



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Escuela de Ingenierías Industriales.
Programa de doctorado: ingeniería Mecánica y
Eficiencia Energética.

TESIS DOCTORAL

Evaluación energética comparativa del ciclo de vida en
viviendas sociales y propuesta de optimización para
clima cálido de Argentina.

Autor:

Lucio Augusto Molas.

Director:

Dr. José Manuel Cejudo López.

Co-Director:

Dr. Francisco Fernández Hernández.

Catamarca, febrero de 2024.

Evaluación energética comparativa del ciclo de vida en viviendas sociales y propuesta de optimización para clima cálido de Argentina

Molas, Lucio Augusto

Molas, Lucio Augusto

Evaluación energética comparativa del ciclo de vida en viviendas sociales y propuesta de optimización para clima cálido de Argentina / Lucio Augusto Molas. - 1a edición para el profesor - Catamarca : Editorial Científica Universitaria de la Universidad Nacional de Catamarca, 2024.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-661-491-7

1. Ingeniería Mecánica. I. Título.

CDD 363.583

ISBN 978-987-661-491-7

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723.

E.C.U. 2024

Avda. Belgrano 300 - Pab. Variante I - Planta Alta - Predio Universitario - San Fernando del Valle de Catamarca - 4700 -
Catamarca - República Argentina

Prohibida la reproducción, por cualquier medio mecánico y/o electrónico, total o parcial de este material, sin autorización del autor.

Todos los derechos de autoría quedan reservados por el autor.



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D. LUCIO AUGUSTO MOLAS

Estudiante del programa de doctorado INGENIERÍA MECÁNICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: EVALUACIÓN ENERGÉTICA COMPARATIVA DEL CICLO DE VIDA EN VIVIENDAS SOCIALES Y PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN PARA CLIMA CÁLIDO DE ARGENTINA.

Realizada bajo la tutorización de DR. JOSÉ MANUEL CEJUDO LÓPEZ y dirección de JOSÉ MANUEL CEJUDO LÓPEZ Y FRANCISCO FERNÁNDEZ HERNANDEZ

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 23 de OCTUBRE de 2023

Fdo.: LUCIO AUGUSTO MOLAS GAZQUEZ.	FDO.: DR. JOSÉ MANUEL CEJUDO LOPÉZ.	FDO.: DR. FRANCISCO FERNÁNDEZ HERNÁNDEZ.
Doctorando.	Tutor y Director.	Director.



El Dr. D. José Manuel Cejudo López, Catedrático de Universidad en el Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos de la Universidad de Málaga y el Dr. D. Francisco Fernández Hernández, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos de la Universidad de Málaga,

INFORMAN

Que D. Lucio Augusto Molas, Arquitecto, ha realizado bajo nuestra dirección la tesis doctoral titulada: EVALUACIÓN ENERGÉTICA COMPARATIVA DEL CICLO DE VIDA EN VIVIENDAS SOCIALES Y PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN PARA CLIMA CÁLIDO DE ARGENTINA, que se recoge en la siguiente memoria, cumpliendo todos los requisitos legales para optar al grado de Doctor y, la publicación en coautoría que la avala, no ha sido utilizada en tesis anteriores, por lo que autorizamos su lectura y defensa pública.

Y para que así conste y tenga los efectos oportunos, firmamos el presente documento en Málaga a veintiuno de diciembre de dos mil veintitrés.

Dr. D. José Manuel Cejudo López

Dr. D. Francisco Fernández Hernández

Dedicado a mis padres, Lucio y Casilda.

Agradecimientos.

Deseo expresar mi agradecimiento:

- A mi director José Manuel Cejudo López, por iluminarme el camino para la concreción de esta tesis y por tratarme como un miembro más de su familia durante la estancia en Málaga.
- A mi codirector Francisco Fernández Hernández, por brindar su cálida amistad, valioso conocimiento y permanente apoyo para sortear los obstáculos y llegar al final de este trabajo.
- A la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado, por concederme una beca de estudios para solventar los gastos económicos durante el periodo de estancia en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga. Sin esta ayuda no hubiese podido realizar la tesis doctoral.
- Al personal no docente de la Universidad de Málaga por toda la hospitalidad brindada.
- A los compañeros y amigos de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, Fernando Domínguez Muñoz, Bruno Bueno Unzeta, Antonio Carrillo Andrés, Francisco Román Villatoro Machuca por todo su apoyo.
- A Rafael Assiego de Larriva, por compartir su valiosa experiencia en el tema desarrollado en este trabajo.
- Al Rector de la Universidad Nacional de Catamarca Oscar Arellano, por acompañarme en la gestión de la licencia y los permisos necesarios para realizar el periodo presencial en la Universidad de Málaga.

- Al Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Catamarca Dr. Eduardo de la Orden, por el apoyo permanente para culminar con este trabajo.
- A los compañeros de las Facultades de Ciencias Agrarias y de Tecnología y Ciencias Aplicadas la Universidad Nacional de Catamarca, Juan Arellano, Dr. Ricardo Sánchez Brizuela y Dra. Valle Ortiz, por la permanente motivación y ayuda.
- A las autoridades y compañeros de la Subsecretaria de Ciencias y Tecnología de Catamarca (actual Ministerio de Ciencia e Innovación Tecnología) por darme la oportunidad de investigar el tema abordado en esta tesis.
- A Lorena, mi familia y amigos de toda la vida.

Índice.

Dedicatoria.

Agradecimientos.

PRIMERA PARTE: INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y MÉTODOS.

CAPÍTULO N°1 – INTRODUCCIÓN.	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Problema objeto de la Tesis.....	5
1.2.1 Edificios consumidores de energía contaminante.....	5
1.2.2 El consumo energético en el mundo.....	6
1.2.3 El consumo energético en la Argentina.....	8
1.2.4 El consumo energético en Catamarca.....	10
1.2.5 Impactos ambientales, económicos y sociales.....	11
1.3 Solución propuesta.....	13
1.4 Revisión de trabajos previos.....	14
1.4.1 Etapa de construcción y operación.....	14
1.4.2 Etapa de proyecto.....	17
1.4.3 Validación experimental y análisis de confort térmico.....	17
1.4.4 Evaluación comparativa de ACV en viviendas sociales.....	18
1.5 Objetivos.....	19
1.5.1 Objetivo general.....	20
1.5.2 Objetivos particulares.....	20
1.6 Métodos y fases.....	20
1.6.1 Fase I: Evaluación energético-ambiental de la VSC.....	21
1.6.2 Fase II: Evaluación energético-ambiental de la VSV.....	22
1.6.3 Fase III: Evaluación energético-ambiental de las PMVSC.....	22
1.7 Contenido de la memoria.....	23
1.7.1 Introducción, antecedentes y métodos: capítulos N°1, 2 y 3.....	24
1.7.2 Estudio comparativo de casos: capítulos N°4 y 5.....	24
1.7.3 Propuesta de mejora: capítulo N°6.....	25

1.7.4	Conclusiones: capítulo N°7.....	25
1.8	Resumen y conclusiones.....	25
	Referencias del capítulo N°1.....	27
CAPÍTULO N°2 - PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE VIVIENDA SOCIAL CONTEMPORÁNEA.		33
2.1	Introducción.....	33
2.2	Descripción del proyecto.....	34
2.2.1	Caracterización climática de SFDVDC.....	35
2.2.2	Evolución de la vivienda social en el NOA.....	38
2.2.2.1	La vivienda social vernácula.....	38
2.2.2.2	La vivienda social contemporánea.....	39
2.2.3	Descripción arquitectónica de la VSC.....	41
2.2.3.1	Análisis componentes: función, forma y tecnología.....	41
2.2.4	Descripción energética de la VSC.....	45
2.3	Resultados.....	46
2.3.1	Relevamiento de datos climáticos, ganancias y perfil de uso.....	46
2.3.2	Modelización térmica: modelo inicial.....	49
2.3.2.1	Periodo del 19 al 24 de enero de 2009.....	50
2.3.2.2	Periodo del 15 al 20 de junio de 2008.....	52
2.3.3	Análisis de sensibilidad: modelo mejorado.....	54
2.3.4	Implementación de medidas de mejora.....	55
2.4	Resumen y conclusiones.....	57
	Referencias del capítulo N°2.....	58
CAPÍTULO N°3 - CONCEPTOS Y MÉTODOS.		62
3.1	Introducción.....	62
3.1.1	Método de Análisis de Ciclo de Vida.....	64
3.1.2	Herramientas de cálculo del ACV.....	65
3.2	Proceso para el ACV.....	66
3.2.1	Objetivo y alcance del ACV.....	68
3.2.1.1	El sistema del producto y los límites del sistema.....	69
3.2.1.2	Función, unidad funcional y flujo de referencia.....	73
3.2.1.3	Las categorías y los métodos de análisis.....	74
3.2.2	Análisis del inventario del ACV.....	75
3.2.2.1	Modelización térmica equivalente.....	76
3.2.2.2	Validación del MTE con datos experimentales.....	80
3.2.2.3	Análisis del confort térmico.....	81

3.2.2.4	Caracterización de energía primaria y emisiones de CO ₂	83
3.2.2.5	Cálculo de energía primaria y emisiones de CO ₂	86
3.2.3	Evaluación de impacto del ACV.....	94
3.2.3.1	Balance global y comparación del MTE.....	95
3.2.4	Interpretación del ACV.....	96
3.3	Instrumentos de cálculo del ACV.....	97
3.3.1	Métodos para certificación ambiental de edificios.....	97
3.3.2	Herramienta de cálculo de energía incorporada y emisiones de CO ₂	99
3.3.3	Herramienta de cálculo de energía operativa y emisiones de CO ₂	102
3.3.3.1	Fichero climático.....	103
3.4	Resumen y conclusiones.....	104
	Referencias del capítulo N°3.....	106

SEGUNDA PARTE: ESTUDIO COMPARATIVO DE CASOS.

CAPÍTULO N°4 - EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE VIVIENDA SOCIAL VERNÁCULA. 113

4.1	Introducción.....	113
4.2	Objetivo y alcance del ACV.....	114
4.3	Análisis de inventario del ACV.....	115
4.3.1	Descripción arquitectónica de la VSV.....	115
4.3.1.1	Análisis de componentes: función, forma y tecnología.....	118
4.3.2	Modelización térmica equivalente.....	126
4.3.3	Análisis de confort térmico.....	129
4.3.4	Cálculo de energía primaria y emisiones de CO ₂	133
4.3.4.1	Energía incorporada y operativa.....	133
4.3.4.2	Energía de demolición.....	134
4.3.5	Resultados de energía primaria y emisiones de CO ₂	134
4.4	Evaluación de impacto del ACV.....	135
4.5	Interpretación del ACV.....	138
4.6	Resumen y conclusiones.....	139
	Referencias del capítulo N°4.....	140

CAPÍTULO N°5 - EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE VIVIENDA SOCIAL CONTEMPORÁNEA. 145

5.1	Introducción.....	145
5.2	Análisis de inventario del ACV.....	146
5.2.1	Modelización térmica equivalente.....	147

5.2.1.1	Validación del MTE con datos experimentales.....	150
5.2.2	Análisis del confort térmico.....	152
5.2.3	Cálculo de energía primaria y emisiones de CO ₂	154
5.2.3.1	Energía incorporada y operativa.....	154
5.2.3.2	Energía de demolición.....	155
5.2.4	Resultados de energía primaria y emisiones de CO ₂	155
5.3	Evaluación de impacto del ACV.....	156
5.3.1	Comparación de los MTE.....	158
5.4	Interpretación del ACV.....	164
5.5	Resumen y conclusiones.....	165
	Referencias del capítulo N°5.....	166

TERCERA PARTE: PROPUESTA DE MEJORA.

CAPÍTULO N°6 - EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE PROPUESTAS DE MEJORA DE VIVIENDA SOCIAL CONTEMPORÁNEA. 171

6.1	Introducción.....	171
6.2	Objetivo y alcance del ACV.....	172
6.3	Análisis de inventario del ACV.....	173
6.3.1	Descripción arquitectónica de PMVSC.....	173
6.3.1.1	M1: aislación térmica en envolventes.....	174
6.3.1.2	M2: sombreado de fachada norte.....	175
6.3.1.3	M3: incremento masa térmica en envolventes.....	175
6.3.1.4	M4: ventilación mecánica nocturna.....	176
6.3.2	Modelización térmica equivalente.....	177
6.3.3	Análisis del confort térmico.....	178
6.3.4	Resultados de energía primaria y emisiones de CO ₂	179
6.4	Evaluación de impacto del ACV.....	180
6.5	Interpretación del ACV.....	183
6.6	Resumen y conclusiones.....	185
	Referencias del capítulo N°6.....	186

CUARTA PARTE: CONCLUSIONES.

CAPÍTULO N°7 - CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN. 190

7.1	Introducción.....	190
7.2	Resumen y conclusiones.....	191
7.3	Líneas de trabajo futuras.....	193

7.4	Reflexiones finales.....	194
	Referencias del capítulo N°7.....	195

ANEXOS.

ANEXO A DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LA VSC. 199

A.1	Introducción.....	199
A.2	Componente funcional.....	199
A.3	Componente formal.....	200
A.4	Componente tecnológico.....	200
A.5	Descripción energética.....	202
A.6	Relevamiento de datos experimentales y patrón de uso.....	202
A.7	Modelización térmica: modelo inicial.....	204
A.8	Construcción de medidas de mejora.....	206

ANEXO B DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LA VSV. 210

B.1	Introducción.....	210
B.2	Componente funcional.....	210
B.3	Componente formal.....	211
B.4	Componente tecnológico.....	211

ANEXO C DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE PMVSC. 216

C.1	Introducción.....	216
C.2	Componente tecnológico.....	216

ÍNDICE Y REFERENCIA DE ELEMENTOS GRÁFICOS.

Listado de tablas.....	222
Listado de figuras.....	223

PRIMERA PARTE.

Introducción, antecedentes y métodos.

Capítulo N°1.

Introducción.

1.1. Introducción.

La primera parte de la tesis, está dedicada a la introducción del estudio del impacto ambiental producido por el consumo de energía primaria y emisiones de CO₂ de los edificios, el análisis del proyecto de investigación de la vivienda social contemporánea (VSC), principal antecedente y, los conceptos y métodos necesarios para realizar la evaluación energética y propuestas de eficiencia energética.

En el capítulo N°1, se describe el impacto ambiental debido al consumo de energía primaria y emisiones de dióxido de carbono (CO₂), del sector residencial en el mundo y la República Argentina. En el caso particular, en la provincia de Catamarca se explica cómo las viviendas sociales, construidas por el Instituto Provincial de la Vivienda (IPV), para dar respuestas al déficit habitacional, impactan en el confort y las economías vulnerables de los usuarios, por el diseño deficiente de los cerramientos.

El consumo de energía en los edificios, se produce en los procesos unitarios que integran su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas para la fabricación de materiales, hasta el tratamiento final en la planta de residuos, después de la demolición. Estos procesos unitarios utilizan para su funcionamiento los combustibles fósiles, que son responsables directos de las emisiones de CO₂, causantes del efecto invernadero y del calentamiento global. Por un lado, la electricidad necesaria en las fábricas, herramientas de construcción y equipos de climatización, es producida en su mayor parte, mediante la quema de combustibles fósiles en centrales térmicas. No debemos olvidarnos también de los combustibles fósiles empleados en el transporte de materias primas, productos terminados, residuos de demolición y personal de la construcción.

En la mayoría de los países del mundo, los incentivos para la industrialización y el crecimiento económico se concentran en las grandes ciudades. La migración de las áreas

Capítulo N°1.

rurales a las urbanas, es una consecuencia de estas políticas. Además, las desigualdades sociales se concentran en barrios donde los procesos de urbanización se caracterizan por la baja calidad de las edificaciones, dando lugar a viviendas con elevado consumo energético e inadecuados niveles de confort [1].

La ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca (SFDVDC), en el noroeste de la República Argentina, no es la excepción. Las viviendas sociales construidas por el Estado para dar respuesta al déficit habitacional, producen un importante impacto ambiental debido a múltiples factores. El diseño arquitectónico, carente de soluciones pasivas, favorece el disconfort y el alto consumo energético cuando se lo ejecuta. La energía eléctrica que se consume en su mayor parte es importada. La Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico SA (CAMMESA), vende la electricidad a la Empresa de Energía de Catamarca Sociedad Anónima con Participación del Estado Mayoritario (ECSAPEM), generando una fuerte dependencia económica. Los usuarios, con economías vulnerables, sufren el impacto de las tarifas eléctricas en su calidad de vida [46].

Este trabajo, analiza y compara dos tipologías, VSC y vivienda social vernácula (VSV), en la ciudad de SFDVDC. Se aplica el método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), para evaluar la energía primaria, las emisiones de CO₂ y el confort térmico con el objetivo de encontrar la propuesta de mejora de la VSC (PMVSC) y reducir el impacto ambiental.

En el capítulo N°1, se describe el plan de investigación desarrollado en la tesis. En la primera parte, se explicará la problemática global y local del consumo de energía primaria y emisiones de CO₂ del sector residencial, en particular en SFDVDC. En la segunda parte, se plantea cómo la tesis doctoral pretende revertir el problema. A continuación, se menciona el orden del presente capítulo:

- 1.2 Problema objeto de la tesis.
- 1.3 Solución propuesta.
- 1.4 Revisión de trabajos previos.
- 1.5 Objetivos.
- 1.6 Métodos y fases.
- 1.7 Contenido de la memoria.
- 1.8 Resumen y conclusiones.

1.2. Problema objeto de la Tesis.

El problema objeto de la tesis es el impacto ambiental producido por el consumo de energía primaria y las consecuentes emisiones de CO₂ de las viviendas sociales, durante su ciclo de vida. Para evaluar este impacto, primero hay comprender como contaminan los edificios al consumir energía y segundo, como repercute en las escalas global y local.

1.2.1. Edificios consumidores de energía contaminante.

Los edificios tienen un ciclo de vida que comprende tres fases principales: la construcción, operación y demolición. En cada fase, existen procesos unitarios (ver definición en el capítulo N°3), que consumen energía primaria y emiten gases de efecto invernadero. Dentro del conjunto, los procesos unitarios que producen mayor impacto ambiental, son la fabricación de materiales y la climatización, en la fase de construcción y operación respectivamente. La electricidad utilizada en estos procesos, es producida en su mayor parte, mediante la quema de combustibles fósiles en centrales térmicas, que son responsables directos de las emisiones de CO₂, causantes del calentamiento global. A continuación, se explican qué tipo de energía consume un edificio y dónde.

En general, la energía total que consume un edificio en el ciclo de vida, se denomina Energía del Ciclo de Vida (ECV). En particular, la energía que consumen los procesos unitarios se clasifica en: 1) Energía incorporada (EI), 2) Energía operativa (EO) y 3) Energía de demolición (ED).

La energía incorporada, es la utilizada en los procesos unitarios necesarios para la elaboración, colocación, sustitución y transporte de los productos de la construcción. Se incluyen los siguientes procesos unitarios: 1) Extracción de materias primas, 2) Transporte de la materia prima a la fábrica, 3) En fábrica, comprende los procesos involucrados para la elaboración del producto, 4) Transporte de la fábrica hasta el sitio de obra, 5) Colocación del producto en la construcción que puede ser nueva o una renovación y 6) Sustitución de los productos durante el funcionamiento del edificio, por el fin del ciclo de vida [1][2].

La energía incorporada, se la puede dividir en inicial y recurrente. La inicial comprende los procesos unitarios, desde la extracción de materia prima hasta la erección del edificio. La recurrente comprende los procesos de mantenimiento.

Capítulo N°1.

La energía operativa, es la consumida por los sistemas de climatización (calefacción y refrigeración), iluminación, electrodomésticos y agua caliente sanitaria para mantener los espacios y las necesidades sanitarias en condiciones confortables durante el uso del edificio [2][3].

La energía de demolición, es la utilizada en los procesos unitarios correspondientes a la destrucción del edificio: 1) Derribo del edificio, 2) Transporte de los residuos al vertedero o planta recicladora y 3) En vertedero o planta recicladora, comprende los tratamientos que recibe el producto [2].

1.2.2. El consumo energético en el mundo.

Según el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) [4], el consumo de energía final y las emisiones de CO₂ de los edificios, alcanzaron un nivel récord a nivel global en el 2021, superando al pico anterior en el 2019, luego de un descenso en 2020, producto de la pandemia de COVID 19. La demanda de energía operativa, en el 2021 ha crecido en un 4% respecto al 2020, porque los lugares de trabajo comienzan a ser utilizados más intensamente. En el caso de las emisiones de CO₂, crecieron un 5% respecto al 2020.

