría que la demanda de ladrillos y bloques de concreto disminuyera frente a requerimientos normativos más exigentes en contraste a una tabiquería aislada térmicamente con menor impacto ambiental, más eficiente energéticamente y más competitiva en relación al precio de una albañilería u hormigón armado aislados térmicamente. Por otro lado, destacar que la normativa térmica vigente se sustenta en los grados días para calefaccionar al año (GDc) y no considera los aspectos climáticos e higrotérmicos que sí considera su propuesta de cambio. Por tanto, implementar la propuesta de cambio, aunque tampoco responde a parámetros para edificios altamente eficientes, es altamente necesario para mejorar el confort térmico, minimizar el riesgo de condensación y reducir el actual consumo de energía para calefaccionar.

En torno a las características de las viviendas chilenas, se evidencia que su número asciende a 6.499.355 unidades según el Censo de 2017, de las cuales el 79,51% corresponden a “casa” (vivienda permanente con entrada directa desde la calle, jardín o terreno), 17,5% a “departamento” (vivienda ubicada en un edificio, que cuenta con una entrada independiente desde un pasillo, escala u otro espacio común) y 2,98% a otros tipos (viviendas que no se pueden clasificar como casa o departamento, por ejemplo viviendas indígenas, chozas, mediaguas, entre otras).

Siendo la región metropolitana la que concentra la mayor cantidad de viviendas en Chile (36,6%) seguida por Valparaíso (12,14%) y luego la región del BioBío (8,83%) (Ver Fig. 3.14). Donde la vivienda de albañilería es la solución constructiva más frecuente (45%), seguida por las tabiquerías (estructuradas generalmente en madera, 30%) y luego el hormigón armado (22%) (Fig. 3.16). Esta realidad no se escapa de la vivienda social, la que además hoy se sigue materializando, aunque ineficiente y poco sustentable, en albañilería de ladrillo o bloques de hormigón armado debido a la permisividad de la actual normativa.

En Chile el consumo de energía para calefaccionar es heterogéneo (ver Fig. 2.34), el que aumenta desde el norte al sur del país dada su diversidad climática. Siendo este el principal consumo de energía en la vivienda (56%), seguido por el consumo de artefactos eléctricos y consumo de ACS, 19% y 18% respectivamente, donde el uso de energía para refrigerar representa menos del 1%. Esto explica la modelación de los casos en el título 6, donde no fue considerado el consumo de energía para refrigeración. El principal combustible para calefaccionar en Chile es la leña (47%), seguido por gas (31%, licuado y natural) y la electricidad (18%). Sin embargo, el consumo de leña presenta una variabilidad importante a lo largo del país. Esto conforme a su disponibilidad y las restricciones medioambientales locales para su uso, mostrando preferencia el uso de gas por el norte y el uso de leña por el sur, siendo el sur la zona con mayor consumo de energía para calefacción, lo que explica la incidencia del uso de la leña a nivel nacional. El mayor uso de la leña no solo se justifica por su mayor disponibilidad en las zonas de mayor consumo de energía para calefaccionar, sino también a su menor precio por kWh en contraste con los demás combustibles habituales, que conforme a los datos presentados en la presente investigación (Tabla 6), son de un 71,1% y 51,9% menor que la electricidad a precios nominales y efectivos respectivamente. En términos efectivos, considerando el menor rendimiento del sistema que utiliza madera, solo el kerosene se muestra competitivo. Por otro lado, el uso de leña deriva en problemas asociados a la salud de las personas producto del material particulado que es emitido durante la calefacción, la leña es el único combustible emisor de material particulado, lo que le diferencia de la electricidad, el gas licuado del petróleo o el kerosene también usados para calefaccionar los hogares chilenos. Esto es otra justificación para hacer a las viviendas más confortables y eficientes; sobre todo la vivienda social, pues el

consumo de la leña está asociado a las familias con menores ingresos y más vulnerables (Cortés & Ridley, 2013).

Los edificios constituyen el mayor destino de los gastos de eficiencia energética en el mundo (Ver Fig. 4.1), representando el 59% del total, de los cuales el 28% está destinado a mejorar las envolventes de las edificaciones (mejoramientos en muros, techumbres y ventanas), seguidos por la iluminación (14%), los sistemas de HVAC (12%) y la actualización de electrodomésticos (6%) (Ver Fig. 4.1). Estos esfuerzos en mejorar el desempeño de las edificaciones, evidencia su potencial en la reducción del consumo de energía y emisiones contaminantes a nivel global.

Se logró precisar un marco referencial respecto a la evaluación económica de inversiones en eficiencia energética en edificaciones, definiéndose dos enfoques presentes en los análisis económicos de esta naturaleza: el estático (decidir invertir ahora o nunca) y el dinámico (decidir invertir ahora o después), siendo este último menos frecuente debido a los escenarios que se deben modelar basados en incertidumbre, lo que es difícil de lograr para periodos sobre 10 años habituales en las evaluaciones económicas de eficiencia energética. Independiente del enfoque, tres son los elementos que se deben considerar al momento de evaluar una inversión de eficiencia energética en viviendas: a) el tiempo futuro, b) la irrevocabilidad y, c) el desconocimiento.

En las investigaciones analizadas en el apartado 4.2.3 se vio reflejada esta trilogía propuesta por Verbruggen (ver Fig. 4.2). De este modo, el tiempo futuro queda definido por los horizontes de análisis para las inversiones. Lo que está vinculado, por ejemplo, a la vida útil de las diferentes alternativas de inversión. El desconocimiento está asociado a los diferentes escenarios posibles para la evaluación y su variabilidad (generalmente asociada a los precios de la energía) y; por último, la irrevocabilidad está relacionada con el grado de asignación irrevocable de recursos, en otras palabras, al nivel de costo asociado a deshacer una asignación pasada de recursos. De este modo, una irrevocabilidad fuerte implica que la definición de un atributo para una vivienda en el pasado (asignación pasada de recursos) implica la imposibilidad de deshacer dicho atributo en el futuro. Esto debido a los altos costos de reversión involucrados en la decisión, por ejemplo, la instalación

de un sistema solar térmico en techumbres con mala orientación al sol o poca superficie hacen prohibitiva la implementación de dicha tecnología debido al alto costo de adaptación de la techumbre a dicho propósito (decisión pasada difícil de revertir, pero posible a un alto costo). Lo anterior se evidenció en el caso del 6.4 al querer reacondicionar la vivienda de albañilería a niveles de viviendas eficientes energéticamente, es decir, deshacer o cambiar los atributos previamente definidos resultó costoso en relación a si dicha asignación de recursos hubiera sido desde un principio para estructurar muros de madera aislados térmicamente.

Por otro lado, y sin importar el tipo de enfoque (dinámico o estático), los indicadores NPV y LCC corresponden a los utilizados frecuentemente en las evaluaciones económicas de inversiones de eficiencia energética (Ecuación 22 y Ecuación 23, respectivamente). En los cuales la tasa de descuento cobra mucha relevancia, pues hace inviable las inversiones que reflejan sus beneficios a largo plazo (más lejos el beneficio, menor su valor hoy para una tasa de descuento alta). Desde que esto es característico de las inversiones de eficiencia energética en edificaciones (el edificio presenta una vida útil sobre 50 años), los investigadores sugieren incorporar tasas de descuento real “normal baja” decrecientes en cualquier metodología costo-beneficio para evaluar proyectos con impacto ambiental a largo plazo, por ejemplo, Weitzman (1999) propone tasas entre 3% y 5% para los 25 primeros años, 2% entre 25 y 75 años e interés instantáneo de 1% para periodos entre 75 y 300 años.

Con respecto a los ACV en edificaciones se logró establecer su estructuración frecuente en base a la norma ISO14040, la que define: a) objetivos y alcances, b) Análisis de inventario, c) Análisis de impacto y c) interpretación de los resultados (ver Fig. 5.2). Para los que son frecuentes el alcance de la cuna a la tumba (completa o simplificada), los horizontes de análisis de 50 años, la unidad funcional metro cuadrado de planta, las categorías de impacto ambiental GWP y CED para enfoque midpoint y, frente a la falta de información ambiental local, el uso de base de datos de inventario ambiental estandarizadas (Ecoinvent, ELCD, otras). Por otro lado, en los ACV en edificaciones se evidencia que las fases más incidentes son las fases de uso (60% a 95%) y de materiales (5% a 50%), seguidas por las fases de desuso y construcción. La variabilidad de la incidencia depende, básicamente, de los procesos

de construcción y demolición, de los sistemas de instalaciones y subsistemas del edificio, de los materiales o productos de construcción y de sus procesos de fabricación. Esto se evidencia en el caso de estudio abordado en el apartado 6.3, donde la albañilería presentó mayor carbono incorporado en comparación a otros países debido a los refuerzos en hormigón armado que son necesarios en un país altamente sísmico como lo es Chile y, además, se evidenció una alta incidencia de la fase de uso en las categorías impacto analizadas debido a la ineficiencia energética que presentó la vivienda.

Se establece que los ACV en viviendas son recientes en países en vías de desarrollo como lo es Chile, como así mismo, una carencia de base de datos ambientales que permita desarrollar ACV más precisos. Lo que obligó a precisar bases de datos de inventario ambiental internacionales para el ACV descrito en el apartado 6.3. Frente a esta falta de información ambiental, destacan algunas empresas productoras de materiales de construcción en Chile (Volcán, Gerdau AZA, otras ver Tabla 48) que han colaborado en la elaboración de una base de datos de inventario ambiental incipiente y, que han desarrollado sus primeras EPD para algunos de sus productos de construcción. Esto, contrariamente a la disposición que han presentado otras empresas proveedoras de materiales como son algunas empresas de cerámicos (ladrillos) y cementeras. Evidenciando, al igual que para el cambio de la reglamentación térmica vigente, cierta rigidez hacia cambios que hagan a la industria de la construcción chilena más eficiente y sustentable.

Por último, concluir que contrastar los resultados entre investigaciones sobre consumos de energía en viviendas, o bien, los que derivan de los ACV o de las evaluaciones económicas de inversiones de eficiencia energética que los consideran, no es algo simple de realizar; no solo por el número importante de variables asociadas a los análisis, sino también a las diferencias en climas y diseños donde no siempre están claro los parámetros que se han definido para las modelaciones energéticas (número de personas, horas de ocupación de la vivienda, parámetros de confort, horarios de uso de las viviendas, tasas de renovación de aire, etc.), o bien, no hay claridad sobre si lo que se evalúa es una demanda o consumo de energía primaria o secundaria.

7.2. En torno a los objetivos

a. En torno al objetivo OE1

Varias son las variables técnicas asociadas al acondicionamiento térmico, estas fueron abordadas en el título 2 “ VIVIENDA, CONFORT Y ENERGÍA” del presente documento, las que pueden asociarse a tres elementos que se conjugan para responder al acondicionamiento térmico en la vivienda: a) variables asociadas a la naturaleza o características de la edificación, tales como: tipología (aislada, pareada, continua o colectiva), emplazamiento y orientación de los elementos con respecto al norte, elementos de sombreado, transmitancias térmicas, compacidad, hermeticidad, sub-sistemas en la vivienda (sistemas de instalaciones y sus rendimientos, sistemas activos o pasivos de arquitectura bioclimática, otros), tipos y áreas de elementos vidriados (factor solar, color, etc.), tipos y áreas de elementos opacos (densidad, color, absorptividad, emisividad, etc.), entre otras; b) variables asociadas a los habitantes, tales como: intensidad y horarios de uso de la vivienda, número de personas y características físicas, actividades desarrolladas en el hogar, renovación de aire requerido, entre otras, y c) variables asociadas al entorno climático, tales como: radiación solar, vientos, temperaturas, diferencias de presión, altura relativa al nivel del mar, elementos generadores de sombreado, elementos amortiguadores de calor o frío, entre otras. La conjugación de estas variables en los casos de estudio analizados en el título 6 permitió responder a la relación existente entre el confort térmico, los requerimientos de energía y el medio ambiente. Esto se evidencia en el simple hecho que una misma vivienda, emplazada en diferentes zonas climáticas, proveerá condiciones energéticas interiores disímiles (por ejemplo, nivel energético para cierta temperatura operativa) que podrán o no responder a los requerimientos de confort térmico de sus habitantes (también distintos).

b. En torno al objetivo OE2

Los métodos cuantitativos en la determinación de la demanda y el consumo energético asociados al acondicionamiento térmico de una vivienda fueron abordados en el título 2.5 “Confort térmico y demanda de energía”, en el que se recogieron los modelos dinámico y estacionario. Con el objetivo de contrastar los modelos, se abordó el caso 6.1 “Caso 1: Contraste de la demanda de energía para calefaccionar una vivienda con baja inercia por absorción a partir de un análisis estacionario y dinámico”, evidenciándose que las diferencias en los resultados se acentúan en verano, cuando las variaciones de temperaturas durante el día son más importantes que durante el invierno, corroborando lo planteado por Lavigne (2011). Cabe destacar que es difícil una contrastación precisa y pura entre los modelos, pues los programas de simulación definen parámetros de entrada por defecto, o bien, requieren de habilidades de programación para su edición y; por otro lado, los modelos estacionarios definen un número no menor de simplificaciones, las que no permiten incorporar variables o parámetros que sí consideran los modelos dinámicos. En el contraste de los resultados de los casos de estudio descritos en el apartado 6, se ratifica que la demanda de energía para climatización, donde predomine la inercia térmica por absorción, condiciones de verano, o bien, climas que presenten una variación de temperaturas importantes durante el día, la recomendación es utilizar modelos dinámicos para determinar la energía demanda por la vivienda. Ahora bien, los resultados para la vivienda social modelada en los casos de estudio mostraron, independiente de la metodología utilizada, que la estimación de la demanda para calefacción corresponde a viviendas convencionales (CEB). En este contexto, la vivienda social chilena modelada y que cumple con la normativa térmica vigente, no presentó un buen desempeño energético, pues la demanda para generar las condiciones de confort térmico resultó igual a 112,6kWh/m² al año (modelo dinámico), por tanto, lejos de los parámetros de consumo para viviendas LEB (≤ 30 kWh/m² al año en consumo de energía primaria).

c. En torno al objetivo OE3

Se estudiaron los requerimientos energéticos para calefaccionar viviendas chilenas en el apartado 3.5 más atrás, además se estudiaron estos requerimientos específicamente a partir de la modelación de 4 viviendas sociales aisladas con envolventes estructuras en albañilería o madera. En esto, se apreció que los modelos “BMTE” en el caso del apartado 6.1, “CB” en el caso 6.2, “VMA” y “VMM” en el caso 6.3, mostraron para la zona térmica Z3 las siguientes demandas para calefaccionar durante el año: 95,9kWh/m² (promedio entre modelo dinámico 93,5kWh/m² y 98,3kWh/m² estacionario), 119,47kWh/m² (análisis estacionario), 104,44kWh/m² (dinámico) y 96,67kWh/m² respectivamente. Evidenciándose que para la zona térmica más poblada de Chile, los modelos estudiados (que cumplen con la reglamentación térmica vigente) no responden a requerimientos de viviendas eficientes energéticamente; sino más bien, se trata de viviendas convencionales, pues el consumo de energía resulta ser – considerando un rendimiento de los sistemas igual a 92% (según Tabla 66), que la calefacción corresponde a 56% de la demanda de energía en la vivienda y un coeficiente de paso PEF igual a 2 (50% electricidad y 50% gas aproximadamente – mayor a los 120kWh/m² de energía primaria total al año definido para viviendas convencionales.

Con respecto al caso 6.2, donde se contrasta la vivienda “CB” (que cumple con la reglamentación vigente) con la vivienda mejorada “CMPN” (que cumple con la propuesta de cambio a la norma) se evidencia que, aunque existe una mejora no menor en los requerimientos de transmitancia térmica para los elementos de la envolvente de viviendas construidas en la zona Z3 (por ejemplo, $U_{\text{muro}}=1,9\text{W/m}^2\text{°C}$ en “CB” baja a $0,6\text{W/m}^2\text{°C}$ en “CMPN”), estos cambios no logran que la vivienda presente una demanda de energía a niveles de viviendas con alto desempeño energético, pero sí se logró mejorar el acondicionamiento térmico y disminuir el riesgo de condensación, especialmente en ventanas. Por otro lado, la propuesta de cambio normativo propicia que las áreas de la envolvente en la vivienda presenten resistencias térmicas con mayor disparidad, aumentando el riesgo de condensación en las superficies con menor resistencia, especialmente en donde se conformen los puentes térmicos, por ejemplo, en los encuentros de esquina de dichas superficies.

Reflejando que la propuesta de cambio normativo debiera abordar elementos que propicien la uniformidad en el aislamiento térmico.

d. En torno al objetivo OE4

Las metodologías para evaluar económicamente las inversiones de eficiencia energética en edificaciones fueron abordadas en el título 4 “EVALUACIÓN DE INVERSIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VIVIENDAS”. Dos enfoques para la evaluación fueron identificados, el dinámico y el estacionario. El método dinámico resultó más complejo que el estacionario, pues depende de la generación de escenarios futuros que, por definición, presentan una fuerte componente de incertidumbre, haciéndoles menos frecuentes a pesar de que se pueda establecer el grado de precisión. Bajo este contexto, fue aplicado el modelo estacionario y el modelo dinámico en la determinación del NPV de diferentes alternativas de inversión en el Caso 4: Evaluación económica de inversiones de eficiencia energética para disminuir el consumo de energía para calefaccionar una vivienda social materializada en albañilería del apartado 6.4. Para el que se definieron diferentes escenarios para el precio de la energía, horizonte de análisis y tasa de descuento en el análisis estacionario y, un escenario futuro incierto plausible propuesto para la modelación secuencial o dinámica.

Los resultados reflejaron la fuerte relación existente entre la disminución de la transmitancia térmica global y la reducción de la demanda de energía en la vivienda (alternativas de inversión “A” y “B”), relación que fue distinta a la existente entre el ahorro conseguido con la mejora y el costo de la inversión respectiva, la que dependía de la severidad climática para la ciudad del análisis respectivo. En este caso, la inversión era inviable en la mayoría de los escenarios donde el clima era más benigno, especialmente, en la ciudad de Antofagasta que presenta un clima NL según Tabla 21. En congruencia con la teoría, la frecuencia de viabilidad ($NPV > 0$) aumentó a mayor horizonte de análisis, mayores precios de la energía (mayores ahorros conseguidos) y a menor costo de capital. Con base a los resultados, la alternativa “A”, que no era la que generaba el mayor ahorro, presentó mayor conveniencia. Lo anterior en base a la menor inversión requerida para lograr un $NPV > 0$, o bien, en base

a la relación entre el NPV y el valor actualizado de las inversiones o costos en el tiempo. Por otro lado, para precios esperados, costo de capital bajo (3,5%) y horizonte de análisis igual 20 años, se mostró inviable el reacondicionamiento a niveles de viviendas ULEB en las zonas estudiadas. Lo anterior debido a alta inversión asociada al reacondicionamiento, evidenciando la alta irrevocabilidad que presenta la vivienda de albañilería en términos de “deshacer” su atributo de resistencia térmica y conseguir otro que pudo haber sido conseguido a partir de la asignación inicial de recursos para materializar muros estructurados en madera aislados térmicamente que presentan menor transmitancia térmica. Corroborando que las características de irrevocabilidad de las inversiones en eficiencia energética estimulan edificios inmediatos más eficientes en lugar de edificios que obedecen a las normas (Verbruggen et al., 2011).

En las modelaciones se identificaron las variables incidentes al momento de evaluar la conveniencia económica de las diferentes alternativas de inversión en la vivienda de albañilería, mostrándose resultados sensitivos a la variación en el ahorro energético, en el costo de capital, en el precio de la energía, en el tipo de energía secundaria utilizada, en los rendimientos de los sistemas en la vivienda y en los coeficientes de paso de energía secundaria a primaria (PEF). En torno a estos últimos aspectos, la vivienda que presenta baja demanda de energía, pero alto consumo de energía primaria debido a un sistema de calefacción con bajo rendimiento o que utiliza energía secundaria con alto PEF, la evaluación económica se mostrará más favorable para cambios en los sistemas de calefacción por sobre la mejora en aislamiento.

La modelación secuencial o dinámica mostró que esperar invertir mañana en nuevas tecnologías, o bien, las existentes a menores costos, resulta ser más conveniente bajo los supuestos estocásticos definidos para el caso de estudio. Ahora bien, realizar este análisis no fue simple, pues involucró ignorancia e incertidumbre en el establecimiento de los escenarios futuros plausibles definidos por Verbruggen (2011). Esto justifica la poca frecuencia de estas modelaciones debido a la necesidad de establecer escenarios inciertos para lograr resultados que, a pesar de todo, resultarán ser circunstanciales.

e. En torno al objetivo OE5

El estudio de la metodología de ACV se realizó en el Título 5 EVALUACIÓN SUSTENTABLE DE VIVIENDAS. Esto permitió contratar el desempeño energético y ambiental de una vivienda social chilena estructurada con muros disímiles para el Caso 3: Análisis de ciclo de vida en viviendas, caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social. En este caso se analizaron los impactos ambientales para las categorías GWP y CED, las que resultaron menores para la vivienda estructurada con muros de madera aislados térmicamente, vivienda que también presentó una menor proporción de tiempo no confortable durante el año. Los resultados mostraron que la carga ambiental en la fase de materiales cae significativamente para la vivienda estructurada con muros de madera; pudiéndose decir, con relativa precisión, que los indicadores ambientales analizados en esta etapa caen en aproximadamente un tercio – 32% y 35,6% para EE y GHG respectivamente – cuando se opta por la solución con muros estructurados en madera en lugar de la albañilería. Los resultados se mostraron congruentes con la teoría, pues en la medición de los impactos la fase de operación mostró mayor incidencia en relación a las otras fases analizadas y, la vivienda estructurada con muros de madera presentó menor carga ambiental por unidad funcional en contraste con la albañilería. Resulta interesante destacar que el muro de albañilería presentó una carga ambiental mucho mayor a la de los otros subsistemas en la vivienda, tales como techumbre, fundaciones, muros interiores de tabiquería, piso, canalizaciones, puertas y ventanas. Además, la carga ambiental del muro de albañilería (Carbón y energía incorporados iguales a $93,8\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ y $271,5\text{kWh/m}^2$ respectivamente, ver Fig. 6.19 más atrás) se mostró mayor a la de otras investigaciones en viviendas con mampostería de ladrillo. Esto se explica debido a la necesidad de incorporar elementos de acero u hormigón armado para reforzar los muros de mampostería de ladrillo o de bloques de concreto en un país que es altamente sísmico.

En este contexto, desde que la vivienda social estructurada con muros de madera mostró resultados más favorables que la albañilería para TNC, GWP y CED, sumado a que la vivienda unifamiliar estructurada en madera ha presentado buen desempeño sísmico en el pasado (es liviana y flexible) y presenta un costo competitivo en relación

a la albañilería, las viviendas estructuradas con muros de madera aislados térmicamente debieran ser preferidas en un país que además es productor de madera. A lo anterior se suma que la madera es, a diferencia de los materiales que constituyen el muro de albañilería reforzado con hormigón armado, un recurso natural renovable que responde a los principios de economía circular, pues se trata de un material que secuestra carbón y que es de fácil reciclaje y reutilización, especialmente para la sustitución de un combustible fósil en la generación de energía calórica (biomasa). La madera es además un material liviano, facilitando los procesos para su gestión como residuo de construcción o demolición, por tanto, propicia el “metabolismo técnico” que asocia la economía circular. Esto sin considerar que el material en sí mismo, es un material orgánico que a partir de su descomposición responde a un “metabolismo biológico”.

f. En torno al objetivo OE6.