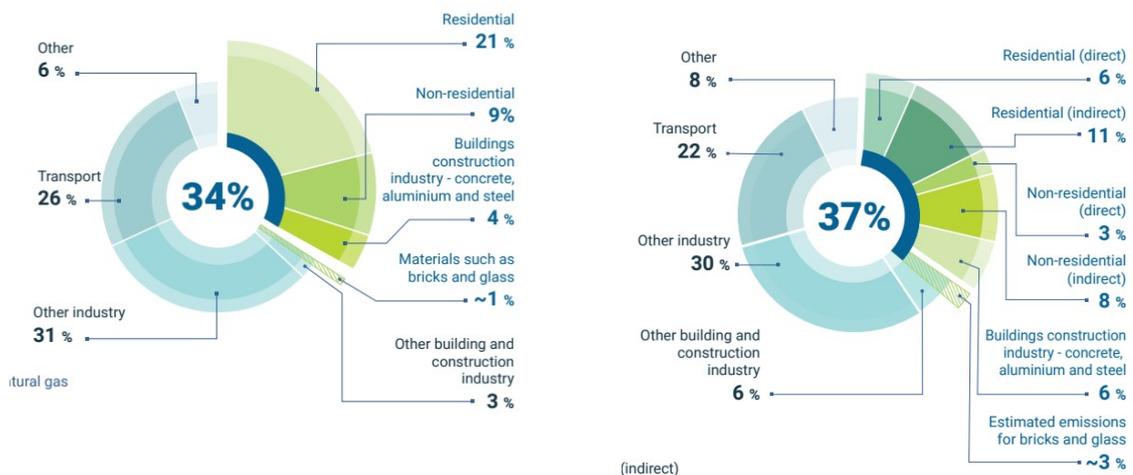


Figura 1.1: Impacto global del consumo de energía final (izquierda) y emisiones de CO₂ (derecha) de los edificios en 2021 [4].

En la figura 1.1, se describe a nivel global, el consumo de energía final y emisiones de CO₂, vinculadas a la operación de edificios y fabricación de materiales. En el consumo de energía final (34%), la energía operativa representa el 30% y la fabricación de materiales (hormigón, acero y aluminio) el 4%. En las emisiones de CO₂ (37%), el 11%

Capítulo N°1.

está relacionado a la generación de electricidad, el 6% a la operación del edificio y el 6% a la fabricación de materiales.

A pesar de los compromisos internacionales, las emisiones continúan creciendo sin limitaciones y pronostican un futuro poco alentador. El Informe sobre la brecha en las emisiones 2020 [5], indica que a pesar de la caída en las emisiones de CO₂ en 2020 a causa del COVID-19, el mundo todavía se dirige a un aumento de temperatura superior a 3° este siglo. Una recuperación sostenible de la pandemia podría reducir hasta un 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero previstas para el 2030 (44GtCO₂ e) y acercar al mundo al logro del objetivo del Acuerdo de París de limitar el calentamiento global entre 1.5° y 2° este siglo.

La arquitectura es responsable directo del creciente aumento de las emisiones de CO₂. Alrededor de 2/3 de las emisiones globales están vinculadas a los hogares particulares, según la contabilidad basada en el consumo. Las posibles acciones para apoyar y permitir un menor consumo de carbono incluyen mejorar la eficiencia energética de las viviendas [5].

En este escenario, la manera de edificar actual, se caracteriza por la extracción voraz e ilimitada de recursos y la generación de desechos, sin respetar los tiempos cíclicos de recuperación del ambiente. El sector de la construcción es el responsable de aproximadamente el 50 % del vertido de residuos y emisiones en todo el mundo [6].

Los edificios, generan un impacto ambiental importante al consumir grandes cantidades de energía para la fabricación de sus componentes, el abastecimiento de las demandas de confort térmico y el tratamiento de los desechos al término de su vida útil. Sus diseños, en la mayoría de los casos carentes de una adaptación climática, son cada vez más dependientes de la energía para su funcionamiento. El PNUMA, considera que son responsables de consumir más de 1/3 de energía a nivel global y, sin embargo, este sector tiene un potencial clave para el logro de la eficiencia energética y la reducción de gases de efecto invernadero [7].

Para complicar aún más las cosas, el consumo energético y emisiones de CO₂ en la edificación, crecen al ritmo del aumento poblacional y sus necesidades de confort. Según estimaciones, en el 2015 la población mundial fue de 7.300 millones y se prevé que en el 2100 llegue a 11.200 millones. Filippín et al. [8] advierte que el rápido crecimiento a nivel mundial del consumo de la energía es preocupante por las dificultades de abastecimiento, el agotamiento de los recursos energéticos y los impactos ambientales.

Bahamón et al. [9], indica que, en el año 2000, la demanda de la población mundial llegó a ser 1.2 veces la biocapacidad de la Tierra. Esto quiere decir que estamos consumiendo más de lo que nuestro planeta está capacitado para ofrecernos.

1.2.3. El consumo energético en la Argentina.

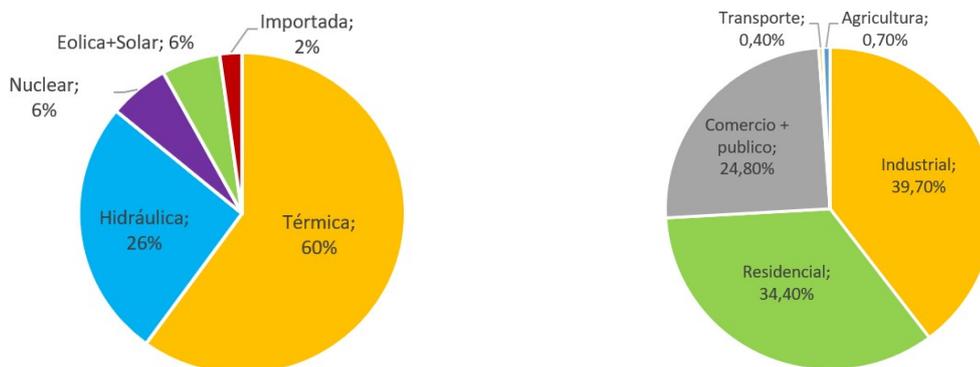


Figura 1.2: Distribución de la generación eléctrica (izquierda) y el consumo eléctrico (derecha) en la Argentina 2019 [7].

La generación de electricidad en Argentina, es altamente contaminante porque depende principalmente de centrales térmicas que funcionan con hidrocarburos, representando el 60% del mix de producción. En este marco, el sector residencial constituye el segundo consumo eléctrico de relevancia en la Argentina con el 34.40% [7]. En la figura 1.2, se describe el mix de generación eléctrica y la distribución del consumo en los principales usos finales de la electricidad.

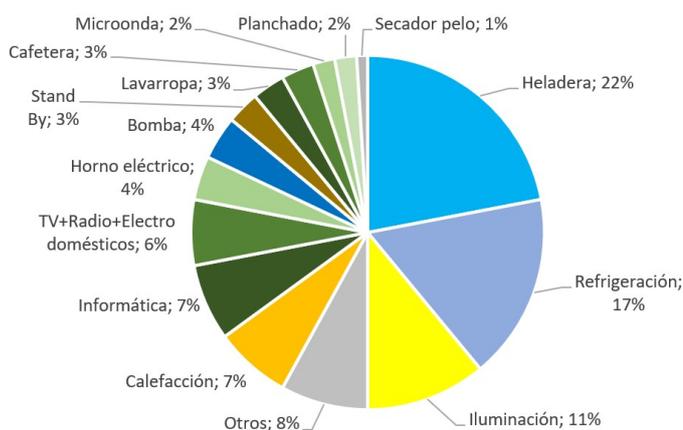


Figura 1.3: Consumo eléctrico residencial de CABA y GBA [7].

Capítulo N°1.

El consumo de los artefactos eléctricos, resultante de la auditoria energética de 99 viviendas en la región de Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) y Gran Buenos Aires (GBA), da un promedio de 3.91 MWh/año [7]. Es interesante destacar que el consumo de la heladera y la refrigeración constituyen el 39% del consumo total. En la figura 1.3, se describe el consumo eléctrico residencial discriminado por artefactos eléctricos.

El consumo energético y emisiones de CO₂, está relacionado directamente a la construcción o ampliación de viviendas, por el aumento demográfico. Durante los últimos años, las emisiones atribuibles al consumo energético residencial evidenciaron un crecimiento acelerado tanto en términos de volumen como de participación sobre el total de emisiones. Como se ilustra en la figura 1.4, durante el periodo 2006-2016 las emisiones pasaron de 27.7 MtCO₂e a 45.6 MtCO₂e, lo que implicó un aumento del 65%, al tiempo que su participación sobre el total prácticamente se duplicó (pasando del 6.5% en 2006 al referido 12.5% en 2016). En esta evolución, el crecimiento del consumo de energía eléctrica es el principal factor explicativo, con un incremento del 111% entre ambos años [10].

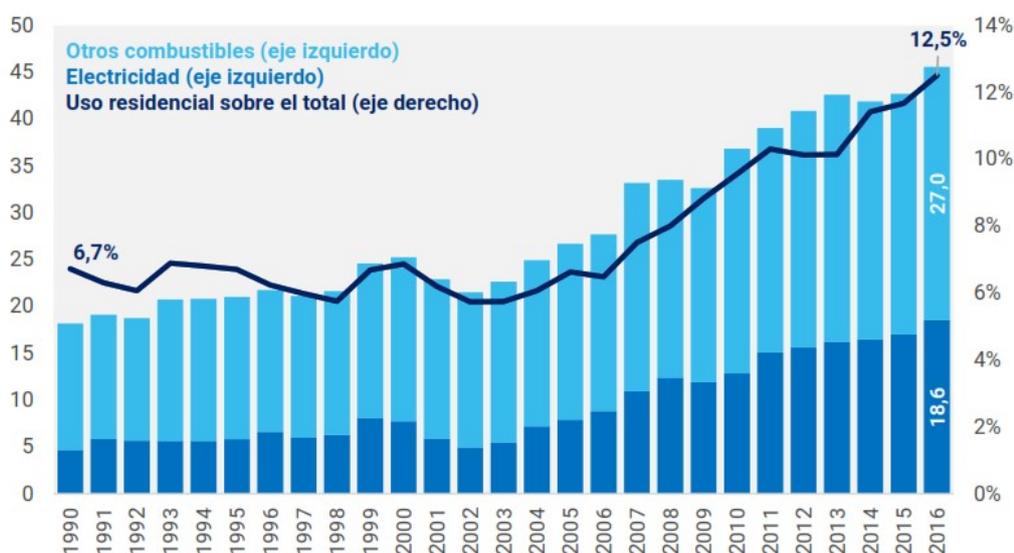


Figura 1.4: Emisiones de GEI de Argentina, por año, en millones de toneladas de CO₂ equivalente y porcentaje del uso residencial sobre el total, 1990-2016 [10].

Para regular el alto consumo energético del sector residencial, las normas del Instituto Argentino de Normalización y Certificación [11][12], establecen valores admisibles de eficiencia energética para la climatización (fase operativa). Lamentablemente, son de cumplimiento voluntario en todo el país salvo en la provincia de Buenos Aires [13]. Tampoco existe un marco regulatorio sobre el consumo de energía en el ciclo de vida de la edificación.

1.2.4. El consumo energético en Catamarca.

La provincia de Catamarca esta ubicada en el noroeste de la argentina, limitando al norte con Salta, al este con Tucumán y Santiago del Estero, al sur este con Córdoba, al sur con La Rioja y al oeste con Chile, cuyo limite esta determinado por la cordillera de los Andes.

En Catamarca el 70% de la superficie es de relieve montañoso, donde se destacan 3 zonas geográficamente diferenciadas: la puna, la cordillera central y las sierras pampeanas. Por otro lado, integra la región semiárida de argentina, donde se distinguen dos tipos de clima: el cálido y árido.

En este contexto geográfico, la provincia presenta una muy desigual distribución de la población, concentrada solo en ellos valles o donde la presencia de agua ha posibilitado el desarrollo de los asentamientos humanos. De acuerdo al Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) [14], la población está distribuida de manera concentrada y dispersa en la provincia de Catamarca. Según datos censales del año 2022, el 43.9% (188.489 habitantes) del total de la población (429.556 habitantes) vive en la ciudad de SFDVDC, ubicada en el departamento capital. Durante el periodo 2010-2022, la población de la provincia de Catamarca creció un 14,4% (61.728 habitantes) y el 46.6% de este incremento (28.786 habitantes), fue en la ciudad capital. Muy distante se encuentra el departamento de Antofagasta de la Sierra, con una población de 1436 habitantes en la región de la puna, que lo convierte en uno de los territorios mas deshabitados del planeta.

El gobierno, por medio del IPV (creado por Ley N° 1670, del 27 de enero de 1955 - Decreto N° 90), acompañó el proceso de crecimiento demográfico respondiendo de manera parcial a la demanda habitacional en la provincia de Catamarca. Desde el año 1955 hasta el 2015, ha entregado 25.599 viviendas sociales, bajo distintos programas. El resultado de este proceso fue una acumulación desproporcionada en el departamento capital con el 55% de las unidades habitacionales (13.963 viviendas) [15].

El suministro de energía eléctrica a Catamarca, se produce por medio del Sistema Interconectado Nacional (SIN). En lo que respecta al consumo energético de las viviendas sociales del IPV en SFDVDC, la información se puede recabar en el proyecto de investigación, desarrollado en el capítulo N°2. Según los resultados del proyecto, el consumo eléctrico registrado en la fase operativa de la vivienda social tipo IPV es de 51.74 kWh/m²año (1824 kWh/m²), con 35.25 m² de superficie útil, habitada con una

familia de 4 individuos. La demanda de refrigeración es de 73.90 kWh/m² año, valor casi 5 veces por encima del estándar Passivhaus con 15 kWh/m² año [16]. El gas butano, en unidades de 10 kg, se utiliza exclusivamente para la cocción de alimentos por su elevado costo, a razón 6 unidades al año.

Estudios vinculados al consumo de gas en Catamarca, han establecido como promedio anual, 1000 m³ de gas natural, para un hogar de hasta 5 personas. De acuerdo a datos obtenidos en el último censo, solamente el 21% de la población tiene acceso a gas natural y existen 54.000 hogares que usan gas de garrafas y 10.168 hogares que emplean leña o carbón. Además, si consideramos que el valor económico del consumo de energía para calefacción tiene distintos precios, resulta que el servicio de gas envasado en cilindros de 45 kg es 8 veces superior al gas natural y el gas en "garrafa social" es 6 veces más caro que el gas natural. Resultando más gravoso para los sectores de menores recursos que son generalmente los que ocupan una vivienda de interés social. Por otra parte, de acuerdo al informe del sector eléctrico argentino 2005, de un total de 86.007 usuarios de energía eléctrica contabilizados en Catamarca, el 87.4%, corresponde al sector residencial [17].

1.2.5. Impactos ambientales, económicos y sociales.

Los edificios producen un impacto ambiental con el consumo de energía primaria y emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida. En el mundo, el 30-40% de toda la energía primaria se utiliza para los edificios y estos son responsables además del 40-50% de las emisiones de gases de efecto invernadero [2].

Según la Norma IRAM 11603 [18], la provincia de Catamarca se caracteriza por poseer seis zonas bioambientales, desde la muy cálida a 219 msnm en la ciudad de Recreo, hasta la muy fría a 3320 msnm en la villa de Antofagasta de la Sierra, debido al gradiente topográfico ascendente desde Las Salinas hacia la Cordillera de los Andes. En este marco, las viviendas sociales del IPV, son diseñadas y construidas utilizando las mismas variables arquitectónicas (forma, función y tecnología), sin tener en cuenta las características de la zona bioambiental donde se insertan.

El consumo de energía primaria y emisiones de CO₂ de las viviendas IPV es elevado, costoso y contaminante durante el ciclo de vida por varios factores: 1) La energía eléctrica que consumen es importada y producida con combustibles fósiles en centrales térmicas de CAMMESA, 2) Los materiales empleados son industrializados, traídos de grandes distancias y fabricados con elevados consumos de energía incorporada. Además,

Capítulo N°1.

las viviendas sufren importantes ampliaciones cuando están habitadas (ver capítulo N°2), 3) En la etapa operativa se necesitan equipos auxiliares para la climatización debido al deficiente diseño de sus envolventes, repercutiendo en la economía de las familias que las habitan y 4) Durante la construcción y al finalizar su vida útil, los residuos generados son depositados en vertederos, sin ningún tratamiento. En la figura 1.5, se describe el caso de dos barrios de viviendas sociales del IPV, localizados en diferentes climas, con características arquitectónicas similares.



Figura 1.5: Comparación de dos barrios IPV con características arquitectónicas similares localizados en climas distintos: izquierda, SFDVDC (550 msnm) y derecha, Villa de Antofagasta de la Sierra (3320 msnm) [Fotos Lucio A. Molas].



Figura 1.6: Comparación de dos viviendas con características arquitectónicas y climas distintos: izquierda, SFDVDC (550 msnm) y derecha, Villa de Antofagasta de la Sierra (3320 msnm) [Fotos Lucio A. Molas].

Al igual que las zonas bioambientales, la arquitectura vernácula (ver capítulo N°4), no es tomada en cuenta por los arquitectos e ingenieros en el diseño de las viviendas sociales IPV. Por lo general estas tipologías están adaptadas al clima del lugar con estrategias de diseño bioclimáticas. La energía consumida para la fabricación de los materiales es baja

Capítulo N°1.

porque utilizan en su manufactura materias primas próximas al lugar y la elaboración es prácticamente artesanal. En la etapa operativa, los sistemas auxiliares empleados son mínimos porque las envolventes están diseñadas correctamente (tienen una importante inercia térmica) para mantener el confort térmico a lo largo del año. Al final de su vida útil, los materiales son reutilizados en nuevas construcciones, sin consecuencias ambientales. En la figura 1.6, se describe el caso de dos tipologías de viviendas vernáculas, localizadas en diferentes climas, con características arquitectónicas distintas.

Las viviendas del IPV, dependen casi totalmente de la energía eléctrica para su funcionamiento. Sin embargo, la energía eléctrica generada en Catamarca representa solo el 1% de la requerida, por lo tanto, se debe comprar el 99% a la CAMMESA. Esta empresa, a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN), vende la electricidad a Catamarca producida de forma contaminante con el empleo de combustibles fósiles en centrales térmicas. Para dimensionar el impacto ambiental, durante el periodo 2018-2019, en la región noroeste de Argentina (donde se encuentra Catamarca), la producción eléctrica se concentró en turbo gas (56.20%) y turbo vapor (31.60%), que representaron el 88 % del total del consumo (ver capítulo N°3). La matriz energética, se completa con menores porcentajes de biomasa, gas (natural y envasado) y combustibles fósiles. Las energías renovables se están incorporando de a poco.

En algunas ciudades, donde es insuficiente o no llega la red eléctrica (caso de la Villa de Antofagasta de la Sierra), el problema se agrava porque la energía es generada por grupos electrógenos con consumo de combustibles fósiles para su funcionamiento. Otro aspecto no menos importante es el confort térmico, especialmente en el contexto de la precaria situación de las personas que viven en casa sociales, donde muchas funcionan en condición de flotación libre, sin el uso de sistemas de climatización (ver capítulo N° 2). Estos datos muestran la fuerte dependencia energética de la provincia y la importancia de la eficiencia energética y el confort térmico de los usuarios relacionados directamente con el diseño de las viviendas sociales adaptado al clima del lugar.

1.3. Solución propuesta.

En este trabajo, se propone reducir el consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y mejorar el confort térmico durante el ciclo de vida, para la climatización de la vivienda social contemporánea del IPV, en la ciudad de SFDVDC. En primer lugar, se realizará la evaluación energética comparativa de dos escenarios de viviendas sociales tipo, vernácula y contemporánea, para conocer y comparar el impacto ambiental de cada tipología arquitectónica. En segundo lugar, se estudiarán las causas que lo provocan. En

tercer lugar, se identifican los procesos unitarios de mayor relevancia energética. Por último, se realizará un análisis de sensibilidad de la VSC y aplicarán medidas de mejoramiento tendientes a reducir el consumo de energía primaria y de emisiones de CO₂ y mejorar el confort térmico.