Se realizó el análisis energético, medio ambiental y económico asociado al acondicionamiento térmico de una vivienda social chilena característica a partir del estudio de casos abordados en los apartados 6.3 y 6.4. La vivienda modelada correspondió a una vivienda social unifamiliar, de tipología tradicional y pensada para 4 habitantes, es decir, de aproximadamente 50m², dos dormitorios, un estar living-comedor, una cocina y un baño, construida con muros de albañilería reforzada, vidriados monolíticos, cielo aislado y techumbre estructurada en cerchas de madera cubiertas con planchas de acero galvanizado. Esta vivienda fue modelada en el programa de simulación energética EnergyPlus, el que arrojó una demanda para calefacción, en la ciudad de Santiago (ubicada en la Z3 con mayor población), de 104,55kWh/m² al año y un tiempo no confortable (TNC) igual a 3514 horas (40,1% del tiempo). A partir de esta información, y a los supuestos que se plantean en los casos respectivos, se estimó la energía acumulada demandada (CED) por la vivienda en 5.934kWh/m² (299.667 kWh en 50 años) y los gases de efecto invernadero (GHG) en 1664kgCO₂eq/m² (84,03tCO₂eq en 50 años). Por otro lado, en el análisis económico de la inversión de eficiencia energética asociada a un reacondicionamiento térmico tradicional en la vivienda, se estimó un NPV_{r=3,5%} igual a 48,75UF, un payback simple al año 11 y una tasa interna de retorno igual 8,13% considerando un horizonte de 20

años, precios futuros para la energía “esperados” y un rendimiento del sistema de calefacción igual a 92%. También, considerando los mismos supuestos, pero para evaluar una inversión de reacondicionamiento térmico a nivel de viviendas ULEB, las estimaciones fueron un $NPV_{r=3,5\%}$ de $-16,85UF$ (payback actualizado a más de 20 años), payback simple al año 16 y una tasa interna de retorno de 2,89%.

Consecuentemente, se evidencia que la vivienda social estudiada, característica en las zonas más pobladas de Chile, no es confortable debido a que el 40% del tiempo la vivienda necesitará de energía para acondicionar térmicamente los espacios habitacionales según el estándar ASHRAE 55-2004, definiendo a una vivienda ineficiente cuya demanda para calefaccionar se aleja del consumo de energía primaria menor a $30kWh/m^2$ para calefaccionar viviendas LEB, es decir, si se consideran rendimientos de los sistemas en la vivienda y PEF iguales a 1, el consumo de esta vivienda social superaría este límite para viviendas LEB en 248,5%.

Al observar el valor para CED en la vivienda de estudio, se evidenció que este se escapa del promedio para viviendas de albañilería y se acerca al valor máximo para viviendas de este tipo conforme a Tabla 46. Lo mismo ocurre al observar los GHG, donde los rangos para las emisiones totales fluctúan entre $348,5 \text{ kgCO}_2\text{eq}/m^2$ y $6.485 \text{ kgCO}_2\text{eq}/m^2$ para horizontes de 50 años según lo establecido en el título 2.3.3. Lo que se explica, como ya se ha plateado previamente, por la ineficiencia energética que presenta la vivienda y por la mayor energía incorporada en la albañilería debido a la necesidad de refuerzos en acero u hormigón armado.

En torno a la evaluación económica de inversiones que mejoren el desempeño energético de la vivienda social en albañilería, conforme a los resultados que derivan del caso de estudio planteado en el apartado 6.4, se aprecia que conseguir hoy eficiencias a niveles de viviendas ULEB no es conveniente para horizontes de menos de 20 años. Donde la inversión representa aproximadamente el 73% del costo de la vivienda, evidenciando un alto costo de oportunidad para la decisión de inversión y la alta irrevocabilidad que presenta la vivienda de albañilería frente a mejoras que busquen cambiar sus atributos energéticos. Claramente el escenario cambia para horizontes de más de 20 años, a costo de capital bajo y a precios altos de la energía derivados de escenarios futuros poco sustentables (aumenta la demanda de los

recursos fósiles). En este contexto, y sumado a la modelación secuencial propuesta en el caso descrito en el apartado 6.4, se muestra más conveniente hoy la inversión en un reacondicionamiento tradicional e inversiones futuras en tecnologías que mejoren el desempeño energético de la vivienda (por ejemplo, un sistemas geotérmico con bomba de calor) en base a un escenario futuro que propicie el uso de energías limpias.

8. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se ha evidenciado una necesidad de investigación en torno a establecer bases de datos de inventario ambiental para materiales y productos de construcción en Chile, sobre todo desde las industrias de la madera, el ladrillo y el cemento, las que a la fecha aún no presentan declaraciones de impacto ambiental para sus productos. Asimismo, se evidenciaron escasas investigaciones en torno a las proyecciones de los precios de la energía en Chile, como también, poca transparencia en las metodologías para estimar los coeficientes de paso de energía secundaria a emisiones de dióxido de carbono y a energía primaria, evidenciando la adopción de parámetros internacionales debido a la falta de este conocimiento e investigación local.

La evaluación económica abordada para las alternativas de reacondicionamiento térmico en la vivienda de albañilería, bajo un escenario estático, mostró viable invertir “hoy” en la alternativa tradicional de reacondicionamiento y, bajo un escenario secuencial de decisión, invertir “mañana” en el sistema geotérmico con bomba de calor esperando el precio de la tecnología baje dado escenarios futuros supuestos de mayor consciencia sustentable. Sin embargo, este es un caso particular y, frente a la escasez de evaluaciones económicas dinámicas, se abren nuevas líneas de investigación en torno a evaluar nuevas alternativas de inversión de eficiencia energética considerando no solo escenarios futuros plausibles para los precios de la energía y la tecnología, sino también, otras variables como lo es el incremento de las temperaturas en el tiempo debido a los efectos del calentamiento global.

También se abre otra línea de investigación en torno a identificar el grado de irrevocabilidad de las viviendas en Chile, con atención a las diferentes tipologías constructivas y su adaptabilidad a la tecnología presente y futura. Esto abrirá hipótesis en torno a cómo deben diseñarse las viviendas para que presenten mayor adaptabilidad a las tecnologías futuras (análogo a una tecnología que incorporar elementos “plug and play” que permiten su “upgrade”) y cómo mejorar aspectos asociados a la gestión de RCD al término de la vida útil de las viviendas, esperando

facilitar el reciclaje, la reutilización y la recuperación de los desechos y emisiones durante todo el ciclo de vida de la vivienda. Investigaciones de este tipo aportarían conocimiento a la incipiente investigación local en torno a la aplicación de principios de economía circular en viviendas.

En torno a los ACV en viviendas, se evidencia que el estudio de las categorías de impacto CED y GWP, y las fases del ciclo de vida más incidentes para estas categorías de impacto (materiales y uso), resultan ser las más abordadas en las investigaciones de edificación, lo que abre la posibilidad de profundizar en otras categorías de impacto y otras fases del ciclo de vida de las viviendas, especialmente, la fase de desuso. Lo que no siempre se presenta debido a la carencia de base de datos de inventario ambiental. Esto abre otra línea de investigación en torno a la generación de indicadores, coeficientes y parámetros para la gestión de los residuos de construcción y demolición. Aspectos aún poco explorados y que en volumen representan una enorme cantidad de desechos (Bovea & Powell, 2016) (Vitale et al., 2017), solo en Chile se estima que por cada m² de construcción de un edificio se generan aproximadamente entre 1/5 y 1/4 de metro cúbico de desechos (Bravo, Valderrama, & Ossio, 2019).

Los resultados de la presente investigación responden solo una fracción de las tipologías para viviendas sociales chilenas y toma en consideración la materialidad en muros más frecuente (albañilería). De este modo, amplificar el espectro de investigación a otros tipos de viviendas chilenas, suma otra línea de investigación futura en torno a la evaluación de la sustentabilidad de edificaciones con base a la norma ISO14040.

Finalmente, desde que la albañilería se presenta menos eficiente y sustentable en contraste con muros estructurados en madera aislados térmicamente, surgen varias hipótesis en torno a justificar la menor frecuencia o preferencia del uso de la madera en la edificación, sobre todo en un país que es productor de madera. Lo que abre una línea de investigación en torno a identificar causas culturales, sociales, económicas, gubernamentales, normativas, tecnológicas o de otro tipo que no propiciarían el uso de la madera en la edificación, contrarrestando los esfuerzos para hacerla preferida conforme a lo establecido al final del apartado 3.6.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244–248.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- AFEC. (2019). Preguntas frecuentes Bomba de Calor. Retrieved April 25, 2019, from <https://www.bombadecolor.org/consumidor/preguntas-frecuentes/>
- Anand, C. K., & Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- ANSI/ASHRAE. (2016). *STANDARD 55-2013 User's Manual*.
- Antón Vallejo, M. A. (2004). *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from <https://www.tesisenred.net/handle/10803/6827#page=1>
- Asaee, S. R., Ugursal, V. I., & Beausoleil-Morrison, I. (2017). Techno-economic assessment of solar assisted heat pump system retrofit in the Canadian housing stock. *Applied Energy*, 190, 439–452. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.053>
- Asdrubali, F., Baldassarri, C., & Fthenakis, V. (2013). Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, 64, 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.018>
- Asociación de generadoras de Chile. (2017). *Actualización de la proyección de emisiones 2017- 2030 y análisis medidas de mitigación de CO2 equivalente*.
- Asociación de generadoras de Chile. (2018). *El futuro de la electricidad en Chile. 2nd Latin America Energy Summit*. Retrieved from <https://www.energiaadebate.com/blog/3103/>
- Asociación de generadoras de Chile. (2019). *Boletín del mercado eléctrico sector generación*.
- Baño Nieva, A., & Vigil-Escalera del Pozo, A. (2005). *Guía de construcción sostenible*.
- Berardi, U. (2013). Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. *Sustainable Cities and Society*, 8(2013), 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.008>
- Bjork, C., Bliss, F., Underwood, D. M., Zhivov, A. M., Miller, J. P., Woody, A., ... Dixon, D. (2008). *Energy Optimization Assessment at U.S. Army Installations*.
<https://doi.org/ERDC/CERL TR-08-15>
- Blender, M. (2015). La reglamentación térmica - una mirada a 15 años de vigencia. Retrieved February 17, 2019, from <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/la-reglamentacion-termica/>
- Borsdorf, A., Hildalgo, R., & Vidal-Koppmann, S. (2016). Social segregation and gated

- communities in Santiago de Chile and Buenos Aires. A comparison. *Habitat International*, 54, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.11.033>
- Bovea, M. D., & Powell, J. C. (2016). Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. *Waste Management*, 50, 151–172. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.036>
- BP. (2016). *BP Statistical Review of World Energy. Statistical Review of World Energy*. Retrieved from <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- BP. (2018). *BP Statistical Review of World Energy. Statistical Review of World Energy*. Retrieved from <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Bravo, J., Valderrama, C., & Ossio, F. (2019). Cuantificación Económica de los Residuos de Construcción de una Edificación en Altura: Un Caso de Estudio. *Información Tecnológica*, 30(2), 85–94. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000200085>
- Bunster, V., & Noguchi, M. (2015). Profiling space heating behavior in Chilean social housing: Towards personalization of energy efficiency measures. *Sustainability (Switzerland)*, 7(6), 7973–7996. <https://doi.org/10.3390/su7067973>
- Bustamante, W. (2009). *Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social*. (MINVU, Ed.). Santiago.
- Bustamante, W., Cepeda, R., Martínez, P., & Santa María, H. (2013). Eficiencia Energética en Vivienda Social: Un desafío posible. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*, 33. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Cáceres-Seguel, C. (2017). Vivienda social periurbana en Santiago de Chile: la exclusión a escala regional del trasurbanita de Santiago de Chile. *Economía Sociedad y Territorio*, 53, 171–198. <https://doi.org/10.22136/est002017664>
- Calkins, M. (2009). *A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials*. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=FVqXqhvUhe0C&pgis=1>
- Camus, P., Arenas, F., Lagos, M., & Romero, A. (2016). Visión histórica de la respuesta a las amenazas naturales en Chile y oportunidades de gestión del riesgo de desastre. *Revista de Geografía Norte Grande*, 20(64), 9–20. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000200002>
- Cárdenas, J. P., Muñoz, E., Riquelme, C., & Hidalgo, F. (2015). Simplified life cycle