1.4. Revisión de trabajos previos.

La búsqueda se orientó a encontrar estudios que apliquen el método del ACV en viviendas sociales para reducir el consumo de energía primaria, las emisiones de CO₂ y mejorar el confort térmico. En primer lugar, interesaba conocer los métodos y herramientas de cálculo para determinar los impactos ambientales y las mejoras tecnológicas necesarias para reducirlo, por medio del análisis de sensibilidad. En segundo lugar, resultaba importante identificar el método de diseño de vivienda social, que integre las estrategias bioclimáticas de la arquitectura vernácula con innovaciones tecnológicas, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en el ciclo de vida. Por último, la búsqueda se enfocó a estudio comparativos de ACV entre viviendas sociales contemporáneas y vernáculas, con indicadores ambientales.

El análisis priorizó los trabajos cercanos al lugar donde se desarrolla la tesis, sin dejar de lado los avances en el Mundo. De acuerdo a los objetivos planteados podemos dividirlos en 5 grupos principales:

1.4.1. Etapa de construcción y operación.

El proyecto "Diseño energético sustentable de vivienda de interés social en Catamarca" [17], desarrollado en el capítulo N°2, es el principal antecedente de la tesis. La importancia del mismo, radica en ser la única VSC construida por el IPV, ubicada en la ciudad de SFDVDC (zona bioambiental cálida IIa de la República Argentina [18]), que fue monitoreada en la fase de uso del ciclo de vida durante 1 año (entre los años 2008 y 2009), en su estado original. Con una superficie construida total de 43 m², el consumo eléctrico de la vivienda fue de 51.74 kWh/m²año (1824 kWh año). Si bien este trabajo no aplica el método de ACV para estimar el consumo de energía y de emisiones de CO₂ en el ciclo de vida; mediante la aplicación del programa de simulación SIMEDIF [19], se determinó y evaluó la energía operativa y se establecieron las mejoras tecnológicas necesarias para reducir las cargas térmicas de verano. Es importante destacar que los resultados de energía operativa fueron validados con datos experimentales. Los estudios demostraron que solo es posible reducir la carga térmica un 21.6% en verano, con las soluciones tecnológicas planteadas (ver capítulo N°2, apartado 2.3.3). Es importante

Capítulo N°1.

destacar que las ganancias internas diarias (iluminación, electrodomésticos y personas) y el perfil de uso fueron utilizados en los modelos térmicos equivalentes (MTE) de las VSC y VSV (ver capítulos N°4 y N°5). Por último, los datos experimentales registrados por los sensores HOBOS, permitieron validar el MTE de la VSC (ver capítulo N°5).

Existe un estudio de ACV en una vivienda social en Argentina. Este es el caso de Filippín et al. [8], que utilizó el método de ACV para estimar la energía incorporada y operativa de una vivienda social compacta de 39.10 m² de superficie útil y localizada en la ciudad de Santa Rosa, (zona bioambiental templada frío IIIa de la República Argentina [18]). Se analizó el consumo de energía total de la vivienda (gas natural y energía eléctrica). En este trabajo los resultados muestran la participación de la energía incorporada y la operativa para satisfacer las necesidades básicas del usuario para un periodo de 34 años (1975-2009). El mejoramiento energético de la envolvente vertical para satisfacer la recomendación de la norma IRAM 11605 [20] pertinente a invierno, significaría aumentar un 5% (de 12 a 17%) la energía incorporada en los componentes tecnológicos más significativos de la vivienda. Este incremento permite reducir un 28% el consumo de energía en calefacción pasando de 234 a 168 kWh/m²año (120 kWh/m² para un edificio de bajo consumo Español). La importancia de este estudio radica en el estudio de la energías incorporada y operativa, durante un periodo determinado, donde la calefacción es la principal prioridad para mantener el confort térmico de 22°C (lo opuesto a la vivienda social IPV en Catamarca).

La evaluación comparativa de ACV de viviendas sociales permite orientar políticas de habitacionales en materia energética. En este marco, Oyarzo et al. [21], empleó el método del ACV. El objetivo principal del trabajo es proyectar viviendas para los diferentes climas de Chile, evaluando los impactos ambientales. Para simular y cuantificar la energía en el ciclo de vida del proyecto, se utiliza el modelo EQUER que incluye las fases (que definen los límites del sistema): 1) Fabricación y transporte, 2) Procesos de construcción y tratamientos de residuos de construcción, 3) Uso, 4) Mantenimiento y 5) Demolición y tratamiento final de residuos. Los residuos durante la construcción se estimaron en 5%. Se consideraron 4 regiones climáticas de estudio y para cada una se definieron tres alternativas de vivienda social: 1) Vivienda de referencia (corresponde a las prácticas de construcción habituales), 2) Vivienda reguladora (según normativa de energía) y 3) Vivienda mejorada (con mejor nivel térmico y ambiental). La unidad funcional es una vivienda social con un nivel satisfactorio de confort para diferentes duraciones: 30, 50, 80 y 100 años. Como no hay una base de datos de inventario de ciclo de vida en Chile o Sudamérica, se adaptó la base de datos ECOINVENT [22]. Para evaluar los impactos ambientales, se utiliza el

método desarrollado por el Instituto Holandés de Ciencias Ambientales (CML) [23], complementado con el método Demanda Acumulada de Energía (DAE). Para determinar la carga de energía para calefacción y enfriamiento, se utilizó en la simulación térmica dinámica el programa COMFIE [24], vinculado a EQUER [25]. El análisis de sensibilidad, se realizó con los espesores de aislamientos, vidrios e infiltración. La vivienda mejorada redujo la carga de calefacción (75 kWh/m² año) un 60% (alta en comparación al estándar de una vivienda pasiva 15 kWh/m² año). Se consiguió un confort térmico aceptable sin necesidad de aire acondicionado utilizando persianas (la transmisión solar se reduce un 80%) y renovaciones (6 vol/h desde las 22 pm hasta las 8 am). El consumo de la energía en la fase de uso es el principal impacto en el ciclo de vida. La carga de calefacción es casi nula en clima cálido como en Antofagasta.

Un aspecto importante en los estudios de ACV es el estudio de los perfiles de uso. Monteiro et al. [26], evaluó de forma comparativa el potencial de mejora de una casa nueva con otra vivienda equivalente existente (25 años) en Coimbra – Portugal, estudiando alternativas de patrones operativos. El alcance incluye las fases de fabricación (producción y transporte de materiales) y operación (calefacción y refrigeración) – mantenimiento. La fase demolición no se tuvo en cuenta por su baja incidencia en el contexto europeo (1-3, 5%). La unidad funcional fue la superficie habitable, con un periodo de vida útil de 50 años. Los flujos de energía del modelo de ciclo de vida fueron determinados por procesos: 1) Energía incorporada: representa la energía primaria en la producción y transporte de materiales y componentes de construcción, 2) Energía mantenimiento: actividades destinadas a preservar características físicas de ambas viviendas en el ciclo de vida y 3) Energía operativa: se simuló 4 patrones de ocupación: 1) OP100 (continuo, regulado por normativa), 2) OPx (intermitente, dinámico), 3) OP25 (25% de energía requerida en OP100) y 4) OP50 (50% de energía requerida en OP100). El cálculo de la energía incorporada se realizó con inventario de componentes de construcción y utilización del programa ECOINVENT 2.2. La energía operativa (servicio) se determinó con el uso del programa EnergyPlus. Los resultados de este trabajo demostraron que la energía operativa es mucho más baja que la incorporada en una casa nueva (con una energía incorporada más alta en relación a la existente). En la etapa de diseño se debe prestar gran atención a los componentes de construcción, ya que la energía incorporada puede representar 3-7 veces la calefacción-refrigeración. Los estudios de análisis de ciclo de vida son muy sensibles a los patrones operacionales (formas diferentes de habitar la casa).

1.4.2. Etapa de proyecto.

Integrar las estrategias pasivas y activas de la arquitectura vernácula y contemporánea en el proceso de diseño de la vivienda social, con la aplicación del método de ACV, permite encontrar las mejores soluciones para reducir el impacto energético - ambiental. Este es el caso de Terrados et al. [27], con la propuesta "Patio 2.12" para el concurso Solar Decathlon 2012 en la ciudad de Madrid - España. Si bien utiliza en parte el método de ACV (solo para la etapa operativa), el diseño arquitectónico de la vivienda se basó en la aplicación de una "idea de proyecto", que integre lo mejor de la arquitectura vernácula mediterránea y las innovaciones tecnológicas para lograr la eficiencia energética. La idea se fundamentó en la integración de dos conceptos "patio y botijo". La vivienda se diseñó como un sistema prefabricado modulado con diferentes mecanismos reguladores del clima y la eficiencia energética. En el patio se utilizaron las siguientes estrategias: 1) Organización espacial: cada habitación se relaciona con el exterior a través del patio y disponen de aberturas en fachadas exteriores e interiores, 2) Los estanques de agua humidifican el aire y dan comodidad psicológica, 3) La envolvente superior del patio es una doble capa (acristalada y sombra). En verano se convierte en un espacio sombreado pero ventilado y en invierno es un invernadero y 4) Enfriamiento activo. En las envolventes (Botijo), se usaron los siguientes mecanismos de regulación térmica: 1) Aislamiento térmico, 2) Mínima infiltración, 3) Inercia térmica, 4) Vidrio de baja emisividad, 5) Sistema de evapotranspiración en fachadas y chimenea solar en techo (ventilación cruzada), 6) Sistema solar fotovoltaico y térmico. Se implementó un sistema de automatización para el control de la climatización, Iluminación, electrodomésticos, hábitos de la casa y calidad del aire. Se definió un patrón de uso para los locales de la vivienda (divididos en días laborables y fin de semana). Para construir y evaluar el modelo térmico de la casa se usó el programa TAS [28]. Los resultados demostraron un diseño coherente que integra la tecnología para la generación de energía solar térmica y fotovoltaica, y no aparecen como agregados, sino como una parte natural de los elementos que componen la vivienda. Por último, se determinó el consumo energético mensual y anual, en función de los hábitos o patrones operativos y el ahorro con el sistema fotovoltaico (se produce 5.5 veces más que la energía que se requiere mensualmente).

1.4.3. Validación experimental y análisis de confort térmico.

Se observa que la mayoría de los estudios de ACV, no realizan la validación con datos experimentales de los MTE para reproducir el comportamiento real de la vivienda. En este sentido, la validez de los resultados de los modelos numéricos, es cuestionable

debido a la incertidumbre de numerosas variables en los modelos térmicos. Omrany et al [29] hizo una revisión de la aplicación del enfoque de la energía del ciclo de vida aplicado a edificios residenciales. Destaca que entre 40 artículos que analizaron 157 casos de edificios residenciales, solo 2 estudios presentaron una validación de los modelos numéricos contra datos experimentales. Otra revisión reciente de ACV de mejoramientos de edificios realizada por Vilches et al [30] muestra una descripción general de la literatura, donde muchos estudios presentan diferentes propuestas de mejora aplicando la metodología de ACV. En este caso, entre 14 artículos solo 1 (Stazi et al [31]) presenta un modelo térmico validado experimentalmente y confort térmico.

La revisión de la literatura sobre la aplicación de métodos de ACV señala un vacío de investigación para la evaluación del confort térmico. La razón principal es que el método se basa en la unidad funcional de 1 metro cuadrado de área útil de vivienda con un nivel de confort térmico estándar y satisfactorio (ver apartado 3.2.1.2 capítulo N°3). Es decir, el cálculo de la energía operativa se basa en fijar las temperaturas de consigna en las zonas térmicas y se supone que se alcanza el confort térmico. Sin embargo, especialmente en el contexto de la situación precaria de las personas que viven en casa sociales, donde muchas funcionan en condiciones de flotación libre, sin el uso de ningún sistema de climatización, esto no es cierto. Este problema fue destacado como una de las principales limitaciones del ACV como herramienta de apoyo para la toma de decisiones por Chau et al [32] en una revisión detallada de ACV de edificios. La misma conclusión es señalada por Toosi et al [33], que destacan que, de 35 artículos en el contexto de una evaluación de mejora con un ACV, el número que analiza la comodidad de los ocupantes es casi insignificante. De acuerdo con esto, Vakalis et al [34], estudiaron las mejoras energéticas de las viviendas sociales existentes para reducir las emisiones de carbono. Sugirieron que, en un proceso de mejora de un edificio, se pueden obtener resultados no deseados si no se evalúa el impacto de las emisiones y la comodidad. Del mismo modo, Ortiz et al [35], afirmaron que las medidas de mejora pueden generar estrés y concluyeron que los edificios, los sistemas de climatización, los ocupantes, la salud y el confort térmico tienen que ser investigados a base de un enfoque integrado. Por lo tanto, se demuestra la importancia de proporcionar un método que pueda evaluar tanto el impacto ambiental como el confort de la ocupación.

1.4.4. Evaluación comparativa de ACV en viviendas sociales.

Para tener una perspectiva amplia de evaluación energético y ambiental de viviendas sociales, la comparación del impacto ambiental es justa si se realiza a través del método de ACV, por medio de indicadores ambientales. En los estudios analizados se observa

que los principales indicadores utilizados son la Demanda Acumulada de Energía (DAE) y el Potencial de Calentamiento Global (PCG). Mediante la aplicación de la DAE, Ramesh et al. [2], presentó una revisión crítica del Análisis de la Energía del Ciclo de Vida (AECV) de edificios residenciales y de oficinas resultante de 73 casos que concluyeron, que la energía operativa representa del 80% al 90% y la energía incorporada es del 10% al 20%. Por otro lado, Macias et al. [36], proporcionaron una evaluación de la energía incorporada y operativa de las viviendas sociales en Ecuador, donde la mayor parte de la energía consumida durante el ciclo de vida corresponde a la etapa operativa con un rango de 81.1% a 97%. En el caso del PCG, Cuellar-Franca et al. [37], muestran los resultados de un estudio de ACV completo para tres tipos comunes de casas del Reino Unido. Los resultados indicaron que alrededor del 90% del PCG proviene del uso. Verdaguer et al [38], identificaron las estrategias de simplificación en ACV aplicadas a viviendas unifamiliares. Concluyeron que el indicador ambiental más significativo para la mitigación del cambio climático (analizado por el 75% de los trabajos seleccionados) es el PCG, evaluado a través de las toneladas equivalentes totales de emisiones de CO₂, que se calcula a partir del consumo de energía (MWh) en toda la vida del edificio.

1.5. Objetivos.

Este trabajo analiza dos viviendas sociales tipo (vernácula y contemporánea) de la ciudad de SFDVDC, en el marco del método de ACV, establecido en la norma UNE-EN ISO 14040 [39]. Se evalúa la energía primaria, emisiones de CO₂ y el confort térmico con el objetivo de determinar la mejor solución tecnológica para reducir el impacto ambiental. La norma UNE-EN ISO 14040 es utilizada en la bibliografía analizada para evaluar el consumo energético de edificios.

Para determinar la energía incorporada y operativa se utilizará la base de datos (tipo BEDEC) y el programa de simulación energética (tipo EnergyPus).

El resultado final, será una propuesta de mejora de la VSC, que reduzca el consumo de energía primaria y de emisiones de CO₂, con un confort térmico aceptable en el ciclo de vida.

Para tener una mejor comprensión de la evaluación de ambas tipologías de viviendas (contemporánea y vernácula) y la propuesta de mejora, se deben responder algunas incertidumbres:

1. ¿En comparación con la VSC, la energía incorporada y operativa es menor en la

VSV por su mejor adaptación al clima?.

2. ¿La disminución del impacto ambiental compromete a los habitantes?.

1.5.1. Objetivo General.

Evaluación comparativa del consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico durante el ciclo de vida en viviendas sociales y propuesta de optimización energética – ambiental en la capital de Catamarca – Argentina.

1.5.2. Objetivos Particulares.

Los objetivos particulares pueden describirse de la siguiente manera:

- 1 Evaluación comparativa del consumo de energía incorporada, emisiones de CO₂ y confort térmico en el ciclo de vida de los elementos constructivos intervinientes en la climatización, para los escenarios de VSV y VSC. Análisis de sensibilidad. Propuesta de optimización energética – ambiental en VSC.
- 2 Evaluación comparativa del consumo de energía operativa, emisiones de CO₂ y confort térmico en el ciclo de vida en la climatización, para los escenarios de VSV y VSC. Análisis de sensibilidad. Propuesta de optimización energética – ambiental en VSC.
- 3 Evaluación comparativa del consumo de energía de demolición, emisiones de CO₂ y confort térmico en el ciclo de vida de los elementos constructivos intervinientes en la climatización, para los escenarios de VSV y VSC. Análisis de sensibilidad. Propuesta de optimización energética – ambiental en VSC.

1.6. Métodos y fases.

La tesis plantea la evaluación energético-ambiental en tres fases de estudio: 1) Vivienda social contemporánea, 2) Vivienda social vernácula y 3) Propuesta de mejora en la VSC. A continuación, se describen cada fase y los métodos utilizados en cada una de ellas.

1.6.1. Fase I: Evaluación energético-ambiental de la VSC.

En esta fase se tomará como caso de estudio la VSC utilizada en el “proyecto de diseño energético sustentable de vivienda de interés social en Catamarca”, descrito en el capítulo N°2.

El consumo de la energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico del ciclo de vida, se estimará por medio de la aplicación del método de ACV. El mismo está planificado en 4 etapas: 1) Definición de objetivo y alcance, 2) Análisis de inventario, 3) Evaluación del impacto y 4) Interpretación. La unidad funcional será el confort térmico por unidad de superficie en un periodo de tiempo establecido. Para comparar los casos de estudio y la propuesta de mejora, utilizaremos el MTE (ver definición capítulo N°3).

Para calcular la energía incorporada, utilizada en la fabricación de materiales (etapa de análisis de inventario), se estudiará los componentes del edificio (cerramientos exteriores, muros interiores, techo y piso) y se realizará la medición de los materiales que los integran. El cálculo de la energía incorporada [MJ], se realizará con programas de bases de datos (por ejemplo, ECOINVENT, SimaPro o BEDEC). Luego en la etapa de evaluación de impacto, se estudiará la participación relativa de la energía incorporada en la energía del ciclo de vida.

Para calcular la energía operativa utilizada en la climatización de la vivienda (etapa de análisis de inventario), seguiremos el siguiente orden: 1) Definición de zonas térmicas del edificio (no se incluyen las zonas no climatizadas: el baño, etc.), 2) Determinación de consignas para refrigeración y calefacción, según normativa [40], 3) Cálculo de ganancias de calor internas: número de personas, luces, electrodomésticos (no se incluye uso de energía de agua caliente, porque no afecta al confort térmico), 4) Estimación del grado ventilación natural, según normativa [40], 5) Construcción de patrones operativos y 6) Cálculo de las cargas de calefacción y refrigeración [MJ]. Existen diferentes programas para el cálculo de demandas de refrigeración y calefacción (por ejemplo, SIMEDIF, EQUER, EnergyPlus). Luego en la etapa de análisis de impacto se analizará la participación relativa de la energía operativa en la energía del ciclo de vida.

Por último, el cálculo de la energía de demolición, utilizada para el desmontaje del edificio, se realiza por medio de búsqueda bibliográfica (con inventarios similares) y trabajo in situ, en los siguientes procesos unitarios: 1) Derribo del edificio, 2) Transporte de residuos a la planta de tratamiento y 3) Disposición final de los residuos.

1.6.2. Fase II: Evaluación energético-ambiental de la VSV.

En esta fase, se identificará una VSV tipo, ubicada en la ciudad de SFDVDC, correspondiente a la zona bioambiental II, establecida en la norma IRAM 11603 [18].

Pastor [41], define a la arquitectura vernácula como aquella que comprende a la vivienda y otras edificaciones producto de la participación comunitaria, que mantiene sistemas constructivos resultado de sus recursos disponibles, que utiliza tecnologías producto del conocimiento colectivo tanto en su concepción como en su modo de ejecutarla, de ahí que no requiera técnicas sofisticadas para construirla, por lo que su resultado volumétrico y sus relaciones espaciales, el color y el detalle, identifican al grupo que la produce y en la que el usuario o la comunidad misma participan activamente.

Mediante la simulación integrada y el uso de los programas específicos, calcularemos y evaluaremos la energía primaria, emisiones de CO₂ y el confort térmico, siguiendo el método de la fase I.