- assessment applied to structural insulated panels homes Análisis de ciclo de vida simplificado aplicado a viviendas de paneles SIP (structural insulated panels). *Revista Ingeniería de Construcción*, 30, 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2010.04.005>
- CDT. (2010). *Estudio de Usos Finales y Curva de Oferta de la Conservación de la Energía en el Sector Residencial*. Santiago.
- CDT. (2012). *Humedad por condensación en viviendas, prevención y soluciones*. Documento Técnico CDT N°33 (Vol. 33).
- CDT. (2015a). *Guía desarrollo sustentable de proyectos inmobiliarios*. (J. C. Contreras, Ed.) (CDT). Santiago.
- CDT. (2015b). *Manual acondicionamiento térmico, criterios de intervención*. (CDT, Ed.) (Primera).
- CDT. (2015c). *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*.
- Çengel, Y., & Boles, M. A. (2006). *Thermodynamics - An Engineering Approach*. (McGraw-Hill, Ed.), *Thermodynamics - An Engineering Approach* (Vol. 5th Editio).
- Chastas, P., Theodosiou, T., Bikas, D., & Kontoleon, K. (2017). Embodied Energy and Nearly Zero Energy Buildings: A Review in Residential Buildings. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 554–561. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.123>
- Chastas, Panagiotis, Theodosiou, T., Kontoleon, K. J., & Bikas, D. (2018). Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings. *Building and Environment*, 130(December 2017), 212–226. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.032>
- Circular Ecology. (2011). ICE v.2.0. Retrieved April 19, 2019, from <http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#.XMMrauhKg54>
- CIS. (2015). *Insatisfacción barrial en conjuntos de viviendas sociales. énfasis* CIS#8. Santiago.
- Ciulla, G., Galatioto, A., & Ricciu, R. (2016). Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings. *Energy and Buildings*, 128, 649–659. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.044>
- CNE/PNUD/UTFSM. (2008). *Irradiancia solar en territorios de la república de Chile*.
- CNE. (2016). Informe de proyecciones de precios de combustibles 2016-2031, www.cne.cl. <https://doi.org/6605488> [pii]r10.1038/sj.bjc.6605488
- CNE. (2017). Anuario Estadístico de Energía 2017, 1(1), 164.
- CNE. (2019a). Kerosene en línea. Retrieved April 8, 2019, from www.parafinaenlinea.cl
- CNE. (2019b). Tarificación eléctrica. Retrieved April 7, 2019, from <https://www.cne.cl/tarificacion/electrica/precio-nudo-promedio/>
- CNN Chile. (2019). Edificios de madera y en altura , las construcciones sustentables que

- podrían resolver el déficit habitacional. Retrieved April 19, 2019, from https://www.cnnchile.com/tendencias/edificio-madera-altura-sustentabilidad_20190228/
- Comisión Nacional de Energía. (2018). Factores de Emisión Sistema Eléctrico Chileno. Retrieved from <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>
- Comité Ejecutivo de Escenarios Energéticos Chile. (2018). *Futuro de la Energía en Chile: Factores de cambio y tendencias*. Santiago. Retrieved from <http://escenariosenergeticos.cl/hacemos/>
- CORMA. (2019a). Nuevo sistema constructivo logra simplificar la construcción en obras de entramado ligero. Retrieved from <https://www.madera21.cl/nuevo-sistema-constructivo-logra-simplificar-la-construccion-en-obras-de-entramado-ligero/>
- CORMA. (2019b). VAP: La innovación chilena que permite crear casas en madera en un par de días sin desechos. Retrieved from <https://www.madera21.cl/vap-la-innovacion-chilena-que-permitira-crear-casas-en-madera-en-un-par-de-dias-y-sin-desechos/>
- Cortés, A., & Ridley, I. (2013). Efectos de la combustión a leña en la calidad del aire intradomiciliario. La ciudad de Temuco como caso de estudio. *Revista INVI*, 28(August), 257–271.
- Coyle, D. (2016). An investigation into the cost optimality of the Passive House retrofit standard for Irish dwellings using Life Cycle Cost Analysis. *Journal of Sustainable Design & Applied Research*, 4(1), 4–14. <https://doi.org/10.21427/D7MW2H>
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. *Automation in Construction*, 103(March), 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- CSustentable. (2018). ECOBASE Construcción Sustentable.
- De Boeck, L., Verbeke, S., Audenaert, A., & De Mesmaeker, L. (2015). Improving the energy performance of residential buildings: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 960–975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.037>
- Designing Buildings Ltd. (2019). Designing Buildings Wiki. Retrieved April 13, 2019, from <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/U-values>
- Disate. (2017). Servicio de termografía de Placo. Retrieved April 14, 2019, from <http://www.disate.es/servicio-de-termografia-de-placo/>
- Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(October 2016), 390–413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051>
- DOE. (2019). EnergyPlus Software. Retrieved April 18, 2019, from <https://energyplus.net/>
- Dorra, M. M., Farroh, H. E.-S., & Amer, L. (2018). A Proposal for Desert House Design in Egypt Using Passive Ground Cooling Techniques. *Renewable Energy and Sustainable*

- Development*, 4(1), 21–41. <https://doi.org/10.21622/resd.2018.04.1.021>
- Dossche, C., Boel, V., & De Corte, W. (2017). Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. *Procedia Engineering*, 171, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.338>
- ecoinvent. (2007). Ecoinvent Version 2 Database. Retrieved April 19, 2019, from <https://www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>
- EIA. (2019a). Annual Energy Outlook 2019. Retrieved April 4, 2019, from <https://www.eia.gov/analysis/projection-data.php>
- EIA. (2019b). Factors Affecting Electricity Prices.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). How The Circular Economy Tackles Climate Change. *Material Economics*, (September), 1–62.
- Emol. (2019). JPMorgan ve a la inflación en Chile. Retrieved April 19, 2019, from <http://www.elmercurio.com/Inversiones/Noticias/Analisis/2019/01/09/JPMorgan-ve-a-la-inflacion-en-Chile-cerrando-2019-en-35.aspx>
- Energysage. (2018). Is residential electricity price going up or down? Retrieved May 3, 2019, from <http://news.energysage.com/residential-electricity-prices-going-up-or-down/>
- Espinosa, C. F., & Fuentes, A. C. (2015). Hygrothermal comfort within the context of social housing and the perceptions of dwellers [Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante]. *Revista INVI*, 30(85), 227–242. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582015000300008>
- Esser, A., & Sensfuss, F. (2016). *Evaluation of primary energy factor calculation options for electricity*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Retrieved from https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_report_pef_eed.pdf
- Estay, T., & Ovalle, X. (2017). Informe Final Desarrollo de factores de emisión específicos para el programa HuellaChile, 1–23. Retrieved from http://www.huellachile.cl/wp-content/uploads/2018/02/INFORME-FINAL_factores-de-emisión.pdf
- Evangelista, P. P. A., Kiperstok, A., Torres, E. A., & Gonçalves, J. P. (2018). Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 169, 748–761. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045>
- Evangelisti, L., Battista, G., Guattari, C., Basilicata, C., & Vollaro, R. de L. (2014). Analysis of two models for evaluating the energy performance of different buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 6(8), 5311–5321. <https://doi.org/10.3390/su6085311>
- Exxon Mobil Corporation. (2018). *2018 Outlook for Energy: A view to 2040*. <https://doi.org/10.1080/01998595.2012.10491656>
- Feinstein, L., & Lupton, R. (2007). The public value of social housing: A longitudinal analysis of

- the relationship of housing and life chances. *Centre for Research* Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Ruth_Lupton/publication/41956332_The_public_value_of_social_housing_a_longitudinal_analysis_of_the_relationship_between_housing_and_life_chances/links/0fcfd50d479999448b000000.pdf
- Fouquet, M., Levasseur, A., Margni, M., Lebert, A., Lasvaux, S., Souyri, B., ... Woloszyn, M. (2015). Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Building and Environment*, 90, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.022>
- GERDAU. (2017). Declaración ambiental de producto huella ambiental de producto Barras de Refuerzo de Acero. Retrieved April 19, 2019, from <http://www.gerdau.cl/files/DAPs/DAP-Barras-de-Refuerzo-2017.pdf>
- GGF. (2019). Calculation approach for impact measurement. Retrieved April 14, 2019, from <https://www.ggf.lu/project-portfolio/impact-monitoring/calculation-approach-for-impact-measurement/>
- Ghosh, S. K. (2020). *Circular Economy: Global Perspective*. *Circular Economy: Global Perspective*. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1052-6>
- Girard, A., Gago, E. J., Muneer, T., & Caceres, G. (2015). Higher ground source heat pump COP in a residential building through the use of solar thermal collectors. *Renewable Energy*, 80, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.063>
- Gobierno de Chile. (2019). Precios de cilindros de GLP. Retrieved April 8, 2019, from www.gasenlinea.gob.cl
- Gregory, J. (2017). MIT CSHub Webinar: Buildings Life Cycle Assessment. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=5JDcccCxhuE&t=8s>
- Hammond, G. P., & Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161(2), 87–98. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
- Harfgard, S., Sánchez, I., Flores, M., & González, D. (2016). *Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile*. Santiago.
- Hernández-Sánchez, J. M. (2013). Metodología basada en ACV para la evaluación de sostenibilidad en edificios. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 1–231. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/10803/116927>
- Hernández, H. (2009). *Tesis de Magíster “Propuesta de una metodología de certificación de eficiencia energética para viviendas en Chile.”* Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Hernández, H. (2016). Análisis energético de una vivienda: Demanda para calefacción en una vivienda modular termo estructural bajo régimen dinámico y estacionario. *Ingeniería Al Día*, 8(2), 46–50.
- Hernández, H. (2017). Eficiencia energética en una vivienda social: Análisis de mejoras en

- aislamiento térmico a partir de la reglamentación térmica. *Ingeniería Al Día*, 9(2), 40–47.
- Hernández, H, & Meza, L. (2010). Proposal of a methodology for energy efficiency certification of housing in Chile. *Revista de La Construcción*, 10(1), 53–63.
- Hernández, Hector. (2017). Economic assessment of energy efficiency investments in dwellings = Evaluación económica de inversiones de eficiencia energética en viviendas. *Building & Management*, 1(2), 36. <https://doi.org/10.20868/bma.2017.2.3552>
- Hernandez, P., Oregi, X., Longo, S., & Cellura, M. (2018). *Life-cycle assessment of buildings. Handbook of Energy Efficiency in Buildings: A Life Cycle Approach*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00010-3>
- Herrera, C. (2019, June 22). Subsidio de Mejoramiento Térmico para la Vivienda del Minvu. Retrieved from <https://www.diarioconcepcion.cl/ciudad/2018/06/22/conoce-como-postular-al-subsidio-de-mejoramiento-termico-para-la-vivienda-del-minvu.html>
- Hitchin, R. (2019). Primary Energy Factors and the primary energy intensity of delivered energy: An overview of possible calculation conventions. *Building Services Engineering Research and Technology*, 40(2), 198–219. <https://doi.org/10.1177/0143624418799716>
- Hoxha, E., Habert, G., Lasvaux, S., Chevalier, J., & Le Roy, R. (2017). Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. *Journal of Cleaner Production*, 144, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.068>
- IDAE. (2016). Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España, 31. Retrieved from http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros documentos/Factores_emision_CO2.pdf
- IDAE. (2018). *Energy efficiency trends and policies in Spain. Energy Efficiency trends and policies in Spain*. Retrieved from <http://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-spain.pdf>
- IDIEM. (2015). *2do. Informe de Avance Revisión Técnica ECOBASE Construcción*. Santiago.
- IEA. (2018a). *World Energy Investment*. Retrieved from www.iea.org
- IEA. (2018b). *World Energy Outlook 2018 - Scenarios*. Retrieved from <https://www.iea.org/weo/>
- INE. (2017). Resultados CENSO 2017. Retrieved April 20, 2019, from <https://resultados.censo2017.cl/>
- INN. Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico, Pub. L. No. 1079 (2008). Chile. Retrieved from <http://seigrapa.weebly.com/uploads/1/1/8/2/11828201/nch1079-1977.pdf>
- International Energy Agency. (2008). Energy Efficiency Requirements in Building Codes , Energy Efficiency Policies for New Buildings. *IEA Information Paper*, (March), 1–85.