1.6.3. Fase III: Evaluación energético-ambiental de las PMVSC.

En la última fase, se definirán medidas de mejora en la VSC, para reducir el impacto ambiental del ciclo de vida, mediante la utilización de estrategias pasivas y activas. Gaunzin Muller [42], denomina arquitectura ecológica, a la que contiene estrategias pasivas y activas, para mantener el confort térmico en invierno y verano. La casa ecológica, es ante todo una construcción que responde a los requerimientos y las necesidades presentes de los usuarios, y que se anticipa al futuro al prever la evolución de la familia que la habita y el uso que le dará en cada una de las fases de la vida de ésta. Los tres elementos principales son: 1) La integración en el territorio, que implica el estudio del terreno y de su entorno más próximo (por ejemplo, asoleamiento, vientos dominantes, materiales disponibles, análisis de arquitectura vernácula del lugar, etc.), 2) El confort térmico en verano e invierno, se refiere al análisis del microclima y al estudio de los métodos pasivos y activos, para asegurar el confort térmico y la eficiencia energética y 3) Elección sensata de los materiales, contempla el estudio de la energía que consumirán para extraerlo, producirlo, transportarlo y reciclarlo cuando termine su vida útil. Garrido [43], la denomina arquitectura de consumo energético cero, y resulta de la aplicación de 6 estrategias de diseño: 1) Autorregulación térmica, debido tan solo a su diseño, 2) Durante el día, todas sus estancias se iluminan adecuadamente con la radiación solar, 3) Disminuir al máximo las pérdidas energéticas, asegurando una

determinada inercia térmica, 4) Menor necesidad posible de mantenimiento, 5) Reducir al máximo la cantidad de artefactos consumidores de energía y 6) Educar a los usuarios del edificio para que satisfagan sus necesidades con el menor consumo energético posible.

Definidas las mejoras, se aplicará el método de ACV para determinar la energía primaria, emisiones de CO₂ y el confort térmico. En la etapa evaluación del impacto, las PMVSC serán analizadas y comparadas con el modelo base de la VSC y la VSV.

1.7. Contenido de la memoria.

La tesis doctoral consistirá en un trabajo original de investigación elaborado por el estudiante [44] [45]. En este sentido, el presente trabajo aporta, con respecto a las investigaciones existentes en el campo, los siguientes aspectos:

- a. El método de ACV propuesto permitió la evaluación y reducción de los impactos de ambientales, por medio del modelo térmico equivalente (MTE), que incluyo todos los procesos unitarios del ciclo de vida de las viviendas sociales para el clima cálido en Argentina.
- b. Se incorpora al ACV, la validación con datos experimentales del modelo numérico. La mayoría de los estudios de ACV no realizan la validación para reproducir el comportamiento real de la vivienda [29][30].
- c. Luego de la simulación térmica del MTE, se incorpora el análisis del confort térmico, fundamental en contextos de situación precaria, donde las personas viven en viviendas sociales sin sistemas de climatización [32][35].
- d. Los resultados del trabajo facilitan la toma de decisiones para redireccionar las políticas habitacionales.
- e. El interés de los resultados sobre la región en la que se lleva a cabo, que al final tiene un impacto sobre el planeta ya que el cambio climático es un problema de escala mundial.

La figura 1.7, muestra la organización de la tesis en siete capítulos, agrupados en cuatro bloques. A continuación, se describe el contenido de los capítulos.

Capítulo N°1.

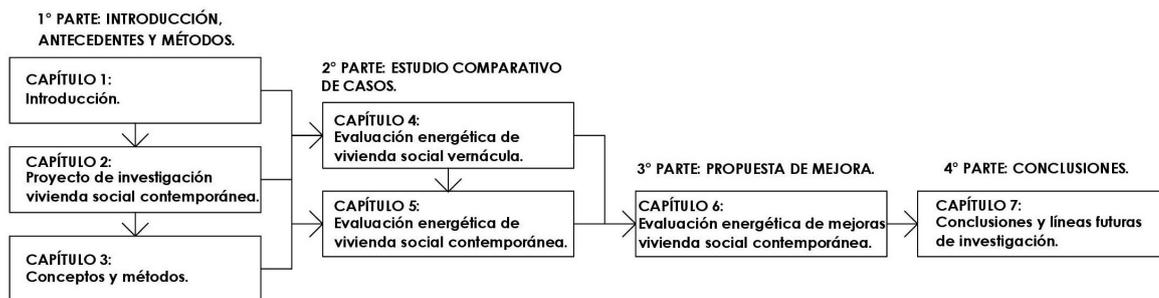


Figura 1.7: Organización de la memoria [Elaboración propia].

1.7.1. Introducción, antecedentes y métodos: capítulos N°1, 2 y 3.

En el capítulo N°1, se describe el problema objeto de la tesis doctoral, referido al impacto ambiental del consumo energético, emisiones de CO₂ y confort térmico del sector residencial en el mundo, la Argentina y Catamarca. Se analizan los antecedentes relacionados al tema en particular el proyecto "diseño energético sustentable de vivienda de interés social en Catamarca". Por último, se comentan los objetivos general y particulares, los métodos, las fases y la memoria.

En el capítulo N°2, se describe la evolución del proyecto denominado "diseño energético sustentable de viviendas de interés social en Catamarca", utilizado como principal antecedente de la tesis. El mismo fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación Argentina (MCYTIP), dentro de la convocatoria de los Proyectos Federales de Innovación Productiva (PFIP) y ejecutado por la Universidad Nacional de Catamarca (UNCA) y la Subsecretaría de Ciencia y Tecnología de Catamarca (SUCYTCA) del gobierno de Catamarca.

En el capítulo N°3, se describen los conceptos fundamentales, los métodos y herramientas de cálculo utilizados para determinar y evaluar el consumo de la energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico del ciclo de vida de las VSC, VSV y PMVSC (fases I, II y III).

1.7.2. Estudio comparativo de casos: capítulos N°4 y 5.

En el capítulo N°4, se identificará una VSV en la ciudad de SFDVDC, de la provincia de Catamarca, representativa por el diseño bioclimático. Se aplicarán los métodos y herramientas de cálculos descritos en el capítulo N°3, para determinar y evaluar el consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico durante el ciclo de vida.

Capítulo N°1.

En el capítulo N°5, se aplicarán los métodos explicados en el capítulo N°3, para evaluar el consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico en la VSC, construida actualmente por el IPV en la ciudad de SFDVDC, departamento capital de la provincia de Catamarca. El caso de estudio será la vivienda del proyecto de investigación descrito en el capítulo N°2, que representa la media del parque inmobiliario. Se aplicarán los métodos y herramientas de cálculos descritos en el capítulo N°3, para determinar y evaluar el consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico durante el ciclo de vida. Por último, se realizará la evaluación y comparación de los MTE de los casos de estudio: vernáculo y contemporáneo.

1.7.3. Propuesta de mejora: capítulo N°6.

En el capítulo N°6, se definirán las PMVSC, para reducir el impacto ambiental del ciclo de vida, incorporando las estrategias de adaptación climática más apropiadas de los casos de estudio. Se aplicarán los métodos y herramientas de cálculo descritos en el capítulo N°3 y se evaluará el consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico de cada propuesta. Por último, se realizará la comparación de los resultados con la VSC y VSV.

1.7.4. Conclusiones: capítulo N°7.

En el capítulo N°7, se describirán las conclusiones principales de la evaluación y comparación energético-ambiental del ciclo de vida de las VSC, VSV y PMVSC. Este trabajo dejará abierta una futura línea de investigación para el diseño y evaluación de la energía del ciclo de vida de una vivienda social, que integre lo mejor de la arquitectura vernácula del lugar y las innovaciones tecnológicas para lograr la eficiencia energética.

1.8. Resumen y conclusiones.

En el capítulo N°1, se analiza el impacto ambiental del consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico del sector residencial a nivel global y local. Las conclusiones son:

1. Los edificios causan un impacto ambiental al consumir energía eléctrica en los procesos unitarios del ciclo de vida. En el contexto argentino, la electricidad es producida en su mayor parte por centrales térmicas, con el empleo de combustibles fósiles que emiten CO₂ a la atmósfera y contribuyen al efecto

invernadero.

2. El consumo energético y emisiones de CO₂ a nivel global del sector residencial, va en un aumento acelerado, debido al incumplimiento de acuerdos políticos internacionales, el acelerado crecimiento demográfico, la construcción del hábitat y el irracional nivel de consumo. Para encaminar de manera controlada el aumento de la temperatura a nivel global por las emisiones de CO₂, es de vital importancia reducir el impacto ambiental, en el ciclo de vida de los edificios y adaptarlos para un escenario futuro por medio de la eficiencia energética.
3. La electricidad es producida en Argentina de forma contaminante. El vertiginoso aumento del consumo eléctrico y emisiones de CO₂, se debió a la construcción de viviendas, sin políticas de eficiencia energética, principalmente con normas regulatorias de cumplimiento obligatorio. En el 2019, el sector residencial fue uno de los principales consumidores de electricidad (34.4%). Las emisiones de CO₂ entre el 2006-2016 crecieron un 111%.
4. La población de la provincia de Catamarca se encuentra concentrada en el departamento Capital (44%). El Estado, por medio del IPV, acompañó el desarrollo demográfico entregando viviendas sociales para cubrir el déficit habitacional. El consumo energético de la vivienda social tipo en la fase operativa, es un 90% eléctrico y un 10% de gas butano.
5. Las viviendas sociales del IPV, generan un importante impacto ambiental, económico y social durante su ciclo de vida porque: 1) Son diseñadas para funcionar con energía eléctrica, producida de forma contaminante, sin tener en cuenta el clima o la arquitectura vernácula del lugar para mejorar la eficiencia energética, 2) Utilizan materiales industrializados costosos y contaminantes, 3) Durante su funcionamiento necesitan obligatoriamente equipos auxiliares para la climatización y 4) Los residuos generados en la construcción y demolición son depositados en vertederos sin tratamiento alguno.
6. La revisión de trabajos previos permitió identificar los siguientes aspectos relacionados al método de ACV: 1) El principal antecedente es el proyecto "Diseño energético sustentable de vivienda de interés social en Catamarca", 2) No hay una base de datos de inventario de ciclo de vida en Sudamérica para cálculo de energía incorporada, 3) Son escasos los resultados de energía operativa que son validados con datos experimentales, 4) Los estudios demuestran un vacío en la evaluación

del impacto relacionados al confort térmico.

Referencias del capítulo N°1.

- [1] Robinson, C., Yan, D., Bouzarovski, S., Zhang, Y., "Energy poverty and thermal comfort in northern urban China: A household-scale typology of infrastructural inequalities", Energy and Buildings 177 (2018) 363-374.
- [2] Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K., "Life cycle energy analysis of buildings: An overview", Energy and Buildings, 42 (2010), 1592-1600.
- [3] Assiego de Larriva, R., 2015. "Eficiencia energética en edificios desde la perspectiva de ciclo de vida. Casos de estudio". Tesis Doctoral, Universidad de Málaga. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/10571/TD_Assiego_de_Larriva.pdf?sequence=1>, acceso diciembre 2023.
- [4] United Nations Environment Programme, 2022. "2022 Global Status Report For Buildings and Construction". Disponible en <https://globalabc.org/sites/default/files/2022-11/FULL%20REPORT_2022%20Buildings-GSR_1.pdf>, acceso diciembre 2023.
- [5] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2020. "Informe sobre la brecha en las emisiones 2020". Disponible en: <<https://www.unep.org/es/emissions-gap-report-2020>>, acceso diciembre 2023.
- [6] L. Garrido, 2009. "Análisis de proyectos de arquitectura sostenible, naturalezas artificiales 2001-2008", ISBN: 978-84-481-6802-5.
- [7] S. Gil, 2021. "Sector residencial. Evaluación del servicio energético de conservación de alimentos. Proyecto cooperación de la Unión Europea". Documento disponible en <https://www.eficienciaenergetica.net.ar/img_publicaciones/04271015_05.SectorResidencial-Conservacindealimentos.pdf>, acceso diciembre 2023.
- [8] Filippín, C., Sipowicz, E., Flores Larsen, S., "Análisis del ciclo de vida de una vivienda auditada en condiciones reales de uso en la región central de la

Argentina", ASADES Vol. 35 (2015), 7-19.

- [9] A. Bahamon, M. Sanjinés, 2008. "*Rematerial. Del desecho a la arquitectura. Parramón arquitectura y diseño*". Parramón Arquitectura y Diseño. ISBN: 978-84-342-3365-2.
- [10] L., Lacaze, R., Zampelli, S., Estayno, H., Braude, 2021. "*Tecnologías para la eficiencia energética residencial y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero*". Ministerio de Desarrollo Productivo de Argentina. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/03/dt_14_-_eficiencia_energetica.pdf>, acceso diciembre 2023.
- [11] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1990. "*Norma 11604. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Calculo y valores límites*".
- [12] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2007. "*Norma 11659-1. Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración*".
- [13] Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 2003. "*Ley 13059, Acondicionamiento térmico en la provincia de Buenos Aires - Argentina*". Disponible en: <<https://docer.com.ar/doc/ecxc58n>>, acceso diciembre 2023.
- [14] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2022. "*Resultados Provisionales. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022*". Disponible en <https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/poblacion/cnphv2022_resultados_provisi_ones.pdf>, acceso diciembre 2023.
- [15] Instituto Provincial de la Vivienda, 2015. "*Informe Viviendas Entregadas. Departamento de Gestión y Programación*". Disponible en <<http://www.ipvcatamarca.gob.ar/inicio/>>, acceso diciembre 2023.
- [16] Wassouf, M.,2016. "*Passivhaus. De la casa pasiva al estándar*". Editorial Gustavo Gili. ISBN:978-84-252-2452-2.
- [17] Molas, L., García, V., Iriarte, A., Correa, E., "*Auditoria térmica y variables del*

confort. Caso de una vivienda del Instituto Provincial de la Vivienda, ciudad de Catamarca”, ASADES Vol. 12 (2008), 121-128.

- [18] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1996. *"Norma 11603. Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina"*.
- [19] Programa SIMEDIF para Windows. *"Manual de uso, INENCO-UNSa-CONICET"*. Disponible en <<https://leb.inenco.unsa.edu.ar/index.php/es/software/simedif-2-0-calculo-termico-de-edificios/>>, acceso diciembre 2023.
- [20] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1996. *"Norma 11605. Acondicionamiento térmico de edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Buenos Aires, Argentina"*.
- [21] Oyarzo, J., Peuportier, B., *"Life cycle assessment model applied to housing in Chile"*, Journal of Cleaner Production, 69 (2014), 109-116.
- [22] Base de Datos Ecoinvent. Disponible en: <www.ecoinvent.org>, acceso diciembre 2023.
- [23] I. Zabalza Bribián, A. Raranda Usón, 2011. *"Ecodiseño en la Edificación"*, Prensas Universitarias de Zaragoza. ISBN 978-84-15274-16-2.
- [24] Peuportier, B., Blanc Sommereux, I., *"Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings"*. Int. J. Sol. Energy 8 (1990), 109-120.
- [25] Peuportier, B., Thiers, S., Guiavarch, A., *"Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment"*. J. Clean. Prod. 39 (2013), 73-78.
- [26] Monteiro, H., Freire, F., *"Comparative life-cycle energy analysis of a new and an existing house: The significance of occupant´s habits, buildings systems and embodied energy"*, Sustainable Cities and Society, 81 (2016), 507-518.
- [27] Terrados, F., Moreno, D., *"Patio and Botijo. Energy strategies architectural integration in Patio 2.12 prototype"*, Energy and Buildings 83 (2014), 70-88.

- [28] B. Bueno, J. Cejudo, A. Carrillo, F. Muñoz, 2007. *"Desarrollo de nuevas herramientas y sistemas para la sostenibilidad en la edificación residencial"*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Málaga.
- [29] Omrany, H., Soebarto, V., Zuo, J., Sharifi, E., Chang, R. *"What leads to variations in the results of life-cycle energy assessment? An evidence-based framework for residential buildings"*, Energy and Built Environment 2 (2021) 392-405.
- [30] Vilches, A., García-Martínez, A., Sánchez-Montañes, B. *"Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review"*, Energy and Buildings 135 (2017) 286-301.
- [31] Stazi, F., Veglio, A., Di Perna, C., Munafo, P., *"Retrofitting using a dynamic envelope to ensure thermal comfort, energy savings and low environmental impact in Mediterranean climates"*, Energy and Buildings 54 (2012) 350-362.
- [32] Chau, C.K., Leung, W.Y. Ng., *"A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings"*, Applied Energy 143 (2015) 395-413.
- [33] Toosi, H.A, Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., Aste, N., *"Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review"*, Sustainable Cities and Society 54 (2020) 101992.
- [34] Vakalis, D., Diaz Lozano Patino, E., Opher, T., Touchie, M.F., Burrows, K., MacLean, H.L., Siegel, J.A., *"Quantifying thermal comfort and carbon savings from energy-retrofits in social housing"*, Energy and Buildings 241 (2021) 110950.
- [35] Ortiz, M., Itard, L., Bluysen, P.M., *"Indoor environmental quality related risk factors with energy-efficient retrofitting of housing: A literature review"*, Energy and Buildings 221 (2020) 110102.
- [36] Macias, J., Iturburu, L., Rodriguez, C., Agdas, D., Boero, A., Soriano, G., *"Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador"*, Energy and Buildings 151 (2017) 107-120.

- [37] Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic. A., "Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses", Building and Environment 54 (2012) 86-99.
- [38] Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., García-Martínez, A., "Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments", Building and Environment 103 (2016) 215-227.
- [39] UNE-EN ISO 14040, 2006. "Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marcos de referencia".
- [40] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2004. "Norma 11659-1. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración".
- [41] G. Pastor, 2000. "Vivienda vernácula del noroeste argentino. El caso de la vivienda rural de Tucumán. Siete aspectos para una definición de la vivienda rural del Valle del Tafí". Gazeta de Antropología. ISSN 0214-7564 1-2.
- [42] D. Gauzin-Muller, 2005. "25 casas ecológicas". Editorial Gustavo Gili. ISBN: 978-84-252-2091-3.
- [43] L. Garrido, 2014. "Arquitectura energía-cero". ISBN: 978-84-15829-54-6.
- [44] Universidad de Málaga, 2022. "Reglamento 4/2022, de la Universidad de Málaga, sobre los estudios de doctorado". Disponible <<https://www.uma.es/doctorado/info/12362/normativadoctorado/>>, acceso diciembre 2023.
- [45] Ministerio de Educación de España, 2011. "Real Decreto 99/2011 de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado". Disponible <<https://www.uma.es/doctorado/info/12362/normativadoctorado/>>, acceso diciembre 2023.
- [46] Diario digital Catamarca radio y tv, 2019. "Lucía anuncio subsidios para paliar la crisis energética". Disponible <<https://catamarcartv.com/lucia-anuncio-subsidios-para-paliar-la-crisis-energetica/>>, acceso diciembre 2023.

Capítulo N°2.

Proyecto de investigación de vivienda social contemporánea.

2.1. Introducción.

En el capítulo N°2, se describen los resultados del proyecto de investigación denominado "Diseño energético sustentable de vivienda de interés social en Catamarca", realizado entre la Universidad Nacional de Catamarca (UNCA) y la Subsecretaría de Ciencia y Tecnología de Catamarca (SUCYTCA), durante el periodo 2008 y 2018 y localizado en la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca (SFDVDC), provincia de Catamarca, República Argentina. Este trabajo constituye el principal antecedente de la tesis doctoral.

En el capítulo N°1, se abordó el impacto ambiental generado por el consumo energético y emisiones de CO₂, durante el ciclo de vida del sector residencial en el mundo, en la Argentina y en Catamarca. Si bien, la situación actual no es para nada alentadora, por el nivel de emisiones de CO₂ debido a la producción de electricidad y al alto consumo energético de las viviendas sociales por el deficiente diseño de los cerramientos, la eficiencia energética constituye una poderosa herramienta para revertir esta tendencia en el futuro.

El proyecto de investigación fue concebido para analizar, entender y encontrar soluciones al impacto ambiental, producido por el consumo de energía primaria y emisiones de CO₂. Básicamente, el objetivo principal consistió en evaluar el consumo de la energía operativa de una vivienda social tipo, construida por el Instituto Provincial de la Vivienda (IPV), en la ciudad de SFDVDC y, determinar las mejoras tecnológicas para reducirlo. La metodología utilizada fue: 1) Se realizó la auditoría energética durante 1 año, con el relevamiento de la temperatura media interna y externa, el patrón operativo, las ganancias internas y el consumo de electricidad y gas, 2) La simulación y explotación del modelo térmico base con el programa SIMEDIF, permitió determinar las demandas de climatización, 3) El análisis de sensibilidad y definición del modelo térmico mejorado

Capítulo N°2.

permitió reducir las demandas y favorecer el confort y la eficiencia energética y 4) Se concretó la construcción de las propuestas de mejora. En los capítulos N°4, 5 y 6 utilizaremos los datos de la auditoría, para la simulación y validación del modelo térmico equivalente (MTE).