- <https://doi.org/10.1.1.378.1012>
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5 °C - SR15*. *Ipcc - Sr15*. Retrieved from <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- Islam, H., Jollands, M., & Setunge, S. (2015). Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.006>
- Ismaeel, W. S. E. (2018). Midpoint and endpoint impact categories in Green building rating systems. *Journal of Cleaner Production*, 182, 783–793. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.217>
- ITeC. (2018). Información ambiental de productos y sistemas. Retrieved April 19, 2019, from <https://itec.es/metabase/productos-sostenibles/18/203/0/>
- Kibert, C. J. (2013). *Sustainable Construction, Green Building Design and Delivery*. (John Wiley & Sons, Ed.) (Third edit).
- Korhonen, J. (2005). Industrial ecology for sustainable development: Six controversies in theory building. *Environmental Values*, 14(1), 83–112. <https://doi.org/10.3197/0963271053306096>
- Kuhlman, T., & Farrington, J. (2010). What is sustainability? *Sustainability*, 2(11), 3436–3448. <https://doi.org/10.3390/su2113436>
- Kuittinen, M., & Linkosalmi, L. (2015). *Compiling environmental product declarations for wood-based construction products assessment and documentation*.
- Kumbaroglu, G., & Madlener, R. (2012). Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings. *Energy and Buildings*, 49, 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.022>
- Lavigne, P. (2011). Comprendre Les Inerties Thermiques Dans Les Batiments.
- Lavigne, P., Brejon, P., & Fernández, P. (2003). *Arquitectura Climática - Una contribución al desarrollo sustentable - Tomo 1: Bases Físicas*. Universidad de Talca.
- Leemans, R. (2016). Introduction to climate change and possible solutions. *Sustainable Urban Development Course*. Wageningen University & TU Delft on behalf of the AMS Institute.
- Leising, E., Quist, J., & Bocken, N. (2018). Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool. *Journal of Cleaner Production*, 176, 976–989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.010>
- Levitt, B. (2017). Visualizing Net Energy Generation. Retrieved April 18, 2019, from <https://www.youtube.com/watch?v=ig8XaRBTLIU&t=1s>
- Lewandowska, A., Noskowiak, A., Pajchrowski, G., & Zarebska, J. (2015). Between full LCA and energy certification methodology—a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(1), 9–22. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0805-3>

- LIGNUM. (2018). Análisis del Ciclo de Vida: midiendo el impacto ambiental de la cuna a la tumba. Retrieved from <http://www.lignum.cl/reportajes/analisis-del-ciclo-vida-midiendo-impacto-ambiental-la-cuna-la-tumba/>
- Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55(December), 889–902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
- Mangan, S. D., & Oral, G. K. (2016). Assessment of residential building performances for the different climate zones of Turkey in terms of life cycle energy and cost efficiency. *Energy and Buildings*, 110, 362–376. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.002>
- Marincic, I. (1999). *Respuestas térmicas dinámicas en edificios: control térmico a través de la climatización natural*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Marjaba, G. E., & Chidiac, S. E. (2016). Sustainability and resiliency metrics for buildings - Critical review. *Building and Environment*, 101, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.002>
- Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., & Marrero, M. (2016). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243>
- Milne, M., Liggett, R., Benson, A., & Bhattacharya, Y. (2009). Climate consultant 4.0 develops design guidelines for each unique climate. *38th ASES National Solar Conference 2009, SOLAR 2009*, 8, 4559–4593.
- Ministerio de Energía. (2015). *Energía 2050 - Política-Energética de Chile*. Santiago. Retrieved from http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf
- Ministerio de Energía. (2018). Factores de emisiones para combustibles utilizados en Chile. Retrieved from <http://huelladecarbono.minenergia.cl/combustible-chile>
- Ministerio de Energía. (2019). Explorador Solar de Chile. Retrieved April 14, 2019, from <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Plan nacional de adaptación al cambio climático*.
- MINVU. (2006). *Manual de Usuario CCTE v2.0. Gestión*. Retrieved from https://forja.rediris.es/docman/view.php/27/237/User_Manual.pdf
- MINVU. Anteproyecto de norma: “Requisitos y mecanismos de acreditación para el acondicionamiento ambiental de las Edificaciones. Parte 2: Comportamiento higrotérmico” (2014). Chile.
- MINVU. (2014b). Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1434, 151–181.
- MINVU. (2016). *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile - Tomo II Energía*. (DITEC - División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional, Ed.). Santiago.

- MINVU. (2018a). Calificación energética de viviendas. Retrieved April 18, 2019, from <https://www.calificacionenergetica.cl>
- MINVU. (2018b). *Manual para la Implementación de Declaraciones Ambientales de Productos de Construcción*. (División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional - Ditec, Ed.).
- MINVU. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Pub. L. No. D.S.47 (2018). Chile. Retrieved from http://www.minvu.cl/opensite_20061113165715.aspx
- MINVU. (2019). *Tabla de costos de obras de edificación*. Santiago. Retrieved from http://www.minvu.cl/opensite_20080311104413.aspx#20101228095006
- MMA. (2014). Futuro de la calefacción en Chile: Opciones y Consecuencias.
- Mohammadpourkarbasi, H., & Sharples, S. (2013). The Eco-Refurbishment of a 19th Century Terraced House: Energy and Cost Performance for Current and Future UK Climates. *Buildings*, 3(1), 220–244. <https://doi.org/10.3390/buildings3010220>
- Monroy, M. M. (2006). *Manual del CALOR* (Ayuntamien).
- Moore, C. A., Thomas, S., & Schüwer, D. (2013). A global strategic approach to energy efficiency in the building sector. *ECEEE Summer Study Proceedings*, (1), 1297–1305.
- Moreira-Muñoz, A. (2011). *Plant geography of Chile*. (Springer, Ed.).
- Morrissey, J., & Horne, R. E. (2011). Life cycle cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings. *Energy and Buildings*, 43(4), 915–924. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.013>
- Mountain, B., & Percy, S. (2018). The verdict is in : renewables reduce energy prices (yes , even in South Australia). Retrieved May 2, 2019, from <https://theconversation.com/amp/the-verdict-is-in-renewables-reduce-energy-prices-yes-even-in-south-australia-108251>
- Muñoz, C, Zaror, C., Saelzer, G., & Cuchí, A. (2012). Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile. *Revista de La Construcción*, 11(3), 125–145. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000300011>
- Muñoz, Claudia. (2013). *Estudio de la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de viviendas en Chile*. Universidad del Biobío.
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Muhd, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO₂emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843–862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>
- Nicol, J. F. (2002). Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. Oxford Centre for Sustainable Development, 34, 563–572. Retrieved from [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?)

ReferenceID=1880267

- Nicolae, B., & George-Vlad, B. (2015). Life cycle analysis in refurbishment of the buildings as intervention practices in energy saving. *Energy and Buildings*, 86(2015), 74–85.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.021>
- NME. (2017). La interconexión ya es una realidad: TEN conecta el SIC con el SING e inicia operación comercial. Retrieved April 1, 2019, from
<http://www.nuevamineria.com/revista/la-interconexion-ya-es-una-realidad-ten-conecta-el-sic-con-el-sing-e-inicia-operacion-comercial/>
- Ochoa, J. (2018). Madera chilena: la solución para construir medio millón de viviendas. Retrieved April 19, 2019, from <https://www.diarioconcepcion.cl/economia-y-negocios/2018/11/16/madera-chilena-la-solucion-para-construir-medio-millon-de-viviendas.html>
- OECD. (2018). *Implementing the Paris Agreement: Remaining Challenges and the Role of the OECD*.
- ONDAC. (2018). *Manual de costos, materiales y actividades para la construcción*. Santiago. Retrieved from <https://www.ondac.com/602/w3-channel.html>
- Oregi, X., Hernandez, P., & Hernandez, R. (2017). Analysis of life-cycle boundaries for environmental and economic assessment of building energy refurbishment projects. *Energy and Buildings*, 136, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.057>
- Ortega, B. (2017). *Evaluación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para una casa representativa en diferentes climas de Chile*. Universidad de Chile.
- Otárola, C. Y. (2016). *Estudio comparativo del recambio de calefactores a leña por sistema eléctrico invierno - 2016*.
- Oyarzo, J., & Peuportier, B. (2014). Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 69(March 2012), 109–116.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.090>
- Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559–3573.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>
- Passivhaustrust. (2016). Lansdowne Drive. Retrieved April 19, 2019, from
<http://www.passivhaustrust.org.uk/projects/detail/?cld=77#.XMZAJ-hKg57>
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Quispe, C. (2016). Análisis de la Energía Incorporada y emisiones de CO2 Aplicado a Viviendas Unifamiliares de Eficiencia Energética, 105.
- Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An

- overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592–1600.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>
- Rehbein, C. (2018). Así es la “super madera” que podría llegar a las viviendas sociales.
Retrieved April 19, 2019, from <https://www.publimetro.cl/cl/noticias/2018/12/06/super-madera-clt-viviendas-sociales.html>
- Reyes Martínez, F. J., & Velasco Gómez, E. (2006). *Eficiencia energética en edificios. Certificación y auditorías energéticas*. (Thomson Editores Spain, Ed.). Madrid.
- Reyes, R., Nelson, H., Navarro, F., & Retes, C. (2015). El dilema de la leña, ¿cómo reducir la contaminación del aire sin incrementar el costo en calefacción? *Revista Energy for Sustainable Development*, 28, 75–87. <https://doi.org/DOL: 10.13140/RG.2.1.1006.2161>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2018). Energy. Retrieved December 23, 2019, from <https://ourworldindata.org/energy>
- Rivela, B. (2012). *Propuesta metodológica de aplicación sectorial de análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de la edificación en España*. Universidad de Santiago de Compostela.
- Romano, S., & Riediger, N. (2020). BIM as a tool for Green Building Certifications: An evaluation of the energy category of LEED, BREEAM and DGNB. *Journal of Physics: Conference Series*, 1425(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012162>
- Romero, J. (2007). *Cuantificación, caracterización y análisis de la comercialización de leña en Puerto Williams, isla Navarino, XII región*. Universidad de Chile. Retrieved from http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/romero_j2/sources/romero_j2.pdf
- Rossi, B., Marique, A. F., Glaumann, M., & Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment*, 51, 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.017>
- Sáez, S., Walther, R., Welzel, G., Cárdenas, P., & Meyer, A. (2015). Asesoría para el Análisis del Mercado de Leña y establecimiento de un Modelo de Negocios para un Centro de Acopio y Secado de Leña en la ciudad de Coyhaique.
- Sanz, J. (2012). *Análisis del Ciclo de Vida de una vivienda media de la Región de Murcia*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Sarricolea, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 123–141.
<https://doi.org/10.1007/BF00388333>
- Schüwer, D., Klostermann, J., Moore, C., & Thomas, S. (2012). *Strategic Approach - The Strategic Approach to improving energy efficiency in buildings*.
- Schwartz, Y., Raslan, R., & Mumovic, D. (2018). The life cycle carbon footprint of refurbished and new buildings – A systematic review of case studies. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 81(June 2017), 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.061>
- Senado de Chile. (2018). Norma sobre Eficiencia Energética: Mejor aislación térmica de viviendas, y automóviles más rendidores. Retrieved from <http://www.senado.cl/norma-sobre-eficiencia-energetica-mejor-aislacion-termica-de-viviendas/senado/2018-10-31/103801.html>
- Senado de Chile. (2019). Discusión sobre Boletín N° 4338-14. Retrieved April 14, 2019, from http://www.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin_ini=4338-14
- SEREMI del Medio Ambiente del Maule. (2018). *Reporte de comercio formal de leña seca y pellets*. Talca. Retrieved from <http://www.calefaccionsustentable.cl/wp-content/uploads/2018/08/Reporte-precios-lena-septiembre.pdf>
- SERNAC. (2018). *PRECIOS DE LEÑA SECA EN VALDIVIA*. Retrieved from https://www.sernac.cl/portal/607/articles-55147_archivo_01.pdf
- Serra, R., & Coch, H. (1995). *Architecture and natural energy*. (Ediciones UPC, Ed.) (Primera). Retrieved from <http://ecocosas.com/wp-content/uploads/Biblioteca/Arquitectura/Arquitectura y energia natural.pdf>
- Serrano, P. (2016). Recuperador de calor ¿para qué sirve? Retrieved April 14, 2019, from <https://www.certificadosenergeticos.com/recuperador-de-calor-para-que-sirve>
- Sousa, J. (2012). Energy simulation software for buildings: Review and comparison. *CEUR Workshop Proceedings*, 923, 57–68.
- Taivo, M. (2015). Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero en una vivienda social tipo para la incorporación del impacto de cambio climático a la reglamentación térmica nacional.
- Tapia, R. (2011). Vivienda social en Santiago de Chile. Analisis de su comportamiento locacional, período 1980 - 2002. *Revista INVI*, 26(73), 105–131. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582011000300004>
- Termocret. (2019). Paneles Sip Termosip. Retrieved April 19, 2019, from <http://www.termocret.cl/eficacia.html>
- TU Delft. (2019). Zero-Energy Design: an approach to make your building sustainable. Retrieved April 14, 2019, from <https://courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+ZEBD01x+1T2019>
- UCLA. (2018). Programa Climate Constultant 6.0. Retrieved from <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>
- Ugarte, J. J., & Acevedo, J. (2016). Taller de investigación y proyecto: Arquitectura y construcción en madera.
- UTFSM - U. de Chile. (2008). *Aporte potencial de: Energías Renovables a la Matriz Eléctrica, Eficiencia Energética No Convencionales y 2008-2025*.
- Verbruggen, A. (2012). Financial appraisal of efficiency investments: Why the good may be

- the worst enemy of the best. *Energy Efficiency*, 5(4), 571–582.
<https://doi.org/10.1007/s12053-012-9149-7>
- Verbruggen, A., Marchohi, M. Al, & Janssens, B. (2011). The anatomy of investing in energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, 43(4), 905–914.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.011>
- Vilches, A., Garcia-Martinez, A., & Sanchez-Montañes, B. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy and Buildings*, 135, 286–301.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042>
- Vitale, P., Arena, N., Di Gregorio, F., & Arena, U. (2017). Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building. *Waste Management*, 60, 311–321.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.002>
- Volcán. (2016). Declaración ambiental de productos: Yeso Cartón Volcanita. Retrieved April 19, 2019, from <http://www.wold.volcan.cl/imagenes/productos/dap/YesoCarton01-12-16.pdf>
- Wadel, G. (2009). *La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: la construcción modular ligera aplicada a la vivienda*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Weather Spark. (2019). Clima promedio en Santiago de Chile. Retrieved April 19, 2019, from <https://es.weatherspark.com/>
- Weitzman, M. (1999). “Just Keep Discounting, But ...” *Discounting and Intergenerational Equity*. Retrieved from <http://scholar.harvard.edu/weitzman/publications/just-keep-discounting>
- Weitzman, M. L. (1998). Why the far-distant future should be discounted at its lowest possible rate. *Journal of Environmental Economics and Management*, 36(3), 201–208.
<https://doi.org/10.1006/jeem.1998.1052>
- Wilby, M. R., Rodríguez González, A. B., & Vinagre Díaz, J. J. (2014). Empirical and dynamic primary energy factors. *Energy*, 73, 771–779.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.083>
- Wotherspoon, A. (2018). Análisis del Ciclo de Vida: midiendo el impacto ambiental de la cuna a la tumba. Retrieved from <http://www.lignum.cl/reportajes/analisis-del-ciclo-vida-midiendo-impacto-ambiental-la-cuna-la-tumba/>
- Yang, L., Yan, H., & Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications - A review. *Applied Energy*, 115, 164–173.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>
- Yau, Y. H., & Hasbi, S. (2013). A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.035>
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., & Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building

certification. *Building and Environment*, 44(12), 2510–2520.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>

Zeinal Hamedani, A., & Huber, F. (2011). A comparative study of DGNB, LEED and BREEAM certificate systems in urban sustainability. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 155(May), 121–132. <https://doi.org/10.2495/SC120111>

Zhao, H. X., & Magoulès, F. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3586–3592. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>

10. ANEXOS

Anexo 1: Resistencias superficiales para distintas posiciones y flujos de calor en elementos constructivos.

Resistencias térmicas de superficie en $m^2 \times K/W$							
Posición del elemento y sentido del flujo de calor		Situación del elemento					
		De separación con espacio exterior o local abierto			De separación con otro local, desván o cámara de aire		
		R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$	R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$
Flujo horizontal en elementos verticales o con pendiente mayor que 60° respecto a la horizontal		0,12	0,05	0,17	0,12	0,12	0,24
Flujo ascendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60° respecto a la horizontal		0,09	0,05	0,14	0,10	0,10	0,20
Flujo descendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60° respecto a la horizontal		0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34
NOTAS 1) Estos valores se han obtenido experimentalmente por el método de NCh851. 2) Los valores de esta tabla corresponden a velocidades del viento en el exterior menores que 10 km/h. Para velocidades superiores se debe considerar $R_{se} = 0$. 3) Bajo condiciones de pérdidas térmicas por parte del local (invierno), en general, el flujo de calor es ascendente a través de techumbres y descendente a través de los pisos. 4) Bajo condiciones de ganancias térmicas por parte del local (verano), en general, el flujo de calor es ascendente a través de los pisos y descendente a través de las techumbres.							

Fuente: NCh853.

Anexo 2: Metodología de cálculo de transmitancias térmicas para distintos elementos de envolvente según NCh853

<ul style="list-style-type: none"> Elementos simples y homogéneos: Define el cálculo de elementos planos y paralelos compuestos por un solo elemento. 	$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \frac{e}{\lambda} + R_{se}$
<ul style="list-style-type: none"> Elementos compuestos: Define el cálculo de elementos planos y paralelos por más de un elemento y existencia de cámaras de aire. Donde $\sum e/\lambda$ corresponde a la sumatoria de las resistencias de las capas del elemento, R_i a las resistencias de las capas por lado interior, R_e a las resistencias de las capas por lado exterior, U_1 transmitancia calculada para el caso b) como si fuera el caso a), U_2 transmitancia calculada para el caso b) como si fuera el caso c), α es el coeficiente de ventilación de la cámara que toma valor 0.4 si es horizontal o valores tabla 3 para elementos verticales. 	<p>Por varias capas homogéneas:</p> $R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}$
	<p>a) Con cámara de aire no ventilada:</p> $R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + R_i + R_{\text{g}} + R_e + R_{se}$
	<p>b) Con cámara de aire medianamente ventilada:</p> $U = \frac{1}{R_T} = U_1 + \alpha(U_2 - U_1)$
	<p>c) Con aire de la cámara en movimiento:</p> $R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + R_i + R_{se}$
<ul style="list-style-type: none"> Elementos heterogéneos: Para elementos heterogéneos simples como la albañilería, se determina la transmitancia media a partir de las conductividades de los elementos constituyentes, para el caso de la albañilería de ladrillo (L) con mortero pega (M), tenemos, $U_{\text{PROM}} = (U_L \times A_L + U_M \times A_M) / A_{\text{TOTAL}}$. Para elementos complejos ver Norma. 	$\bar{U} = \frac{1}{R_T} = \frac{\sum U_i \times A_i}{\sum A_i}$
<ul style="list-style-type: none"> Elementos y complejos de espesor variable: Corresponde al cálculo de elementos de capas planas o con cámara de aire cuyo espesor es variable. Por su complejidad de cálculo se aconseja ver norma. 	<p>a) Elementos con capas de espesor variable (ver punto 5.5.1 en Norma)</p> <p>b) Complejos con cámara de aire de espesor variable (ver punto 5.5.2 en Norma)</p>
<ul style="list-style-type: none"> Pisos en contacto con terreno: cálculo a partir de resistencia de los elementos sin considerar la resistencia superficial al terreno. De acuerdo al valor se ingresa en tabla 4 para determinar un K_i 	$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} \rightarrow \text{Tabla 4}$
<ul style="list-style-type: none"> Losas o complejos de pisos sobre cámara de aire. Donde: α coeficiente obtenido tabla 5, R_p corresponde a la resistencia térmica de la losa o piso sobre envigado que separa la cámara de aire como elemento compuesto, A superficie en planta de la cámara de aire en m^2 y P_{ex} es el perímetro exterior (en planta) de la cámara de aire en m. 	$R_T = \frac{1}{U} = R_p + \frac{1}{\alpha + 3(P_{\text{ex}}/A)}$
<p>Sean:</p> <p>λ = conductividad térmica del material (W/mK)</p> <p>R_{si} = resistencia superficial interior equivalente a $1/h_i$ obtenidos de tabla 2 de la norma, en (m^2K/W)</p> <p>R_{se} = resistencia superficial exterior equivalente a $1/h_e$ obtenidos de tabla 2 de la norma, en (m^2K/W)</p> <p>R_g = resistencia de una cámara de aire obtenidos de tabla C.1, C.2 y C.3 (m^2K/W)</p> <p>Valores de transmitancia térmica (λ) en tabla A.1 en (W/m^2K)</p> <p>e = espesor de la capa en m. y K_i = coeficiente de transmisión lineal en (W/m^2K)</p>	

Fuente: (H. Hernández, 2009)

Anexo 3: Características de las fuentes de energía

Fuente de energía	Tipo de Energía	Características	Tecnologías de aplicación
El sol	Solar	Aprovechamiento de la energía de la radiación solar incidente en la tierra.	Célula fotovoltaica para generar electricidad, radiadores solares para abastecimiento de ACS o para calefacción radiante u otros sistemas de climatización. Máquina de absorción para refrigerar, bomba de frío/calor, entre otras.
El viento	Eólica	Es la energía obtenida a partir de la energía cinética producida por las corrientes de aire.	Turbinas o aerogeneradores que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica para producir electricidad.
Ríos y corrientes de agua dulce.	Hidráulica	Es aquella obtenida a partir del aprovechamiento de la energía cinética y potencial de las corrientes o saltos de agua dulce.	Turbinas de generación de energía eléctrica para pequeñas hidroeléctricas o rotores de palas para obtención de energía mecánica en la realización de un trabajo determinado, entre otros.
Mares y océanos	Mareomotriz o undimotriz	Obtenida del aprovechamiento de la energía cinética y potencial de las diferencias de mareas o del movimiento de las olas en el océano.	Generador eléctrico undimotriz (pelamos), generador eléctrico mareomotriz.
El calor de la Tierra	Geotérmica	Es la energía almacenada bajo la superficie terrestre que puede ser transformada o transferida mediante el uso de diferentes tecnologías.	Centrales eléctricas cuando las temperaturas sean grandes (por sobre los 150°C), para temperaturas medias y bajas (entre 35-150°C) aplicación en captadores geotérmicos para calefaccionar los espacios.
Materia orgánica	Biomasa	Es la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, que es utilizable como fuente de energía.	Pellets, biogás, biodiesel, entre otros. A partir de estas fuentes de energía se obtiene energía útil (térmica) para realizar un trabajo determinado.
Hidrógeno	Química	El hidrógeno es señalado como las grandes promesas para las décadas venideras ¹ , transforma energía química en eléctrica o mecánica.	Motor de hidrógeno y la pila de combustible (fuel cell) que combina hidrógeno y oxígeno bajo una reacción controlada para generar electricidad.
El átomo	Energía Nuclear de fusión ²	Es la energía que se obtiene a partir de las reacciones nucleares espontáneas o provocadas por el ser humano.	Reactores nucleares que producen energía eléctrica, energía mecánica o energía térmica, generador termoeléctrico de radioisótopos (GTR), entre otras.
	Energía Nuclear de fisión ³		
Combustibles fósiles (petróleo y sus derivados, gas natural o carbón).	Energía térmica	Es la energía que mediante combustión es transformada en energía calórica para producir trabajo.	Motores de combustión o térmicos para la generación de energía eléctrica o mecánica, cogeneración, entre otras.

Fuente: (H. Hernández, 2009)

¹ Presentan nula emisión de contaminantes de CO₂, CO y óxido de nitrógeno en la transformación de energía útil.