En el capítulo N°2, se describe el proyecto de investigación desarrollado en Catamarca, el clima donde se inserta y los principales resultados en un periodo comprendido de 10 años (2008-2018). También se comenta la evolución de la vivienda social en el NOA y las características de la VSC, utilizada en el capítulo N°5 como caso de estudio. A continuación, se menciona el orden del presente capítulo:

2.2 Descripción del proyecto.

2.2.1 Caracterización climática de SFDVDC.

2.2.2 Evolución de la vivienda social en el NOA.

2.2.3 Descripción arquitectónica de la VSC.

2.2.4 Descripción energética de la VSC.

2.3 Resultados.

2.3.1 Relevamiento de datos climáticos, ganancias y perfil de uso.

2.3.2 Modelización térmica: modelo inicial.

2.3.3 Análisis de sensibilidad: modelo mejorado.

2.3.4 Implementación de medidas de mejora.

2.4 Resumen y conclusiones.

2.2. Descripción del proyecto.

El IPV [1], organismo dependiente de la Secretaría de Vivienda y Desarrollo Urbano (SVYDU) de Catamarca, está construyendo masivamente viviendas de interés social en toda la provincia de Catamarca, República Argentina, sin criterios bioclimáticos o patrones de uso que ayuden a controlar el consumo de energía operativa, impactando negativamente en el ambiente a nivel local y global.

El objetivo principal del proyecto denominado "Diseño energético sustentable de vivienda de interés social en Catamarca", es estudiar el comportamiento térmico y proponer soluciones tecnológicas en una vivienda de interés social construida por el IPV, para mejorar el confort y reducir las cargas térmicas de refrigeración y calefacción. Los objetivos específicos son: 1) Evaluar el comportamiento térmico global y el consumo energético, 2) Mejorar el modelo inicial por medio de soluciones tecnológicas que

contribuyan a optimizar la habitabilidad y el ahorro energético y 3) Construir las soluciones tecnológicas definidas en el modelo mejorado.

El proyecto comenzó a ser ejecutado en el año 2008, por la UNCA, mediante la auditoría energética de una vivienda social del IPV, ubicada en la ciudad de SFDVDC. Los primeros resultados demostraron que cuando las condiciones climáticas exteriores son más rigurosas (temperatura y radiación solar), la respuesta del diseño de su envolvente es insuficiente para mantener los rangos de confort térmico establecidos en el interior y como consecuencia de ello, demanda mayor cantidad de energía para su acondicionamiento [2][3].

En el año 2008, la SUCYTCA (actualmente denominada Ministerio de Ciencia e Innovación Tecnológica), presenta el proyecto a la convocatoria nacional del programa denominado "proyectos federales de innovación productiva", del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación. El proyecto es aprobado en las diferentes etapas de evaluación por parte del Comité para la Evaluación [4].

En julio de 2012, se realizó la simulación térmica con el programa SIMEDIF [5], de la vivienda original IPV (sin ampliación), utilizando los datos meteorológicos de la auditoría realizada con la UNCA, entre los años 2008 y 2009. Se determina el modelo inicial de comportamiento térmico. Posteriormente se diseñan las mejoras tecnológicas posibles para favorecer el confort térmico y ahorro energético.

Las mejoras tecnológicas propuestas en las envolventes se construyen en dos etapas: 1) Envolvente superior: diciembre de 2012 y 2) Envolventes verticales: junio - agosto de 2014. En marzo de 2016, se instala un calefón solar para uso sanitario con el objetivo de reducir el consumo de electricidad para calentar agua en baño y cocina. El proyecto siguió vigente hasta principios del 2018, con un acompañamiento social.

El doctorando fue el director del proyecto de investigación. Durante el periodo 2008 - 2018, trabajo en la SUCYTCA y la UNCA, participando en las etapas de formulación, aprobación y ejecución del proyecto.

2.2.1. Caracterización climática de SFDVDC.

La provincia de Catamarca se destaca por poseer seis zonas bioambientales, desde la muy cálida, a 219 msnm (ciudad de Recreo) hasta la muy fría a 3320 msnm (villa de Antofagasta de la Sierra), debido al gradiente topográfico ascendente desde Las Salinas

Capítulo N°2.

hacia la Cordillera de los Andes. La ciudad de SFDVDC, ubicada en el departamento capital, se encuentra en la zona bioambiental IIa cálida, a 550 msnm con coordenadas geográficas, latitud: 28°27´Sur y longitud: 65°46´Oeste [6][7]. En la figura 2.1, se describe la ubicación las zonas bioclimáticas de Argentina, Catamarca y capital.

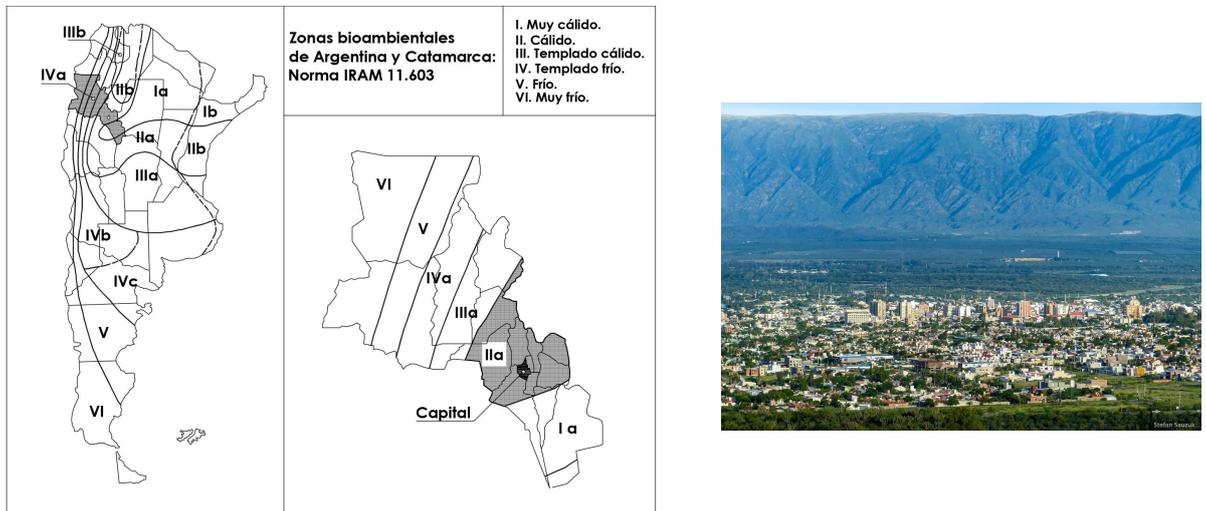


Figura 2.1: Izquierda: zonas bioambientales de la Argentina y localización de Catamarca. Centro: zonas bioambientales en Catamarca y Capital [Elaboración propia]. Derecha: imagen de la ciudad de SFDVDC [Foto Lucio A. Molas].

El registro de las variables meteorológicas horarias en la provincia de Catamarca (radiación, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento), actualmente se realiza de manera incompleta, por medio de estaciones que funcionan sin un seguimiento y mantenimiento periódico. El poco interés por parte del Estado para recabar datos climáticos, se debe a varios factores: 1) Falta de proyectos de desarrollo que demanden los datos, 2) Dificultad de acceso por la topografía, 3) Escasa conectividad de internet y 4) Disponibilidad de recursos, principalmente económicos.

En la ciudad de SFDVDC, existe una estación meteorológica ubicada en el Centro Administrativo del Poder Ejecutivo (CAPE) [8]. Cercano a la Capital, podemos considerar las estaciones del Aeropuerto Catamarca Felipe Varela (ACFV) [9] y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) [10], ambas ubicadas en el departamento Valle Viejo.

En el caso particular del proyecto de investigación ubicado en SFDVDC, se utilizaron los datos de temperatura y radiación sobre superficie horizontal de la estación meteorológica del INTA (distante a 10 km respectivamente de la vivienda IPV). Se tomo

Capítulo N°2.

esta decisión porque la estación meteorológica de la Capital no disponía de datos de radiación sobre superficie horizontal.

Al no disponer de registros climáticos en un periodo de 10 años en las estaciones meteorológicas de Capital y Valle Viejo, se tomó la decisión de realizar el cálculo con el programa Meteonorm [11], para crear el fichero climático, necesario para las simulaciones de los MTE (ver capítulos N°4, 5 y 6). La tabla 2.1, resume los valores estivales e invernales de temperaturas medias y absolutas, velocidad del viento y radiación solar sobre superficie horizontal de la ciudad de SFDVDC, obtenidos con el programa Meteonorm.

Tabla 2.1. Principales variables climáticas de la ciudad de SFDVDC. Periodos calculados: temperatura y radiación 2010-2020.

Valores anuales	Temperatura	Media máxima	°C	27.6
		Media mínima		12.8
		Media		19.7
	Radiación solar sobre superficie horizontal anual.		kWh/m ²	1880
JULIO	Temperatura	Mínima media	°C	3.3
		Media		11.2
		Máxima media		20.5
		Mínima absoluta		-5.7
		Máxima absoluta		31.6
	Amplitud térmica media.		°C	17.2
	Velocidad media del viento media diaria.		m/s	3.1
	Radiación solar sobre superficie horizontal		kWh/m ²	108
ENERO	Temperatura	Mínima media	°C	20.2
		Media		26.3
		Máxima media		33.7
		Mínima absoluta		13.3
		Máxima absoluta		42.2
	Amplitud térmica		°C	13.5
	Velocidad media del viento		m/s	5.7
	Radiación solar sobre superficie horizontal media diaria.		kWh/m ²	214

2.2.2. Evolución de la vivienda social en el NOA.

El noroeste de la República Argentina, es un área del territorio definida por las características físicas y socioculturales. En este marco, tuvo su aparición y evolución, la vivienda social vernácula. Mas adelante, con el ingreso de la vivienda social contemporánea, se produjo un quiebre que perduró hasta el día de hoy. En la figura 2.2, se muestra la evolución de las VSV y la VSC en el NOA. A continuación, se fundamentará el contexto socio cultural que dio origen a cada tipología.

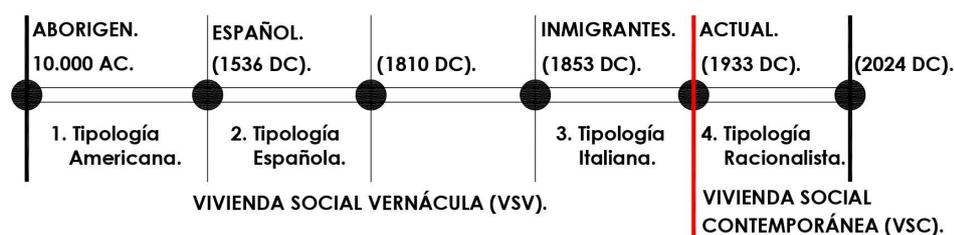


Figura 2.2: Evolución de la VSV y VSC en el NOA [Elaboración propia].

2.2.2.1. La vivienda social vernácula.

La VSV, surge como consecuencia de un proceso histórico y evolutivo, en el contexto del noroeste argentino (NOA), donde se integraron vertientes culturales prehispánicas, coloniales y europeas, para definir las tipologías arquitectónicas. El NOA (anteriormente el antiguo Tucumán), es una región de la República Argentina, integrada por las provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y Santiago del Estero, que conforman una unidad ambiental, con identidad propia. Fue la puerta de entrada de las corrientes migratorias que poblaron el territorio argentino.

Los primeros habitantes entraron al NOA hace 10.000 años. Durante su estancia en los múltiples y variados ambientes, transitaban por dos etapas culturales diferenciadas: precerámica (nómada) y posteriormente agroalfarera (sedentaria). El techo sociocultural en la etapa agroalfarera (medio o integración regional), lo alcanzó la cultura Aguada (250-1200 DC), caracterizada con poblados planificados, habitaciones regulares, cocinas, depósitos, corrales y patios [12].

La conquista y colonización del NOA, se produjo en dos etapas culturales: Imperial INCA (1480 DC) y posteriormente española (1536-1810 DC). Los INCAS imponen el patrón de asentamiento con recinto integrados por construcciones con ángulos rectos, techos a dos aguas y patios privados. Los españoles entraron al NOA con el conquistador Diego de

Capítulo N°2.

Almagro en el año 1536 proveniente del Alto Perú (Cuzco), abriendo de esta manera al camino de importación de la arquitectura hispanoamericana, identificada con asentamientos planificados (cuadrícula) y la vivienda popular sevillana con patio (de origen romano y mudéjar). Esta tipología se mantuvo hasta el siglo XIX.

Por último, a partir de la segunda mitad de siglo XIX y primeras décadas del siglo XX, con las corrientes migratorias europeas (principalmente de origen italiano), se incorpora a la vivienda sevillana regionalizada, el tratamiento estético de la fachada como elemento de configuración urbana y simplificación de la forma.

La VSV del NOA, es el resultado exitoso de la interacción sustentable entre el hombre y el ambiente, caracterizada principalmente por: el patio como espacio unificador y centralizador de la composición, soporte de la vida familiar, trabajo comunitario y regulador climático; los muros gruesos de adobe, piedra o ladrillo y el techo con estructura de madera y diferentes aislaciones. Según Gómez [13], las viviendas se clasifican en: 1) Americana: vivienda de arquitectura prehispánica, aislada en el medio rural y de apoyo a las actividades agroganaderas. Las habitaciones se estructuran alrededor de un patio regular, que no se encuentra totalmente cerrado, 2) Española: vivienda de arquitectura ecléctica definida por elementos que la relacionan con la arquitectura mudéjar, barroca, manierista, neoclásica, etc. La tipología es una adaptación de la vivienda popular de la península ibérica (región de Andalucía y Extremadura), con modificaciones particulares del lugar, que la hacen "criolla". Organización tipológica fuertemente introvertida (pocas aberturas que abren hacia el espacio público). Techos a dos aguas, contruidos con torta de barro o tejas. La actividad doméstica y la organización de los ambientes mantiene su estructuración alrededor de 1 o 2 patios regulares cerrados, rodeado por galerías y un zaguán o hall de recepción y 3) Italiana: vivienda de arquitectura ecléctica determinada por elementos que la relacionan con la arquitectura neoclásica y renacentista. La tipología se caracteriza por el agregado de la fachada urbana a la tipología española regionalizada, que se mantiene invariable y la simplificación morfológica con el techo de una sola inclinación.

2.2.2.2. La vivienda social contemporánea.

La VSC, como la conocemos actualmente, tuvo su origen por tres hechos históricos fundamentales: 1) El proceso migratorio y el déficit habitacional, 2) La política habitacional nacional y 3) La influencia del movimiento moderno. Esta tipología marcó un corte abrupto con la VSV del NOA, por la desvinculación entre el hombre y el ambiente.

Capítulo N°2.

La constitución nacional aprobada en 1853, sentó las bases jurídicas del Estado de la actual República Argentina, como así también fomentó la migración extranjera. Estas políticas estaban destinadas a generar un tejido social rural en los territorios conquistados a los pueblos originarios, con campañas militares que comenzaron a partir de la Independencia Española (1810) y culminaron con la "Conquista del Desierto" (1878-1885).

Consecuencia de este hecho, la Argentina abrió las puertas a los migrantes que no tardaron en llegar (principalmente italianos y españoles). Sin embargo, la falta de políticas rurales tendientes a favorecer la ocupación del territorio, los obligaron a radicarse en las grandes ciudades. En este marco, la Argentina pasó a tener una población de 1.1 millones en 1850, 11.8 millones en 1930, 20 millones en 1960 y 45 millones en 2020. En el año 2001, la población en ciudades era del 89.3% (en comparación con áreas rurales o despobladas). Para el 2015, era del 94% con 42.4 millones, dato que ubica a la Argentina entre los países más urbanizados del mundo [14].

El déficit habitacional surgió por la explosión demográfica producto de los inmigrantes y comenzó necesariamente a formar parte de las políticas públicas del Estado. Fue a partir del gobierno peronista (1946-1955), donde se incorporó la órbita social como exclusiva responsabilidad del Estado, siendo las políticas de vivienda un eje fundamental. En el año 1972, se creó el Fondo Nacional de la Vivienda (FONAVI), para afrontar el déficit habitacional con la construcción de vivienda económica de interés social. En 1977, con Ley Nacional 21.581, se establece que el cuerpo de aplicación de dichos recursos es la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda Nacional (SDUYVN) y plantea que los organismos provinciales deben encargarse de la planificación y realización de programas de vivienda. Catamarca creó en 1955 el IPV, mediante Ley 1670.

La arquitectura de la vivienda social, se apoyó desde la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad en el estilo internacional. También llamado racionalismo o movimiento moderno, se desarrolló en todo el mundo a partir de la Carta de Atenas en 1933 y promovió el funcionalismo, formas geométricas simples y el uso de materiales industriales (acero, hormigón y vidrio). Según Sprovieri [15], en Argentina, el edificio de rentas de 1940, ubicado en el Gran Buenos Aires (GBA), marca el comienzo de este estilo durante el gobierno peronista.

Podemos concluir que la VSC, fue concebida en el marco del estilo racionalista como un producto industrial "prefabricado", de medidas estandarizadas y sin considerar en el

diseño los condicionantes físicos, biológicos y socioculturales del lugar. Fue una solución eficiente para dar respuestas habitacionales en el corto plazo al acelerado crecimiento demográfico, sin evaluar las consecuencias energético-ambientales.

2.2.3. Descripción arquitectónica de la VSC.



Figura 2.3: Ubicación actual de la vivienda social contemporánea. A la izquierda se señala la localización en el tejido regular planificado [Google Earth] y a la derecha la morfología urbana [Foto Lucio A. Molas].

La VSC, fue ejecutada por el IPV [1] en el año 2006 con el Programa Federal de Construcción de Viviendas I, mediante la práctica constructiva actual. Está ubicada en un barrio de baja densidad denominado "Los Periodistas", al norte de la ciudad de SFDVDC. Las coordenadas geográficas son: latitud: 28°25'28.37" Sur y longitud: 65°45'58.55" Oeste. En la figura 2.3, se muestra la ubicación aérea y la morfología urbana.

2.2.3.1. Análisis componentes: función, forma y tecnología.

La organización funcional, está definida por un ingreso semicubierto orientado al norte, que articula el retiro verde con el interior de la vivienda. Desde la cocina comedor, orientado al norte y oeste, podemos acceder a los dos dormitorios principales y al baño. Los dormitorios, orientados al norte y sur, están pegados a la medianera. El paso brinda la posibilidad de una futura ampliación al sur. El contorno de la vivienda orientado al este es colindante con otra vivienda de características similares. La superficie construida total es de 43 m². En la figura 2.4, se muestra la geometría en planta de la VSC. Para mayor detalle ver Anexo A.

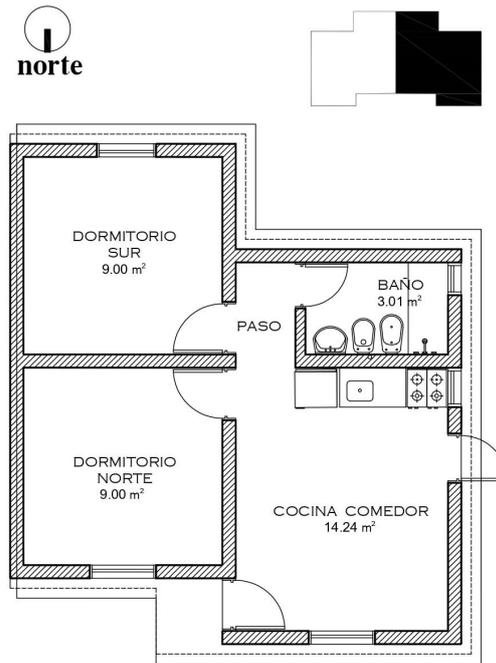


Figura 2.4: Planta general de la VSC [Elaboración propia].

La morfología, es netamente racionalista, definida por los sistemas constructivos utilizados. En ella se destaca los techos a dos aguas y el tanque de reserva. Las fachadas, libre de ornamentos, envuelven la planta compacta. Las alturas oscilan de 2.50 a 3.20 m. En la figura 2.5, se muestra la morfología resultante de la VSC. Para mayor detalle ver Anexo A.