² Fusión a partir de isótopos de hidrógeno.

³ Su combustible principal es un mineral (uranio u otro).

Anexo 4: Clasificación de construcciones en Chile según OGUC

CAPITULO 3 CLASIFICACION DE LAS CONSTRUCCIONES

Artículo 5.3.1. Para los efectos de esta Ordenanza, conforme a los materiales predominantes a emplear y al tipo de estructura, en los edificios se distinguirán las siguientes clases de construcción:

Clase A: Construcciones con estructura soportante de acero. Entrepisos de perfiles de acero o losas de hormigón armado.

Clase B: Construcciones con estructura soportante de hormigón armado o con estructura mixta de acero con hormigón armado. Entrepisos de losas de hormigón armado.

Clase C: Construcciones con muros soportantes de albañilería de ladrillo confinado entre pilares y cadenas de hormigón armado. Entrepisos de losas de hormigón armado o entramados de madera.

Clase D: Construcciones con muros soportantes de albañilería de bloques o de piedra, confinados entre pilares y cadenas de hormigón armado. Entrepisos de losas de hormigón armado o entramados de madera.

Clase E: Construcciones con estructura soportante de madera. Paneles de madera, de fibrocemento, de yesocartón o similares, incluidas las tabiquerías de adobe. Entrepisos de madera.

Clase F: Construcciones de adobe, tierra cemento u otros materiales livianos aglomerados con cemento. Entrepisos de madera.

Clase G: Construcciones prefabricadas con estructura metálica. Paneles de madera, prefabricados de hormigón, yeso cartón o similares.

Clase H: Construcciones prefabricadas de madera. Paneles de madera, yesocartón, fibrocemento o similares.

Clase I: Construcciones de placas o paneles prefabricados. Paneles de hormigón liviano, fibrocemento o paneles de poliestireno entre malla de acero para recibir mortero proyectado.¹

Anexo 5: Tipologías constructivas estudio para la segunda etapa de la reglamentación térmica en Chile

N°	TIPOLOGÍA	N° VIVIENDAS [unidades]	[%]	N° PERMISOS [unidades]
1	Casas1p≤50-C Casas de 1 piso de hasta 50m² y con clasificación tipo C	91.610	13,89	23.959
2	Casas2p≤50-C Casas de 2 pisos de hasta 50m² y con clasificación tipo C	80.871	12,26	913
3	Casas1p≤50-E Casas de 1 piso de hasta 50m² y con clasificación tipo E	57.675	8,75	26.143
4	Deptos3p≤50-C Departamentos de 3 pisos de hasta 50m² y con clasificación tipo C	51.177	7,76	157
5	Casas1p50-100-C Casas de 1 piso, mayor de 50m² y hasta 100m², con clasificación tipo C	48.838	7,41	8.982
6	Casas2p50-100-C Casas 2 pisos, mayor de 50m² y hasta 100m², con clasificación tipo C	37.415	5,67	1.434
7	Casas2p≤50-E Casas de 1 piso de hasta 50m² y con clasificación tipo E	22.399	3,40	1.146
8	Casas2p50-100-CE Casas de 2 piso, mayor de 50m² y hasta 100m², con clasificación tipo CE	20.250	3,07	1.815
9	Deptos11-15p50-100-B Departamentos de 11 a 15 pisos mayores de 50m² y hasta 100m² con clasificación tipo B	13.997	2,12	112
10	Deptos6-10p50-100-B Departamentos de 6 a 10 pisos mayores de 50m² y hasta 100m² con clasificación tipo B	13.292	2,02	254
11	Casas2p≤50-CE Casas de 2 pisos de hasta 50m² y con clasificación tipo CE	12.257	1,86	264
12	Casas1p50-100-E Casas de 1 piso mayor de 50m² y hasta 100m² con clasificación E	10.883	1,65	8.599
13	Deptos5p50-100-B Departamentos de 5 pisos mayores de 50m² y hasta 100m² con clasificación tipo B	10.580	1,60	180
14	Deptos3p50-100-C Departamentos de 3 pisos mayores de 50m² y hasta 100m² con clasificación tipo C	9.024	1,37	92
15	Casas2p100-140-CE Casas 2 pisos mayor de 100m² y hasta 140m² con clasificación tipo CE	7.342	1,11	1.727
	TOTAL VIVIENDAS DENTRO DE LAS 15 TIPOLOGÍAS	487.610	73,94%	-
	TOTAL VIVIENDAS MUESTRA INE (1994-1998)	659.429	100%	-

Fuente: Instituto de la Construcción.⁴

⁴ CAMPOS, José y HUENCHUÑIR, Marcelo. 2° Etapa de reglamentación sobre acondicionamiento térmico en viviendas. En: Propuesta de modificación a la OGUC. Conferencia magistral. Santiago, Chile, Instituto de la Construcción. Septiembre 2003.

Anexo 6. Demandas de energía de calefacción en viviendas sociales y efectos en el mejoramiento con criterios de eficiencia energética

Zona Térmica	Zona Climática	Ciudad	Tipología de vivienda	Vivienda tipo		Vivienda mejorada		Vivienda criterios EE	
				Costo básico UF	Demanda de energía de calefacción kWh/m² año	Costo básico UF	Demanda de energía de calefacción kWh/m² año	Costo básico UF	Demanda de energía de calefacción kWh/m² año
1	NL	Arica	1 piso aislada	340	10	441			
			1 piso pareada	336	9	395			
			1 piso continua	322	7	399			
1	NVT	Copiapó	1 piso aislada	340	56	441	36	448	21
			1 piso pareada	336	50	395	34	425	19
			1 piso continua	322	45	399	32	405	17
2	ND	Calama	1 piso aislada	380	132	441	98	448	52
			1 piso pareada	376	123	395	93	425	50
			1 piso continua	362	115	399	91	405	45
2	CL	Valparaíso	1 piso aislada	380	82	441	59	448	38
			1 piso pareada	376	75	415	57	425	36
			1 piso continua	362	71	402	55	405	34
3	CI	Santiago	1 piso aislada	380	100	441	80	448	53
			1 piso pareada	376	93	415	76	425	51
			1 piso continua	362	87	402	73	405	48
4	SL	Concepción	1 piso aislada	380	120	441	103	448	65
			1 piso pareada	376	113	415	99	425	62
			1 piso continua	362	107	402	95	405	59
4	CI	Chillán	1 piso aislada	340	131	441	113	448	72
			1 piso pareada	336	123	395	107	425	68
			1 piso continua	322	116	399	102	405	65
5	SI	Temuco	1 piso aislada	340	136	441	122	448	77
			1 piso pareada	336	130	395	118	425	75
			1 piso continua	322	125	399	115	405	71
5	SL	Valdivia	1 piso aislada	340	138	441	124	448	80
			1 piso pareada	336	133	395	120	425	78
			1 piso continua	322	128	399	117	405	74
6	SL	Puerto Montt	1 piso aislada	340	141	441	126	448	82
			1 piso pareada	336	135	395	122	425	80
			1 piso continua	322	129	399	118	405	76
7	SE	Punta Arenas	1 piso aislada	470	272	511	252	518	172
			1 piso pareada	466	260	507	243	513	163
			1 piso continua	452	252	493	236	500	155

Nota: Las demandas de energía de calefacción se estiman para los 6 meses más fríos del año en todas las ciudades, salvo en Punta Arenas donde se consideró el año completo.

Fuente: (Bustamante et al., 2013)

Anexo 7. Ficha conformación de la vivienda tipo proyecto 3499-2-LR17

<p>Conformación de la vivienda tipo</p> <p>La Vivienda Tipo es para la Construcción en Sitio Propio – CSP.</p> <p>Su arquitectura fomenta las líneas simples y terminación lisa. Al ser construida en albañilería armada permite una respuesta en todo el paño del muro ante sismos. Su distribución permite una espacialidad interior fluida., ya que cuenta con dormitorios espaciosos, baño, comedor-estar y cocina apartada del espacio común, la cual tiene acceso a un lavadero exterior.</p>	<p>PLANTA ARQUITECTURA</p> <p>SIMBOLOGIA MATERIALIDAD</p> <p>ELEVACION NORTE</p>
<p>Materialidad</p> <p>Albañilería armada 2,4 x 2,2 x 0,14 (m), constituida por ladrillos cerámicos hechos a máquina Santiago TE9 Estructural de 320 mm de largo x 152 mm de ancho y espesor de 94 mm, con perforaciones y escalerillas c/2 hiladas. Mortero de pega de dosificación 1:3, cuyo espesor es de 15 mm aproximadamente, de marca TOPEX elaborado por Parex Chile.</p>	

Anexo 8. Determinación T_{im} y Demanda de energía bajo régimen estacionario para el mes de enero del modelo CMPN.

SUPERF. EDIF		50,5	m2			
ALTURA VIV		2,3	m2		ΔT (°C)	6,1
VOLUMEN		116,15	m3			
(1/Rse) = he		20,0	W			
Tasa de renovación N		2,0	h ⁻¹			
Horas de calefacción día		24,0	h			
Temp. de calefacción		22	°C			
Mes	1	31	días/mes			
GANANCIAS INTERNAS		100	Wh/m2 día			
GANANCIAS INTERNAS TOTALES						210,4
	ÁREA m ²	U W/m ² °C	RADIACIÓN INCIDENTE MJ/m2 día	Factor solar	Factor reducción solar o de sombra	W
VENTANAS N	4,52	3,6	8,6	0,85	1	383,3
VENTANAS S	1,44	3,6	10,2	0,85	1	144,5
VENTANAS E	1,00	3,6	19,0	0,85	1	187,2
VENTANAS O	0,00	3,6	19,0	0,85	1	0,0
GANANCIAS ELEMENTOS VIDRIADOS						714,9
	ÁREA m2	U W/m2 °C	RADIACIÓN INCIDENTE MJ/m2 día	Coefficiente de Absorción	Factor reducción solar o de sombra	W
MUROS N	10,94	0,6	8,6	0,75	0,8	19,6
PUERTA N	0,00	1,2	8,6	0,75	0,8	0,0
MUROS S	12,82	0,6	10,2	0,75	0,8	27,2
PUERTA S	1,40	1,2	10,2	0,75	0,8	5,9
MUROS E	16,59	0,6	19,0	0,75	0,8	65,8
PUERTA E	1,40	1,2	19,0	0,75	0,8	11,1
MUROS O	17,59	0,6	19,0	0,75	0,8	69,7
PUERTA O	1,70	1,2	19,0	0,75	0,8	13,5
CIELO	50,50	0,38	28,5	1,00	0,1	31,7
GANANCIAS ELEMENTOS OPACOS						244,5
	ÁREA m ²	U W/m ² °C				W/°C
VENTANAS	7,0	3,6				25,1
MUROS	57,9	0,6				34,8
PUERTAS	4,5	1,2				5,4
CIELO	50,50	0,38				19,2
	L (m)	K _i (W/m K)				
PISO	28,46	1				28,5
PERDIDAS TOTALES POR TRANSMISIÓN (Qt)/ΔT				W/°C		112,9
PERDIDAS POR RENOVACIÓN DE AIRE (Qv)ΔT				W/°C		79,0
PERDIDAS TOTALES (Qt + Qv)/ΔT				W/°C		191,8
PERDIDAS TOTALES MES				k W h / m2 mes		2,8
GANANCIAS TOTALES (Pcv + Pco)				W		1170
GANANCIA TOTAL MES				k W h / m2 mes		17,2
DEMANDA DE ENERGÍA CALEFACCIÓN MENSUAL				k W h / m2 mes		-14,4
DIFERENCIA DE TEMPERATURA					Δ T (°C)	6,1
TEMPERATURA EXTERIOR MEDIA					(°C)	21,0
TEMPERATURA INTERIOR				ΔT + Tem		27,1

Anexo 9. Ejemplos determinación de precio unitarios para sistema EIFS según manual ONDAC

Tabique Pro-Muro (E.I.F.S)

TABIQUE PRO-MURO (E.I.F.S.).