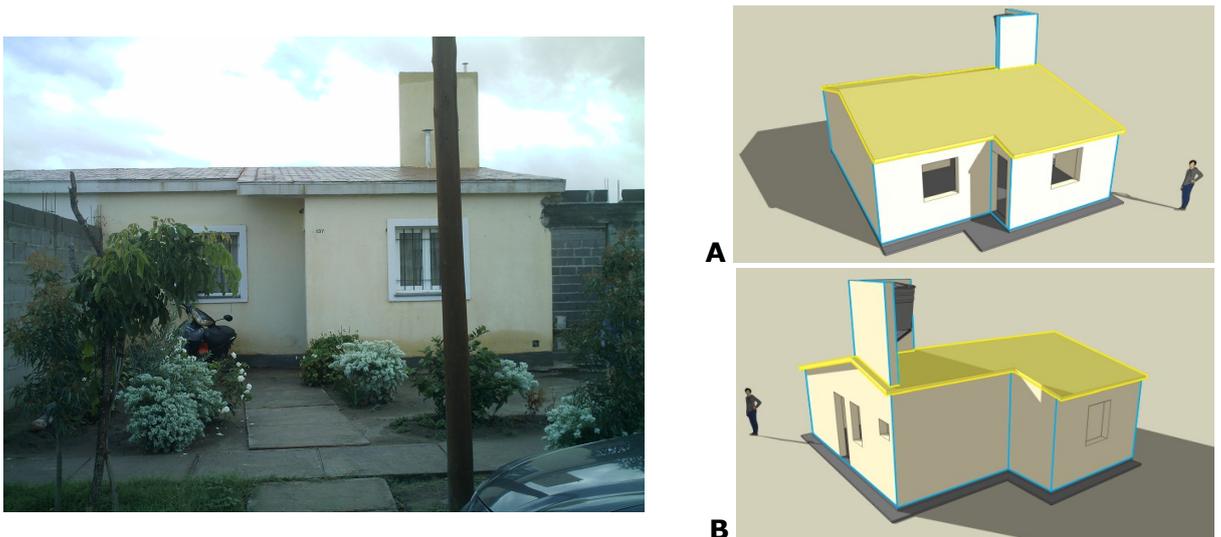


Figura 2.5: Morfología de la VSC. A: volumetría racionalista y B: techo a dos aguas [Elaboración propia]. Fachada principal (izquierda) [Foto Lucio A. Molas].

La tecnología se basa fundamentalmente en el empleo de 3 sistemas constructivos pasivos que limitan el espacio interior del exterior: 1) Envoltente vertical: mampostería

Capítulo N°2.

de bloques de hormigón armado, 2) Envolvente superior: losa de hormigón armado y 3) Envolvente inferior: platea de hormigón armado sobre terreno natural. En la figura 2.6, se muestra una sección de la VSC, con la ubicación de los sistemas constructivos. Para mayor detalle ver Anexo A.

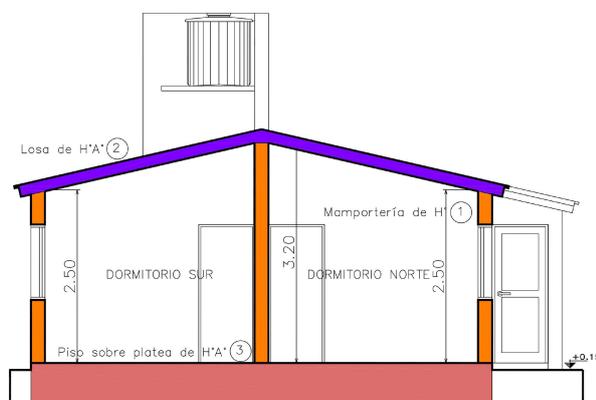


Figura 2.6. Sección de la VSC con la identificación de los sistemas constructivos [Elaboración propia].

Los cerramientos están integradas por los siguientes elementos constructivos: 1) Las envolventes verticales son de dos tipos: a) Muro medianero: ladrillos macizo cerámico de 0.18 x 0.05 x 0.285 m, estucado y b) Muros exteriores e interiores: ladrillos cerámicos portantes huecos de 0.18 x 0.19 x 0.33 m, 2) Envolvente superior: losa de hormigón armado de 0.10 metros, aislante térmico de poliestireno expandido de 0.03 m y terminación de cerámica exterior de 0.02 x 0.20 x 0.20 m y 3) Envolvente inferior: platea de fundación de hormigón armado de 0.10 m, con terminación de mosaico calcáreo de 0.02 x 0.15 x 0.15 m.

Tabla 2.2. Características térmicas de muros y techos.

ENVOLVENTE / PROPIEDADES FÍSICAS.	MURO			TECHO		
	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3
Con masa	si	si	si	si	no	si
K (W/m °C)	1.16	0.49	1.16	0.49	0.041	1.63
Densidad	1800	1200	1800	1200	-	2400
Cp (J/kg °C)	1000	900	1000	900	-	1000
Espesor	0.03	0.18	0.03	0.18	0.03	0.10
Nº puntos	1	2	1	2	-	1

En la tabla 2.2, se describen las propiedades térmicas de las envolventes verticales y superior. Los muros de ladrillo cerámico hueco (que dividen las dos viviendas apareadas)

Capítulo N°2.

se simularon como tabiques con un coeficiente de conducción de $0.14 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Los muros exteriores son de ladrillo cerámico hueco de $0.18 \times 0.19 \times 0.33 \text{ m}$ con revoque grueso fratasado de 0.03 m en ambas caras. No tienen ningún tipo de aislación térmica. El techo es de losa de hormigón armado con aislación térmica de poliestireno expandido de 0.03 m , membrana con terminación de aluminio y cubierta de bovedilla cerámica.

La vivienda dispone de sistemas activos, para el acondicionamiento térmico y sanitario, colocados en la etapa operativa por los usuarios: a) Un equipo compacto de aire acondicionado en el dormitorio sur de 2.91 kW (2500 frigorías) de potencia eléctrica para mejorar el confort térmico y b) Un calentador de agua eléctrico en el baño (en remplazo del calentador a gas entregado con la vivienda). Las aberturas son con marco metálico, sin burletes y con vidrios transparentes de 3 mm .

Para mejorar el confort térmico, la vivienda dispone de las siguientes estrategias de diseño pasivas: a) Verano: ventilación en el dormitorio al norte y cocina comedor (los vientos frecuentes son del noreste), uso de cortinas interiores para evitar la radiación directa y reflejada, control del flujo de calor exterior-interior con la inercia de la pared y b) Invierno: compacidad de la tipología arquitectónica, protección de la cocina comedor con la ubicación del baño al sur y uso de cortinas en ventanas para evitar pérdida o ganancia de calor.

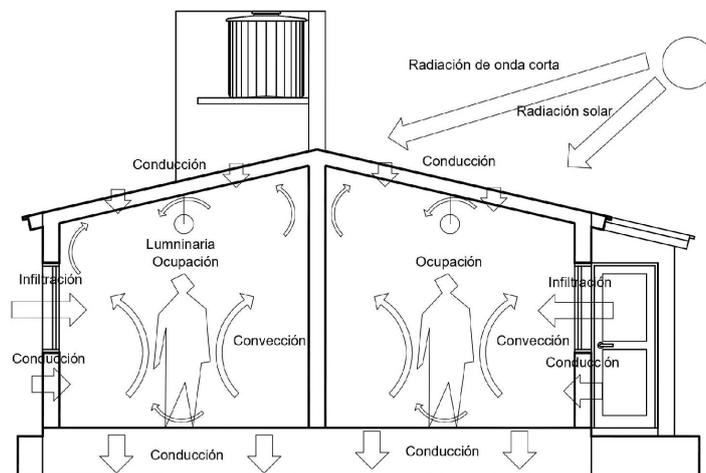


Figura 2.7: Flujo de calor a través de los sistemas constructivos en verano [Elaboración propia].

La transferencia del calor exterior-interior-exterior, se produce de manera combinada de los 3 sistemas constructivos para favorecer el confort térmico en los espacios de la vivienda contemporánea. Durante el día, la radiación (directa y reflejada) calienta las

superficies externas de los cerramientos y por medio de la conducción se transfiere del exterior a interior, debido a la temperatura interior más baja. Por la noche, con la temperatura exterior más baja, el flujo de calor invierte el sentido hacia el exterior. Se busca el confort térmico interior mediante la convección y la regulación de la ventilación. En la figura 2.7, se describe el funcionamiento de los mecanismos de transferencia de calor durante el día y la noche en verano.

2.2.4. Descripción energética de la VSC.

La VSC, fue entregada por el IPV a la beneficiaria, Josefa Castro y sus 3 hijos, el 01/03/2006. En un periodo de 10 años (2008 al 2018), fue ampliada con el sistema constructivo original, de 43 m² a 120 m², representado un incremento del 64% con respecto a la superficie original. En las figuras 2.8 y 2.9, se describe el crecimiento de la VSC.

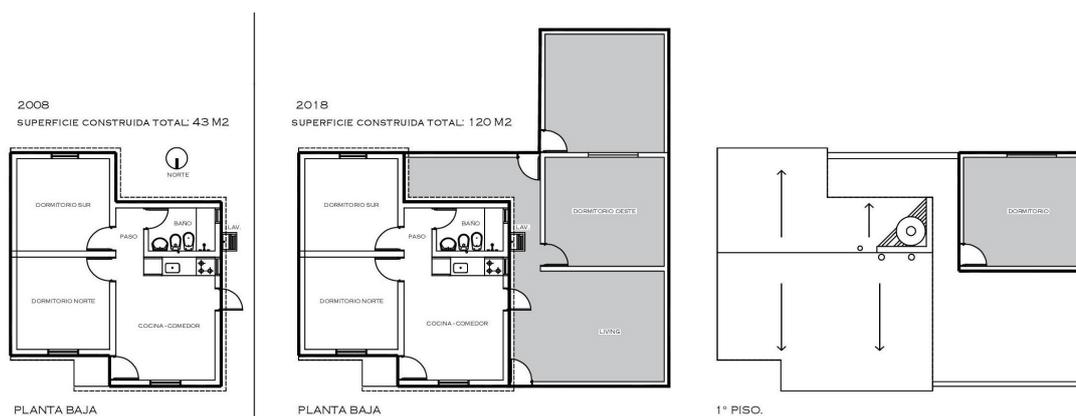


Figura 2.8: Crecimiento de la VSC en un periodo de 10 años. Tipología original año 2008 (izquierda) y modificada en año 2018 (derecha) [Elaboración propia].



Figura 2.9: Imágenes de las ampliaciones de la VSC en un periodo de 10 años. Año 2008 (izquierda) y año 2018 (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].

Capítulo N°2.

La VSC, desde el año 2006, utilizó dos tipos de energía para su funcionamiento: eléctrica y gas butano. A lo largo de la etapa operativa (desde el 2006 hasta el 2018), la evolución del consumo dependió de las siguientes variables: a) Patrones de uso de la familia, b) Potencia de los electrodomésticos y luminarias empleadas, c) Ampliaciones de la vivienda, que incrementaron el consumo energético y d) Soluciones constructivas propias del proyecto de investigación, para reducir las demandas térmicas y mejorar el confort térmico. Para mayor detalle ver Anexo A.

El gas butano envasado en cilindros de 10 kg, se utilizó en promedio de 6 unidades al año durante la etapa operativa, para el funcionamiento de la cocina y el calentador de agua. El calentador de agua a gas (para uso sanitario), que se entregó con la vivienda a los usuarios lo reemplazaron por un calentador eléctrico, para mejorar la economía familiar.

El consumo eléctrico en el año 2009, según las facturas eléctricas de la Empresa de Energía de Catamarca Sociedad Anónima con participación del Estado Mayoritario (EC SAPEM) [16], con la vivienda sin ningún tipo de ampliaciones, fue de 1824 kWh (304 kWh por bimestre), a razón de 51.74 kWh/ m²año. De acuerdo al Ente Nacional Regulador de Electricidad (ENRE) [17], corresponde a un hogar chico que consume 301 a 650 kWh por bimestre.

Las ganancias internas diarias debidas a ocupantes, equipos eléctricos y luces corresponden a una vivienda social tipo del IPV.

2.3. Resultados.

Los resultados comprenden cuatro etapas de desarrollo del proyecto: 1) El relevamiento de datos climáticos y el perfil de uso de las zonas, 2) La modelización térmica, con definición del modelo inicial, 3) El análisis de sensibilidad, con la definición del modelo mejorado y 4) La implementación de medidas de mejora. A continuación, se describirán cada etapa.

2.3.1. Relevamiento de datos climáticos, ganancias y perfil de uso.

La campaña de monitoreo de la VSC se realizó durante un año, desde el 01 de mayo de 2008 hasta el 01 de mayo de 2009, por medio de sensores en los espacios interiores y exteriores. Dentro de este margen de tiempo, se analizaron dos periodos representativos

Capítulo N°2.

de 6 días cada uno, para invierno y verano: 1) 15 al 20/06/08 y 2) 19 al 24/01/09. Para mayor detalle ver Anexo A.

Se utilizaron termohigrómetros para medir temperatura y humedad del aire en pedidos de 15 minutos. En total, se ubicaron seis sensores en las dependencias de la vivienda. En el exterior, se situaron en los porchs norte y sur (HOBO Pendant temperatura data logger) y en el interior, en la cocina - comedor, los dormitorios norte - sur y el baño (HOBO U12 temperatura/RH). El rango de temperatura del aire de $-20 \div 70^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ at 25°C . La humedad relativa del aire está en un rango de $0 \div 95\%$ con una precisión de $\pm 2.5\%$. Durante cada mes se bajaron los datos de los sensores por intermedio de una computadora portátil y posteriormente fueron procesados en planillas de cálculo tipo EXCEL.

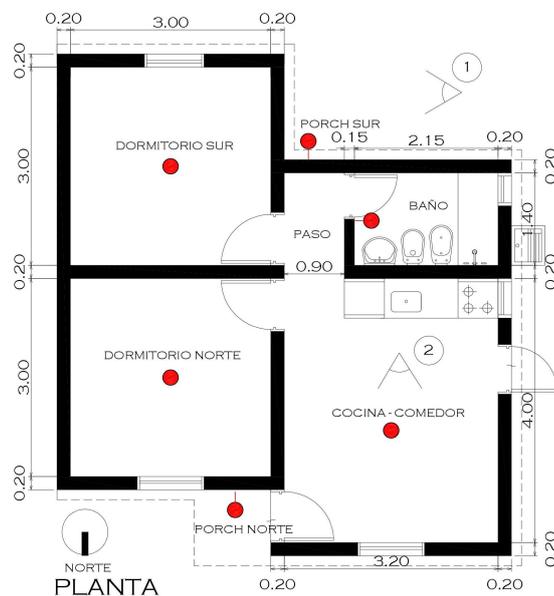


Figura 2.10: Planta de la vivienda con la ubicación de los sensores (señalados con círculo rojo) [Elaboración propia] y dos imágenes (referenciadas a la planta) del porch sur (arriba) y la cocina- comedor (abajo) [Fotos Lucio A. Molas].

En los porchs norte y sur, se dispusieron los sensores en dispositivos diseñados especialmente, que los separaban de la envolvente vertical y superior 0.30 m. Con el objetivo de no alterar los datos, fueron aislados del calor (por radiación de la envolvente y la luminaria) con un plafón de poliestireno expandido perforado para facilitar la ventilación. Dentro de los mismos se construyó un sistema para la fácil manipulación del aparato (para su extracción y colocación) en el momento de la bajada de registros con una computadora portátil. En los locales interiores se diseñaron los dispositivos con los mismos criterios que los exteriores. La diferencia radica en que fueron ubicados en el

Capítulo N°2.

centro de las habitaciones y separados a 0.30 m del techo. En la figura 2.10, se muestra la ubicación de los sensores y los dispositivos para su aislación.

La potencia de las ganancias internas diarias por equipos eléctricos, luces y ocupantes se determinaron según lo establecido por la norma IRAM 11.659 [18]: 1) Equipos eléctricos: una lavadora (300 W), un televisor (300 W), un ordenador (300 W) y una heladera común (310 W), 2) Iluminación LED, con una potencia de 11 W por boca y 3) Usuarios: 4 individuos con una ganancia térmica de 120 W (actividad sentados) y 75 W (actividad dormir). En la tabla 2.3, se describen las potencias de las ganancias internas.

Tabla 2.3. Potencias máximas de las ganancias internas diarias por zonas.

Zonas.	Personas (W).	Iluminación (W).	Equipos (W).
Comedor.	480	44	610
Dormitorio Norte.	150	11	300
Dormitorio sur.	150	11	0

Usamos un horario detallado para cada habitación y día; días laborables, festivos y fines de semana, que corresponde al patrón de uso típico de una vivienda social IPV. En la tabla 2.4, se resumen el perfil de uso de cada zona térmica.

Tabla 2.4. Perfil de uso de las zonas.

Zonas.	Personas.			
	25%	50%	75%	100%
	Días laborables.			
Cocina - comedor.	07-12h (5h).	14-21h (7h).	-	06h. 13h. 22-24h (2h).
Dormitorio norte.	-	24-06h (6h).	-	-
Dormitorio sur.	-	24-06h (6h).	-	-
	Fin de semana y festivos.			
Cocina - comedor.	-	-	-	8-13h (5h). 15-24h (9h).
Dormitorio norte.	-	13-15h (2h). 24-08h (8h).	-	-
Dormitorio sur.	-	13-15h (2h). 24-08h (8h).	-	-

2.3.2. Modelización térmica: modelo inicial.

La simulación se realizó con el programa SIMEDIF para Windows [5], para un periodo de 6 días, en cada uno de estos meses representativos. De acuerdo al monitoreo térmico realizado para un año (2008 - 2009), los meses de enero y junio registraron las temperaturas exteriores e interiores más desfavorables. Dentro de cada mes, se identificaron periodos representativos de 6 días, con las temperaturas más desfavorables, para realizar la simulación.

El programa SIMEDIF, es una herramienta de diseño para: 1) Calcular la temperatura horaria en el interior de los edificios, 2) Analizar su comportamiento frente a diferentes condiciones climáticas, 3) Detectar problemas de falta de confort y 4) Evaluar las distintas alternativas constructivas durante la etapa de diseño. Para calcular las cargas de zonas (calor auxiliar), utiliza el siguiente proceso: 1) Localización espacial y temporal del edificio, 2) División del edificio en zonas: cálculo de volúmenes de cada zona, 3) Conexión entre zonas: identificación de cada elemento de conexión y sus características, 4) Ingreso de zonas, elementos y ganancias de calor, 5) Ingreso de datos meteorológicos externos (temperatura y radiación), 6) Ingreso de temperaturas iniciales y ganancias internas de cada zona y 7) Cálculo y visualización de resultados.

La tabla 2.5, describe las temperaturas medias para cada periodo representativo de invierno y verano. Las zonas fueron designadas teniendo en cuenta la orientación de la tipología en sentido norte-sur. Quedaron de esta forma zonificados al norte, la cocina-comedor y el dormitorio norte y al sur, el dormitorio sur y el baño.

Tabla 2.5. Temperaturas medias registradas para los periodos representativos de invierno y verano.

Estación / Zonas.	Porch norte.	Porch sur.	Cocina – comedor.	Dormitorio sur.	Dormitorio norte.	Baño.
Invierno.	19.7	16.6	19.7	18.3	19.8	18.5
Verano.	30.4	33.2	29.8	28.6	29.7	28.9

La norma IRAM 11659 [18], especifica las potencias de las ganancias internas para electrodomésticos y actividad humana. Utilizando estos valores y el perfil de uso por zonas, se calculó el aporte de los usuarios según la actividad, los electrométricos y las contribuciones de calor por aberturas. El resultado es el siguiente: 1) Cocina - comedor 2486 W, 2) Dormitorio sur 1495 W, 3) Dormitorio norte 1790 W y 4) Baño 2400 W.

Capítulo N°2.

Las consignas de confort térmico, se establecieron según la norma IRAM 11659 [18], en 18-25°C para verano e invierno respectivamente. El caudal constante para invierno y verano es el siguiente: 1) Cocina comedor: 2.20 r/h, 2) Dormitorios: 3.37 r/h y 3) Baño: 9.48 r/h [19].

En las ventanas, se utilizaron valores de transmitancia térmica de 5 W/ m² °C (día y noche). Se utilizaron coeficientes convectivos interiores de 6 y 8 W/ m² °C (para superficies no asoleadas y asoleadas respectivamente) y coeficientes convectivos exteriores de 17 W/ m² °C.