ProMuro es un sistema de revestimiento exterior que incorpora una capa de poliestireno expandido adherida al muro y revestida con una malla de fibra de vidrio dentro de un mortero delgado elastomérico. El todo viene recubierto con un revestimiento texturizado elastomérico con color incorporado. Sistemas de este tipo se llaman genéricamente EIFS (Exterior Insulation and Finish System) porque parten del muro en bruto y lo dejan protegido, aislado y con el acabado final. Utilidad: Para aquellas construcciones nuevas donde se necesite ejecutar un cerramiento exterior con una buena presentación estética.

Actividad: TABIQUE PRO-MURO (E.I.F.S.).

Familia : G. ESTRUCT. DE ACERO Y CERRAJERIA / GA. ESTRUCTURA DE ACERO

Unidad : METRO CUADRADO

Moneda : CLP

Precio Total: 34.536

Componentes	Unidad	Cantidad Unitaria	Precio Unitario	Precio Total
3M PERFIL U 2X3X0,85 ESTRUCTURAL	C/U	1,05000	1.588	1.667
6M PERFIL C 2X4X0,85 ESTRUCTURAL PERFORADO	C/U	0,27800	6.714	1.866
PLACA FIBEROCK 12,5 mm. 1,22 X 2,30 mt.	UNI	0,35600	11.745	4.181
AUTOPERFORANTE CABEZA LENTEJA 8X1 1/4 100 UNIDADES MAMUT	C/U	0,04160	2.765	115
TORNILLO PTA FINA 6X1 ZINC 1000UNI	UNI	0,05000	6.798	340
5CM X 45M CINTA FIBRA VIDRIO, AUTOADHESIVA PARA JUNTURAS DE TABIQUERIA	C/U	0,06220	941	59
1000CC PASTA ADHESIVA PARA CINTA DE FIBRA DE VIDRIO	C/U	0,20000	1.513	303
MASILLA BASE JUNTA (30kg)	Saco	0,22000	7.201	1.584
POLIESTIRENO EXPANDIDO 30X500X1000 MM	UNI	2,00000	326	652
PROPASTA E2 TINETA 30 Kg.	Tineta	0,16700	16.511	2.757
CEMENTO ESPECIAL 42.5KG	UNI	0,07100	2.616	186
MALLA FIBRA VIDRIO 50 MT	UNI	0,04320	70.818	3.059
PROFINISH EN TINETA 34 Kg.	Tineta	0,08800	24.768	2.180
ESQUINERO PVC 2500X10MM BLANCO	UNI	0,06000	1.774	106
VOLCANITERO + 1 AYUD	DIA	0,10000	36.667	3.667
ESTUCADOR	DIA	0,25000	21.667	5.417
JORNALERO	DIA	0,25000	11.667	2.917
LEYES SOCIALES (O.E.)	%	29,00000	-	3.480

SISTEMA E.I.F.S.RHENATEC

23/01/2017

El Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE o EIFS en inglés) califica a un conjunto de soluciones constructivas de acabado y aislamiento multicapa que permite realizar cierres exteriores en construcciones nuevas y renovación de las existentes.

Actividad: SISTEMA E.I.F.S.RHENATEC

Familia : ESTRUCTURA DE ACERO Y CERRAJERIA / ESTRUCTURA DE ACERO

Unidad : Metro Cuadrado

Moneda : CLP

Precio Total: \$12.473

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
RHENACRET RED COAT (BARRERA DE HUMEDAD) 20 KG.	TIN	0,02	48.300	773
POLIESTIRENO EXPANDIDO 30X500X1000 MM AISLAPOL	UNI	0,10	9.916	992
RHENACRET MURO FIX 25 KG.	UNI	0,20	9.416	1.883
RHENATEC MALLA DE REFUERZO MURO (EIFS) 1,22 MT. X 45,7 MT.	UNI	0,02	38.500	740
RHENATEC ESQUINERO DE PVC CON MALLA (EIFS)	UNI	0,06	3.144	189
RHENATEC PINTURA BASE ESTANDAR (EIFS) 20 KG.	BALD	0,01	23.890	239
RHENATEC PINTURA GRANO MURO FINISH (EIFS) 25 KG.	KIT	0,01	23.890	239
MAESTRO DE PRIMERA	DIA	0,03	29.000	1.000
AYUDANTE CARPINTERO	DIA	0,25	19.000	4.750
LEYES SOCIALES (O.E.)	%	29,00000	0	1.668

Anexo 10. Estrategias de arquitectura bioclimática

Las estrategias de arquitectura bioclimática son todas aquellas tendientes a controlar la variabilidad de la temperatura interior media, es decir, destinadas a disminuir la oscilación térmica al interior de la vivienda conforme las condiciones climáticas reinantes y la temperatura base de confort. Concretamente, serán las estrategias que permitirán regular y controlar las ganancias y pérdidas energéticas en la vivienda a conveniencia, conforme al balance de calor en la vivienda. Ahora bien, es importante recordar que las estrategias tendientes a disminuir los consumos de energía deben ser pensadas en la génesis de los proyectos habitacionales, por tanto, atañe gran responsabilidad a los diseñadores de los proyectos la ideación de los mecanismos de autosuficiencia energética. Lavigne (2011), decía *[...la componente energética presenta la particularidad de atravesar la totalidad del proceso de concepción arquitectónica y de situarse a menudo en la interface entre dispositivos técnicos y dispositivos arquitectónicos...]* Monrroy corrobora esto diciendo que *[... la clave del éxito de la adaptación bioclimática se fundamenta en un mayor esfuerzo en el diseño formal durante las primeras etapas de los proyectos, comenzando por la planificación urbana, obteniendo con ello los mínimos costos ambientales y económicos...]*.

Como las estrategias adoptadas para controlar la variabilidad de la temperatura interior media dependen de las condiciones macro y micro climáticas de cada lugar de estudio, entonces, serán variadas y disímiles las estrategias que se adoptarán para cada zona del país e igualmente para cada localidad. El éxito de las estrategias a adoptar dependerá, básicamente, del consumo de energía primaria final.

Las estrategias de arquitectura bioclimática se pueden clasificar de acuerdo a variados aspectos. Sin embargo, se suelen clasificar de acuerdo a si conservan o disipan el calor. De este modo se tienen:

- Estrategias para climas fríos: Corresponde a las estrategias orientadas a la conservación del calor. Es decir, útiles en aquellas zonas en donde la temperatura exterior, durante el transcurso del día, resulta menor que la

temperatura interior y donde el gradiente térmico será significativo en las pérdidas de potencia. En general, aquellas zonas situadas en altura o a altas latitudes presentarán este tipo de condiciones.

- Estrategias para climas cálidos: Corresponde a las estrategias orientadas a la disipación del calor. Es decir, orientadas a zonas en donde la temperatura exterior durante el día suele ser mayor a la temperatura de confort. Estas estrategias también serán distintas cuando se trate de climas cálidos secos o climas cálidos húmedos. En general, corresponden a zonas tropicales, desérticas o con marcada continentalidad.
- Estrategias para climas contrastados. Podría decirse que corresponde a un mix de estrategias asociadas a los puntos anteriores o bien a estrategias que bajo ciertas condiciones periódicas conservan el calor y bajo otras lo disipan. Este tipo de estrategias son útiles para gran parte del territorio nacional, sobre todo de Ovalle al Sur, zonas donde las personas reconocen sufrir de frío en invierno y de calor en verano.

Es complejo detallar cada una de las estrategias correspondientes a la clasificación anterior, dado el gran número de estrategias existentes y a las adopciones posibles que están sujetas. Dado esto, se presentan a continuación una tabla con las estrategias habituales de acuerdo al diseño, construcción e instalaciones en la vivienda.

Planificación de estrategias ambientales		
Proyecto	Conservación del calor	Disipación del calor
Edificio vivienda	Tamaño y forma del edificio vivienda	
	Orientación de cerramientos y vanos	
Espacio exterior	Diseño del espacio exterior	
Construcción	Conservación del calor	Disipación del calor
Cerramientos	Aislamiento térmico	
	Capacidad térmica	Inercia térmica
Revestimientos	Efecto invernadero	Superficie selectiva fría
Huecos	Aislamiento y protección térmica	
	Hermeticidad alta	Ventilación cruzada
	Captación solar	Protección solar
Conductos	Renovación controlada	Renovación nocturna
Instalaciones	Conservación del calor	Disipación del calor
Ventilación	Renovación con recuperación de calor sensible y latente	Renovación nocturna
	Recuperación con bomba de calor	Ventilación forzada
	Fuentes de calor gratuitas	Enfriadores evaporativos
Sistemas solares	Calefacción solar	
Instalaciones térmicas	Calefacción por bombas de calor	Fuentes de frío gratuitas
	Calefacción convencional	Refrigeración convencional
Control y regulación	Domótica aplicada a protección de huecos	
	Domótica aplicada a la ventilación	
	Domótica aplicada a las instalaciones térmicas	

Fuente: Monrroy, M. Manual ICARO.

Anexo 11. Modelos de evaluación económica para alternativas de reacondicionamiento tradicional (alternativa A) y de reacondicionamiento a nivel de edificaciones ULEB (alternativa B)

Evaluación económica de reacondicionamiento tradicional (A) para h=20 años y r=3,5%

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
MA-STGO-VC0%-r3,5%	0,00293	0,00299	0,00304	0,00309	0,00315	0,00321	0,00326	0,00332	0,00338	0,00344	0,00351	0,00357	0,00363	0,0037	0,00377	0,00383	0,0039	0,00397	0,00405	0,00412	0,00419	
r =	3,50%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ahorro kWh		2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	2958,1	
Inversión	-97,76																					
Ahorro \$		8,83065	8,98994	9,1521	9,31719	9,48525	9,65635	9,83054	10,0079	10,1884	10,3722	10,5593	10,7497	10,9436	11,141	11,342	11,5466	11,7549	11,9669	12,1828	12,4025	
suma	-97,76	8,83	8,99	9,15	9,32	9,49	9,66	9,83	10,01	10,19	10,37	10,56	10,75	10,94	11,14	11,34	11,55	11,75	11,97	12,18	12,40	
Acumulado	-97,76	-88,93	-79,94	-70,79	-61,47	-51,98	-42,33	-32,50	-22,49	-12,30	-1,93	8,63	19,38	30,32	41,46	52,81	64,35	76,11	88,07	100,26	112,66	
116,042749	-97,76	8,53203	8,3922	8,25467	8,11939	7,98633	7,85545	7,72671	7,60009	7,47554	7,35303	7,23252	7,114	6,99741	6,88274	6,76994	6,659	6,54987	6,44253	6,33695	6,2331	
VNA	48,75 UF																					
TIR	8,13%																					

Evaluación económica de reacondicionamiento a nivel ULEB (B) para h=20 años y r=3,5%

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
MA-STGO-VC0%-r3,5%	0,00293	0,00299	0,00304	0,00309	0,00315	0,00321	0,00326	0,00332	0,00338	0,00344	0,00351	0,00357	0,00363	0,0037	0,00377	0,00383	0,0039	0,00397	0,00405	0,00412	0,00419	
r =	3,50%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ahorro kWh		5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	5524,45	
Inversión	-290,48																					
Ahorro \$		16,4918	16,7893	17,0922	17,4005	17,7143	18,0339	18,3592	18,6904	19,0275	19,3707	19,7201	20,0759	20,438	20,8067	21,182	21,5641	21,953	22,349	22,7522	23,1626	
suma	-290,48	16,49	16,79	17,09	17,40	17,71	18,03	18,36	18,69	19,03	19,37	19,72	20,08	20,44	20,81	21,18	21,56	21,95	22,35	22,75	23,16	
Acumulado	-290,48	-273,99	-257,20	-240,11	-222,71	-204,99	-186,96	-168,60	-149,91	-130,88	-111,51	-91,79	-71,71	-51,28	-30,47	-9,29	12,28	34,23	56,58	79,33	102,49	
108,811391	-290,48	15,9341	15,673	15,4161	15,1635	14,915	14,6706	14,4302	14,1937	13,9611	13,7323	13,5072	13,2859	13,0681	12,854	12,6433	12,4361	12,2323	12,0319	11,8347	11,6407	
VNA	-16,86 UF																					
TIR	2,89%																					