2.3.2.1. Periodo del 19 al 24 de enero de 2009.

En verano, las temperaturas medias exteriores, fluctúan entre 31°C y 38°C, con una media de 34.5°C. Las temperaturas medias interiores oscilan entre 26°C y 31°C, con una media de 29°C (claramente fuera de la zona de confort térmico). La amplitud térmica exterior-interior es de 5.5°C y se observa que no favorece la orientación de las zonas en el comportamiento térmico. Las altas temperaturas interiores se deben a la escasa aislación e inercia térmica de las envolventes.

Las figuras 2.11 y 2.12, representan el comportamiento térmico de la cocina-comedor y el dormitorio norte de la VSC, durante el período de verano del 19 al 24 de enero de 2009. Las líneas continuas grafican la variación de la temperatura media exterior, medida y simulada (eje izquierdo), durante el lapso de los 6 días, donde se destacan tres horas por día (eje horizontal). Las líneas discontinuas representan los parámetros de confort normativos de 18°C y 25°C, para invierno y verano respectivamente. La validación del modelo térmico, se realizó mediante la comparación de las temperaturas medias que se utilizaron en la simulación (fichero climático EPW) y los datos experimentales durante el periodo y con un intervalo de 1 hora, en todas las zonas. Se tuvo en cuenta en la simulación el uso del aire acondicionado en el dormitorio sur porque los usuarios manifestaron en las encuestas, que lo encendían esporádicamente para ahorrar en la factura eléctrica (esta afirmación se corroboró en los datos medidos fuera del parámetro de confort y en la factura eléctrica). Para mayor detalle ver Anexo A.

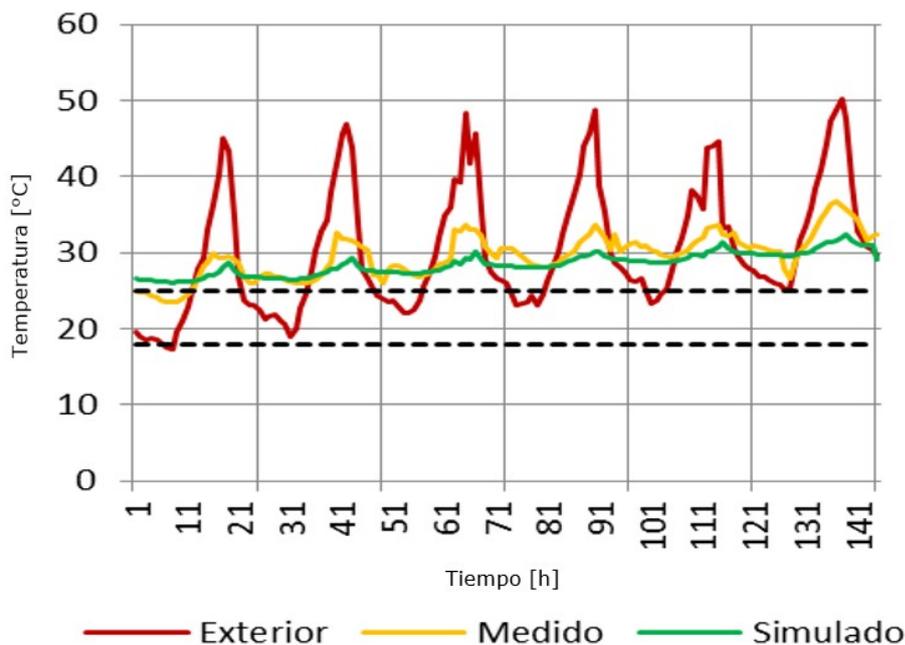


Figura 2.11: Comportamiento térmico la cocina – comedor, del 19 al 24 de enero de 2009 [Elaboración propia].

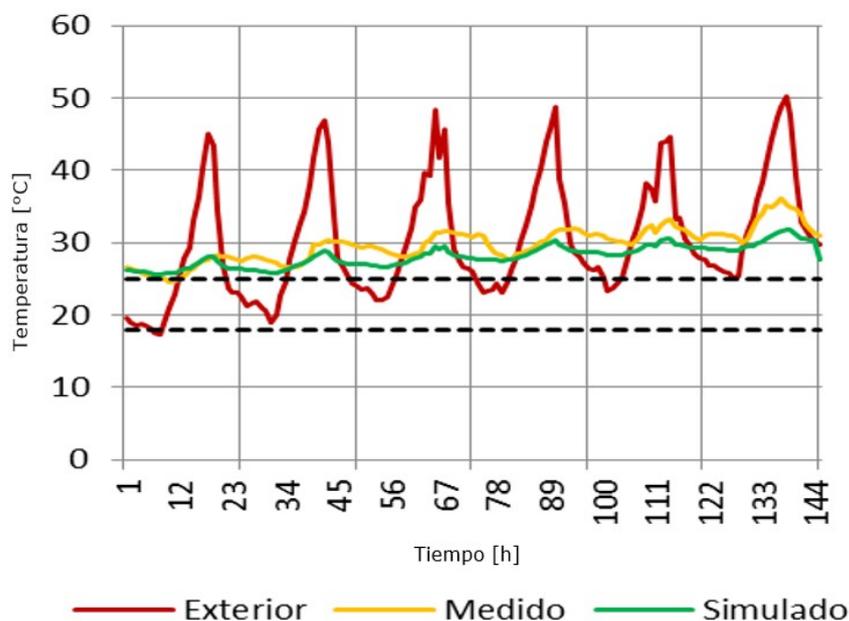


Figura 2.12: Comportamiento térmico del dormitorio norte, del 19 al 24 de enero de 2009 [Elaboración propia].

Casi la totalidad de las mediciones registradas de temperatura media diaria del aire en la cocina-comedor y el dormitorio norte, están claramente fuera del parámetro de confort para verano (25°C), debido a las ganancias de calor externas e internas, que se convirtieron en cargas térmicas. Las cargas térmicas internas se originaron por: 1) La escasa inercia térmica de las envolventes debida a las propiedades térmicas de los

Capítulo N°2.

materiales que la integran, 2) El aire caliente que ingresó por la manipulación y rendijas de aberturas y 3) El calor interno producido por los usuarios, iluminación y electrodomésticos.

Con respecto al uso de las zonas, resulta dificultoso realizar un perfil debido a las diferentes actividades fuera de la vivienda que tienen los usuarios (principalmente laboral y educativo), cuyos horarios cambian continuamente. En cada zona se observa un salto en los valores medidos y simulados, durante la semana (días 19-23) y el fin de semana (día 24), por las ganancias de los usuarios.

El consumo eléctrico de los bimestres enero – febrero y marzo-abril de 2009, con 394 y 406 kWh respectivamente, son los más altos del año. Esto se debe a que usaron en la vivienda el sistema auxiliar de refrigeración (bomba de calor) para atemperar el calor.

Podemos concluir que, en verano el diseño de la envolvente exterior facilita el ingreso de calor al interior, la formación de cargas térmicas y el incumplimiento del rango de confort según norma. Por otro lado, los usuarios, pueden ayudar mediante la apertura de las aberturas, cuando las temperaturas exteriores estén por debajo de las temperaturas interiores. Se recomienda para mejorar las condiciones térmicas en el verano: ventilación natural en horas de menor temperatura exterior con respecto a interior, disminución de la ganancia directa, mejorar la inercia térmica y aislación de las envolventes verticales y superior.

2.3.2.2. Periodo del 15 al 20 de junio de 2008.

En invierno, las temperaturas medias exteriores fluctúan en 9°C y 12°C, con una media de 10.5°C. La temperatura interior oscila entre los 13°C y 14°C, con una media de 14°C y una amplitud térmica interior – exterior de 3.5°C. Las zonas interiores orientadas al norte presentan una temperatura media de 15°C, debido a las ganancias de calor. La zona con temperatura media más baja es el dormitorio sur con 13°C, seguido por el baño con 14°C. Se observa que las zonas orientadas al norte presentan temperaturas mayores que las ubicadas al sur, con diferencia de 3°C. Todos están fuera de la zona de confort térmico.

Las figuras 2.13 y 2.14 representan el comportamiento térmico en la cocina-comedor y el dormitorio norte de la VSC, durante el período de invierno del 15 al 20 de junio de 2008. Las líneas continuas grafican la variación de la temperatura medias exterior, medida y simulada (eje izquierdo), durante el lapso de los 6 días, donde se destacan tres

horas por día (eje horizontal). Las líneas discontinuas representan los parámetros de confort normativos de 18°C y 25°C, para invierno y verano respectivamente. La validación del modelo térmico, se realizó mediante la comparación de las temperaturas medias que se utilizaron en la simulación (fichero climático EPW) y los datos experimentales durante el periodo y con un intervalo de 1 hora, en todas las zonas.

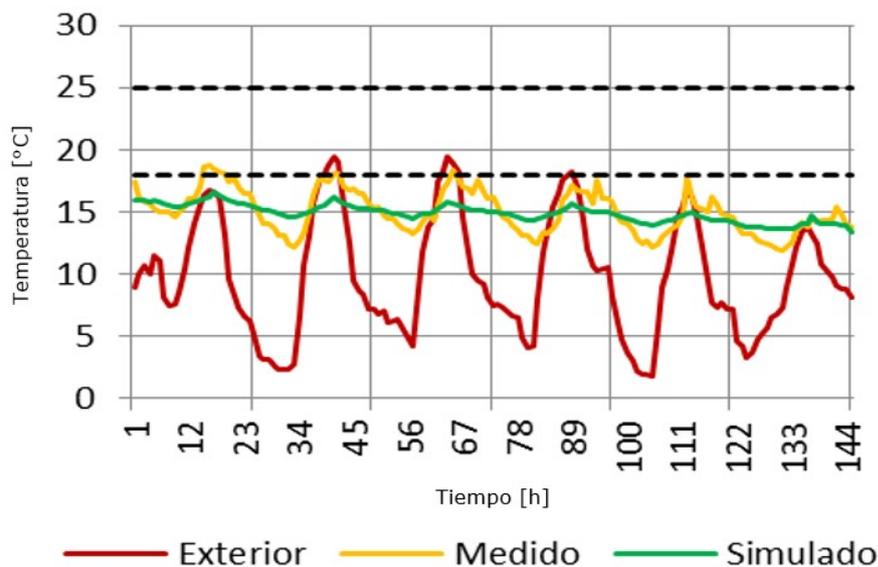


Figura 2.13: Comportamiento térmico de la cocina-comedor, del 15 al 20 de junio de 2008 [Elaboración propia].

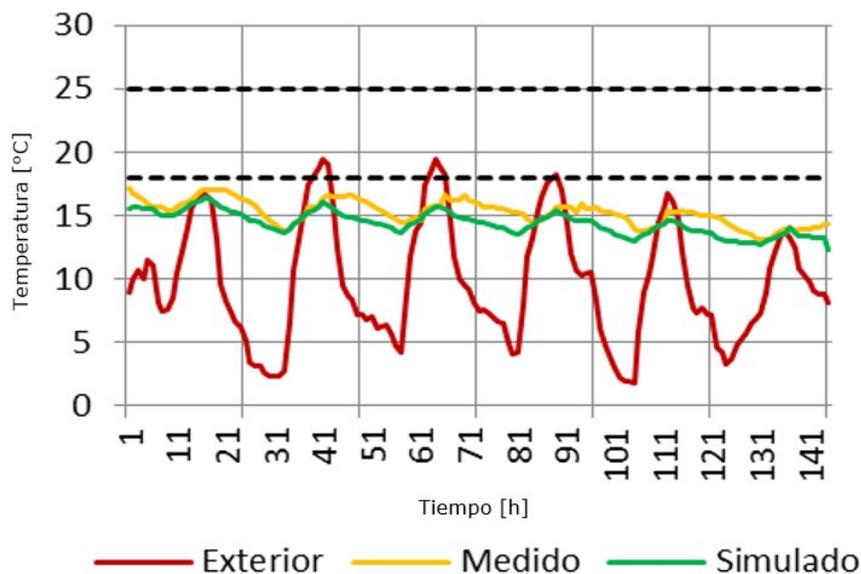


Figura 2.14: Comportamiento térmico del dormitorio norte, del 15 al 20 de junio de 2008 [Elaboración propia].

Casi la totalidad de las mediciones registradas de temperatura media diaria del aire en la cocina-comedor y el dormitorio norte, están claramente fuera del parámetro de confort

para invierno (18°C), debido a las pérdidas de calor por las envolventes. Las pérdidas de calor se produjeron por: 1) La escasa inercia térmica de las envolventes debida a las propiedades térmicas de los materiales que la integran, 2) Ingreso de aire frío por la manipulación y rendijas de aberturas y 3) Las ganancias internas resultan insuficientes para alcanzar el rango de confort.

Con respecto al perfil de uso, se observa en cada zona un salto en los valores medidos y simulados, durante la semana (días 16-20) y el fin de semana (día 15), por las ganancias de los usuarios, que contribuyen de manera favorablemente al confort térmico.

El consumo de energía eléctrica del bimestre mayo-junio 2008, con 175 kWh, es el más bajo del año. Esto se debe a que no existen en la vivienda sistemas auxiliares de calefacción y los usuarios optaron por soportar el frío con abrigo.

Podemos concluir que en invierno el diseño de la envolvente exterior facilita la pérdida de calor interior, la formación de cargas térmicas y el incumplimiento del rango de confort según norma. Se recomienda para mejorar las condiciones térmicas en el invierno: aumento de la ganancia directa, mejorar la inercia térmica y aislación de las envolventes verticales y superior.

2.3.3. Análisis de sensibilidad: modelo mejorado.

Con el modelo calibrado para los periodos representativos de verano y invierno, se calculó las demandas de refrigeración-calefacción que son necesarios para llegar a temperaturas de confort internas preestablecidas, modificando las características constructivas de las envolventes.

Las mejoras propuestas, para reducir la demanda de refrigeración en la VSC (modelo base), necesarias para llegar a los rangos de confort preestablecidos son: 1) VSC sin modificar 1121 Wh (0%), 2) Pintura en techo de color blanca 87.21 Wh (7.8%), 3) Aislación de 0.10 m de poliestireno en techo 160.6 Wh (14.3%), 4) Aislación de 0.05 m de poliestireno en paredes 521.7Wh (46.5%) y 5) Incorporación de ganancias internas 242.2 Wh (21.6%). En la figura 2.15, se muestra el impacto de las mejoras propuestas en la VSC original, sobre la demanda de refrigeración.

Capítulo N°2.

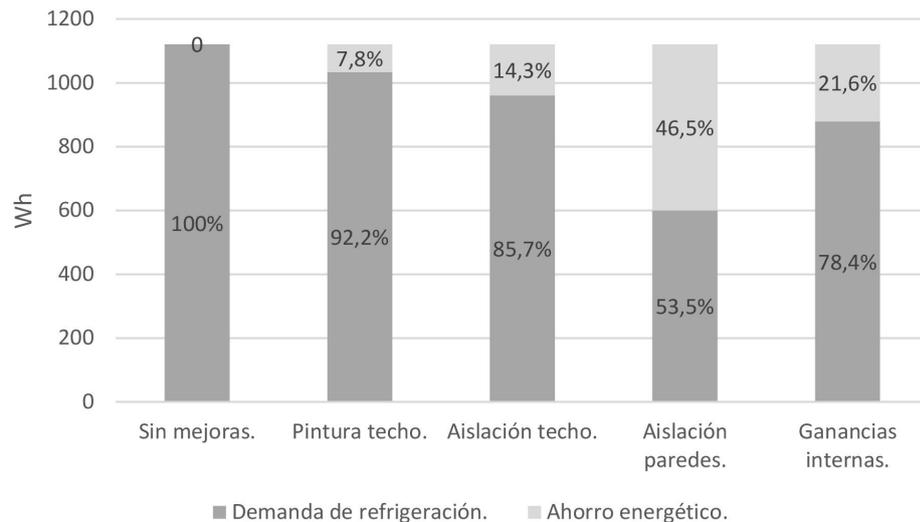


Figura 2.15: Mejoras propuestas para reducir la demanda de refrigeración [Elaboración propia].

2.3.4. Implementación de medidas de mejora.

Las mejoras propuestas en las envolventes, se construyen en dos etapas: 1) Envolvente superior: del 11 al 20 de diciembre de 2012 y 2) Envolventes verticales: del 23 de junio al 12 de agosto de 2014. Para mayor detalle ver Anexo A.



Figura 2.16: Ejecución de las mejoras tecnológicas en el techo. Izquierda: remoción de las bovedillas. Derecha: colocación de la aislación térmica [Fotos Lucio A. Molas].

Los pasos constructivos para la mejoras tecnológicas en la envolvente superior son: a) Remoción de la cubierta existente sobre la losa de hormigón armado, b) Limpieza de losa de hormigón armado y aplicación de tres manos de pintura asfáltica (aislante hidrófugo), c) Colocación de planchas de poliestireno de 0.10 m de espesor dentro de una retícula de madera de 1.00 x 1.00 m (encajonado), d) Colocación de metal desplegado fijada en la retícula de madera, e) Aplicación de carpeta de concreto de 0.03

Capítulo N°2.

m, f) Colocación de membrana de 0.003 m (aislante hidrófugo), g) Construcción de carpeta de asiento de 0.03 m de espesor, h) Aplicación de 2 manos de pintura asfáltica. Aislante hidrófugo, i) Colocación de las bovedillas de 0.20 x 0.20 m con juntas tomadas y j) Aplicación de 3 manos de pintura reflectiva color blanco. La figura 2.16, se describe la remoción de las bovedillas y la colocación del aislante térmico.

En el caso de las mejoras constructivas de las envolventes verticales, los pasos son: a) Limpieza del muro y aplicación de tres manos de pintura asfáltica, b) Colocación de planchas de poliestireno de 0.05 m de espesor dentro de una retícula de madera de 1.00 x 1.00 m (encajonado), c) Colocación de metal desplegado fijada en la retícula de madera y d) Aplicación de revoque grueso fratasado de 0.03 m. En la figura 2.17, se describe la colocación de la aislación térmica y la terminación para la pintura.



Figura 2.17: Ejecución de las mejoras tecnológicas en la mampostería. Izquierda: colocación de la aislación térmica. Derecha: terminación con revoque fino [Fotos Lucio A. Molas].

Los usuarios de la vivienda recibieron una capacitación y un instructivo [7], con medidas tendientes a reducir el consumo de energía (principalmente la electricidad) y tendiente a mejorar la precaria economía familiar. En entre las medidas podemos mencionar: 1) Controlar la factura de eléctrica periódicamente para verificar el ahorro, 2) Aprovechar la luz solar en lugar de lámparas, 3) Baldear el piso para refrescar, 4) Pintar con colores claros las paredes interiores y los muebles, 5) Utilizar electrodomésticos cuando sea necesario, 6) Evitar abrir la heladera, 7) Utilizar el lavarropas cuando este completa la carga, 8) En días calientes mantener cerradas las aberturas (protegidas con cortinas) y ventilar de noche, 9) En días fríos, dejar pasar el sol por las ventanas y mantener cerrada la vivienda.

Capítulo N°2.

Por último, en la figura 2.18, se muestran las medidas de mejoramiento en la VSC, ejecutadas hasta finalizar el proyecto, sin llegar a evaluar el impacto en el consumo de energía operativa y uso sanitario. Esto se debió a la baja del proyecto de investigación en el 2018.



Figura 2.18: Soluciones constructivas para reducir el consumo de energía: construcción de pérgola en fachada norte (izquierda) e instalación de calentador solar (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].

2.4. Resumen y conclusiones.

En el capítulo N°2, se realizó la descripción del proyecto de investigación y de los principales resultados de la evaluación energética de la VSC. También se estudiaron diferentes alternativas tecnológicas para reducir la demanda de refrigeración. Las conclusiones son:

1. Se realizó la auditoria energética, con el relevamiento de la temperatura, consumos energéticos (electricidad y gas), el patrón de uso y las ganancias internas, durante 1 año en la fase operativa de la VSC, ubicada en la ciudad de SFDVDC (zona bioambiental cálida IIa de la República Argentina). El consumo eléctrico registrado en la fase operativa es de 51.74 kWh/m²año (1824 kWh/m²), con 35.25 m² de superficie útil.
2. Se determinó por medio del programa de simulación SIMEDIF [5], el modelo de comportamiento térmico base, para periodos representativos de invierno y verano. El verano es la estación energéticamente más comprometida (con requerimientos de refrigeración), con temperatura media de 26.3°C, amplitud térmica de 13.52°C y temperaturas máximas absolutas de 42.2°C.

Capítulo N°2.

3. En el modelo inicial, con temperaturas de consigna de 18 invierno-25°C verano, se necesita 1121 Wh de refrigeración, para acondicionar en verano la vivienda. Los resultados demostraron que cuando las condiciones de las temperaturas exteriores son más rigurosas (altas o bajas), la respuesta del diseño de su envolvente es insuficiente para alcanzar los rangos de confort térmico establecidos y como consecuencia de ello demanda mayor cantidad de energía auxiliar para su acondicionamiento.
4. El modelo mejorado, con soluciones tecnológicas posibles en las envolventes, pudo reducir la demanda de refrigeración a 879 Wh de refrigeración, representando un ahorro del 21.6% respecto a modelo inicial (1121 Wh). Para mejorar el ahorro, es fundamental aplicar el método de simulación con el programa SIMEDIF, en la etapa de formulación del proyecto de la vivienda social. En el caso de una vivienda ya construida, se reducen enormemente las posibilidades de aplicación de soluciones tecnológicas para reducir las demandas de climatización.
5. Las soluciones tecnológicas, con aislación térmica en las envolventes verticales y techo, fueron ejecutadas en la VSC, demostrando la viabilidad constructiva. También se capacitó a los usuarios en medidas tendientes a reducir el consumo de energía (electricidad principalmente) y mejorar su precaria economía.
6. Durante un periodo de 10 años (2008-2018), la VSC base entregada por el IPV con una superficie construida total de 43 m², fue ampliada con el mismo sistema constructivo hasta llegar a 120 m² en total, representando un incremento del 64% de la superficie original. Esto determina un importante incremento de la energía incorporada durante la fase de uso del ciclo de vida.
7. La instalación del calefón solar para uso sanitario, redujo el consumo energético y mejoró la economía familiar, porque se dejó de utilizar el calentador de agua eléctrico. Esta tecnología debería formar parte del diseño inicial.

Referencias del capítulo N°2.

- [1] Instituto Provincial de la Vivienda de Catamarca.
<<http://www.ipvcatamarca.gov.ar/inicio/>>, acceso diciembre 2023.
- [2] Molas, L., García, V., Iriarte, A., Correa, E., "Auditoria térmica y variables del confort. Caso de una vivienda del Instituto Provincial de la Vivienda, ciudad de

Catamarca", ASADES Vol. 12 (2008), 121-128.

- [3] Molas, L. y otros, 2008. "*Análisis del comportamiento térmico sobre parámetros de confort. Caso de una vivienda social del IPV. República Argentina*". CYTED. ISBN: 978-972-676-210-2.
- [4] Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva – Presidencia de la Nación, 2008. "*Resolución 685: convocatoria PFIP 2008-1, anteproyectos aprobados, diseño energético sustentable de vivienda de interés social en Catamarca*".
- [5] Programa SIMEDIF para Windows, 2020. "*Manual de uso, INENCO-UNSa-CONICET*". Disponible en <https://leb.inenco.unsa.edu.ar/index.php/es/software/simedif-2-0-calculo-termico-de-edificios/>, acceso diciembre 2023.
- [6] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1996. "*Norma 11603. Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*".
- [7] L. Molas, 2008. "*Refuncionalización ambiental, barrio Hipódromo Catamarca, República Argentina*". ISBN: 978-987-1341-21-4.
- [8] Ministerio de Ciencia e Innovación Tecnológica Catamarca <<http://meteo.sucytca.gob.ar/>>, acceso diciembre 2023.
- [9] Aeropuerto Internacional Felipe Varela, Estación Meteorológica, <<https://es.weatherspark.com/y/147404/Clima-promedio-en-Coronel-Felipe-Varela-International-Airport-Argentina-durante-todo-el-a%C3%B1o>>, acceso diciembre 2023.
- [10] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), <<https://inta.gob.ar/catamarca>>, acceso mayo 2023.
- [11] Programa Meteonorm. Disponible en: <<https://meteonorm.com/en/>>, acceso diciembre 2023.
- [12] Fundación Centro de Estudios para Políticas Públicas Aplicadas, 2007. "*Antes de*

América. Símbolos de Culto y poder de las culturas prehispánicas". ISBN 978-987-23778-0-9.

- [13] R., Gómez, 2010. "*Arquitectura popular de los valles calchaquíes*". Universidad Católica de Salta. ISBN 978-950-623-053-1.
- [14] Granero Realini, G., Barreda, M., Bercovich, F., 2019. "*La política habitacional en Argentina. Una mirada a través de los institutos provinciales de vivienda*", disponible en <<https://www.cippec.org/wp-content/uploads/2019/06/181-CDS-DT-La-pol%C3%ADtica-habitacional-en-Argentina-Granero-Bercovich-y-Barreda-junio-2016-2.pdf>>, acceso diciembre 2023.
- [15] E., Sprovieri, 2011. "*La Vivienda de interés social*". Editorial Nobuko. ISBN: 978-987-584-345-5.
- [16] Empresa de Energía de Catamarca Sociedad Anónima con participación del Estado Mayoritario. <<https://www.ecsapem.com.ar/>>, acceso diciembre 2023.
- [17] Ente Nacional Regulador Electricidad. <<http://www.enre.gov.ar/>>, acceso diciembre 2023.
- [18] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2004. "*Norma 11659-1. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración*".
- [19] Ministerio de transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2022. "*Documento básico HS*". <<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBHS.pdf>>, acceso diciembre 2023.

Capítulo N°3.

Conceptos y métodos.

3.1. Introducción.

En el capítulo N°3, se describe el método del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el objetivo de realizar la evaluación comparativa del consumo de energía primaria, emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y confort térmico, para la vida útil de las viviendas sociales, contemporánea (VSC) y vernácula (VSV) y; propuesta de mejora de la VSC (PMVSC), en los capítulos N°4, 5 y 6 respectivamente. También se definen los conceptos fundamentales y herramientas de cálculo, utilizadas en cada etapa del método.

El método de ACV, consta de 4 etapas fundamentales: 1) Definición del objetivo y alcance, 2) El análisis de inventario, 3) La evaluación de impacto y 4) La interpretación. El objetivo está definido por la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio y el público a quien se prevé comunicar los resultados. El alcance, establece para alcanzar el objetivo, la amplitud, la profundidad y el nivel de detalle. El análisis de inventario, implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo. La evaluación de impacto, tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del análisis de inventario. La interpretación, es la etapa del ACV en la cual los hallazgos del análisis de inventario y de la evaluación de impacto se consideran juntos, en sintonía con el objetivo y alcance, para llegar a conclusiones que expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones.

A pesar de la importancia de la validación de la simulación térmica con datos experimentales y la evaluación del confort térmico en las viviendas sociales, la revisión de la literatura sobre el método de ACV (ver capítulo N°1), señala un vacío en las investigaciones. En este estudio se agregan estos importantes componentes al método de ACV.

Capítulo N°3.

El modelo térmico equivalente (MTE), es el conjunto de procesos unitarios subordinados a la función de confort térmico, que utiliza datos similares a otros MTE en la simulación térmica, para cuantificar, evaluar y comparar el impacto ambiental debido al consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y el nivel confort térmico.

Como veremos más adelante, la energía del ciclo de vida resulta de la sumatoria de los consumos parciales de energía primaria y emisiones de CO₂ de los procesos unitarios, que integran el MTE, desde la adquisición de materia prima hasta la demolición. En el capítulo N°1, definimos la energía que consumen los procesos unitarios: 1) Incorporada 2) Operativa y 3) De demolición. En el mercado existe una amplia gama de herramientas para determinar la energía primaria y emisiones de CO₂ de los edificios. En el caso particular de la energía incorporada y operativa, se utilizan las bases de datos y programas de simulación térmica, respectivamente.

La mayoría de los estudios (e.g. [1,2,3,4]), coinciden que la energía operativa (80-95%) tiene la mayor participación en el ciclo de vida de los edificios contemporáneos, seguida de la energía incorporada (15-20%). Otros autores consideran la energía operativa tiene una participación del 95-99%, despreciando la energía incorporada [5]. En el caso de la energía incorporada, debida al desperdicio de los materiales en la construcción es insignificante (1%) (e.g. [1,2]). Sin embargo otros estudios (e.g.[6,3,7]) sugieren tener en cuenta el descarte de los materiales durante la construcción (5%). Con respecto a la energía de demolición, algunas publicaciones (e.g.[4,7]) suponen que no es representativa en el ciclo de vida de los edificios, porque presenta una pequeña magnitud (1-5%).

Con relación a las toneladas equivalentes totales de emisiones de CO₂ producidas por el consumo de energía en todo el ciclo de vida del edificio, las mismas se concentran en la etapa de uso con el 90% [11].

La energía incorporada, operativa y emisiones de CO₂, se pueden reducir con mejoras tecnológicas en el diseño arquitectónico [8]. Ramesh et al. [1], demostró la reducción de la energía incorporada, con el empleo de materiales de baja energía (adobes) en su fabricación (50%). Estudios (e.g.[2,9]) confirmaron la reducción de la energía operativa (22-28%) en viviendas contemporáneas en Argentina con tecnología pasiva (materiales industrializados) con un pequeño aumento de la energía incorporada (12-17%). Por otro lado, el uso excesivo de características pasivas y activas puede ser contraproducente por los altos incrementos de la energía incorporada (hasta un 60%), en casas de alta eficiencia [4].

Capítulo N°3.

El comportamiento de los ocupantes puede influir en la reducción de la energía operativa. Algunos artículos (e.g.[9,4,10,7]) afirman que las interacciones de los usuarios con el ambiente interior-exterior y uso de aparatos eléctricos de alta eficiencia implican importantes reducciones (60-100%). En el capítulo N°2 se comentó la formación que recibieron los usuarios tendientes a reducir el consumo de energía, fundamental para mejorar la precaria economía familiar.

En el capítulo N°3, se definen conceptos fundamentales, procedimientos de cálculo y herramientas necesarias para cuantificar, evaluar y reducir el impacto ambiental producido por el consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y el confort térmico de las VSC, VSC y PMVSC, en el marco del método del ACV propuesto. A continuación, se menciona el orden establecido en el presente capítulo:

- 3.2 Proceso para el ACV.
 - 3.2.1 Objetivo y alcance del ACV.
 - 3.2.2 Análisis de inventario del ACV.
 - 3.2.3 Evaluación del impacto del ACV.
 - 3.2.4 Interpretación del ACV.
- 3.3 Instrumentos para el cálculo del ACV.
 - 3.3.1 Métodos para certificación ambiental de edificios.
 - 3.3.2 Herramientas de cálculo de energía incorporada y emisiones de CO₂.
 - 3.3.3 Herramientas de cálculo de energía incorporada y emisiones de CO₂.
- 3.4 Resumen y conclusiones.

3.1.1. Método de Análisis de Ciclo de Vida.

La norma ISO 14040 [12], denominada "Gestión ambiental, análisis del ciclo de vida, principios y marcos de referencia", es la versión oficial en español, de la Norma Europea EN ISO 14040: 2006, que a su vez adopta la Norma Internacional ISO 14040:2006. La norma europea ha sido aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), el 19.06.2006.

La creciente conciencia con respecto a la importancia ambiental, y los posibles impactos asociados con los productos y servicios, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar estos impactos. Una de estas técnicas desarrolladas en este sentido es el análisis del ciclo de vida (ACV). El ACV puede ayudar a:

Capítulo N°3.

- La identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida.
- La aportación de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales.
- La selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición.
- El marketing (por ejemplo, una declaración ambiental de producto).

El método denominado de ACV, definido en la norma ISO 14040, trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de materia prima, pasando por la producción, uso, hasta su tratamiento final. Consta de 4 etapas: 1) Objetivo y alcance, 2) Análisis de inventario, 3) Evaluación de impacto y 4) Interpretación.

El Análisis de la Energía del Ciclo de Vida (AECV) en los edificios, es un enfoque del ACV para evaluar exclusivamente el consumo de energía primaria y establecer medidas pasivas o activas para reducirlo [1].

En la sección 3.2, se describen las etapas y los conceptos fundamentales de la norma ISO 14040 [12]. En método de ACV (enfocado en el AECV), se ha adaptado y simplificado, con la incorporación de la validación de datos experimentales y la evaluación del confort térmico para una tipología arquitectónica en todo el ciclo de vida, siendo esta una de las principales aportaciones de la tesis. También el método, permite la comparación del impacto ambiental de los MTE, por medio de la aplicación de indicadores ambientales a variables elegidas del edificio (ver apartado 3.2.2).

3.1.2. Herramientas de cálculo del ACV.

Existe una creciente tendencia mundial en medir, evaluar y reducir los impactos ambientales producidos por los edificios durante el ciclo de vida. En este marco hay dos grandes grupos: 1) Los métodos de certificación ambiental y 2) Las herramientas de cálculo de energía incorporada y operativa. En la sección 3.3, se justifica la elección de las herramientas utilizadas en la etapa de análisis de inventario del ACV.

Capítulo N°3.

Los métodos de certificación ambiental, comprenden un proceso de diseño auditado y certificado de edificios, donde se aplica un sistema de indicadores (en los que se incluye la energía) para reducir el impacto ambiental. Es supervisado por empresas multinacionales de las cuales las más conocidas son: BREEAM, LEED y GBC. Para estudios de ACV, presentan sus inconvenientes debido al público a que va dirigido (grandes corporaciones) y los costos que implica el proceso de certificación (ver apartado 3.3.1).

El cálculo de la energía incorporada de manufactura de materiales, se realiza principalmente con la base de datos, una herramienta informática fundamental que permite manejar una cantidad considerable de datos. Sin embargo, en Sudamérica todavía no existen bases de datos con datos locales (e.g.[2,6]). Las bases de datos más utilizadas en los estudios (e.g.[3,4,6,13]) son: Ecoinvent, Simapro y BEDEC. La diferencia entre ellas radica en la cantidad de datos disponibles, la transparencia y el costo de la licencia de acceso. La base de datos BEDEC [14], fue elegida para la tesis (ver apartado 3.3.2).

El cálculo de energía operativa de la climatización, se realiza por medio de herramientas de simulación de rendimiento energético, para evaluar el comportamiento térmico de los edificios, considerando todos los parámetros físicos que lo definen [15]. Los programas de simulación más relevantes son: EnergyPlus, TRNSYS, Tas, ESP-r, TRANCE 700, HAP, eQuest, Energy10 y ECOTEC [16]. La diferencia entre ellos radica en el enfoque (simulación térmica, simulación de sistemas HVAC o diseño del edificio), la complejidad del manejo (conocimientos del operador), tiempo de modelado, entorno gráfico y precisión de los resultados. El programa EnergyPlus [17], fue elegido para la tesis (ver apartado 3.3.3).

3.2. Proceso para el ACV.

El ACV, es un método desarrollado en la norma ISO 14040 [12], para evaluar las entradas y salidas de materia y energía del ciclo de vida de un producto o servicio y orienta en cómo reducir los impactos ambientales. Este estudio aplica el ACV a edificios y destaca la importancia de la validación experimental del MTE y la evaluación del confort térmico.

Adaptar el método de ACV a un edificio, es un proceso complejo, porque está integrado por varios productos y servicios que participan en las diferentes etapas del ciclo de vida. Al respecto Zabalza Bribián et. al [13] señala que los edificios constituyen un tipo de

Capítulo N°3.

“producto” muy especial, ya que tienen una vida relativamente larga, pueden sufrir modificaciones en su uso con cierta frecuencia y contienen una gran cantidad de materiales y componentes diferentes. Todo ello conlleva a que la realización de un estudio completo de ACV de un edificio, no sea un proceso tan sencillo como para otros productos de consumo.

Las características esenciales del método de ACV son:

- a. Evaluar de forma sistemática los impactos ambientales del sistema del producto (ver definición apartado 3.2.1), desde la adquisición de materia prima hasta la disposición final, de acuerdo con el objetivo y el alcance establecidos.
- b. La naturaleza relativa de un ACV, se debe a las características de la unidad funcional (ver definición apartado 3.2.1), dentro del método.
- c. Trata los impactos ambientales potenciales y no predice impactos ambientales absolutos o precisos.
- d. La ponderación de los resultados del ACV, requiere juicios de valor.
- e. La interpretación del ciclo de vida utiliza un procedimiento interactivo entre las etapas.

El enfoque de ACV desarrollado en este trabajo es el AECV. Se utiliza para cuantificar, evaluar y reducir el consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico de un edificio en los procesos unitarios que integran las etapas de su vida: producción, uso y demolición.

El ACV, está integrado por cuatro etapas interactivas: 1) Objetivo y alcance, 2) Análisis del inventario, 3) Evaluación de impacto y 4) Interpretación [12].

Etapa N°1: especifica el objetivo que se busca con el estudio. También define el alcance, es decir, el sistema de producto a estudiar, la unidad funcional, los límites del sistema y las categorías de impacto seleccionadas.

Etapa N°2: implica la recopilación de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (masa y energía) y salidas (emisiones y vertidos) pertinentes de un sistema del producto.

Capítulo N°3.

Etapa N°3: evalúa cuán significativos son los impactos ambientales potenciales de las categorías seleccionadas, utilizando los resultados del inventario del ciclo de vida y verificando el cumplimiento del objetivo y alcance del ACV.

Etapa N°4: debe brindar resultados que sean coherentes con el objetivo y el alcance, expliquen las limitaciones y proporcionen las recomendaciones para la toma de decisiones.

En la revisión bibliográfica (ver capítulo N°1) se observó que el método de ACV señala un vacío para la validación de datos experimentales y la evaluación del confort térmico. En este sentido, la reducción del impacto ambiental es factible si se garantiza el confort térmico de los usuarios, especialmente en el contexto de estudio, donde un inadecuado acceso a los servicios energéticos como calefacción, refrigeración e iluminación tienen impactos negativos en el bienestar social, la salud y el empoderamiento de género. En la figura 3.1, se muestran las etapas del ACV y las nuevas incorporaciones.

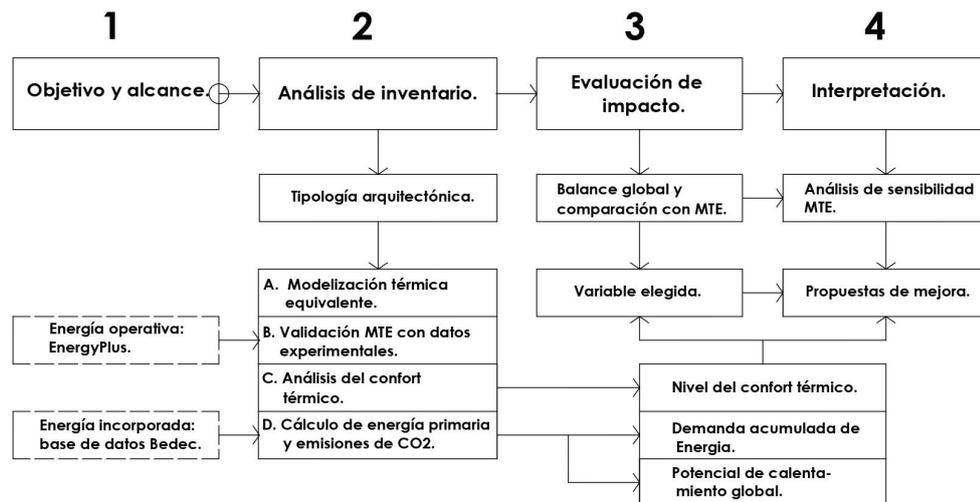


Figura 3.1: Propuesta del método de ACV, con las nuevas incorporaciones [Elaboración propia].

A continuación, se describen en detalle las cuatro etapas del método de ACV, con la incorporación de la validación de datos experimentales y el confort térmico.

3.2.1 Objetivo y alcance del ACV.

El objetivo de un ACV, está definido por: 1) La aplicación prevista, 2) Las razones para realizar el estudio y 3) El público a quien se prevé comunicar los resultados del estudio [12].

La tesis plantea como objetivo, la evaluación comparativa del consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico del ciclo de vida de tres MTE: VSC, VSV y propuesta de mejora VSC (PMVSC). La razón es conocer el impacto ambiental de la VSC, tomando como referencia una VSV y proponer soluciones tecnológicas para reducirlo. Los resultados servirán para direccionar las políticas habitacionales hacia la eficiencia energética.

El alcance de un ACV, establece para lograr el objetivo, la amplitud, profundidad y el nivel de detalle. Está conformado por: 1) El sistema del producto y límites del sistema, 2) Función, unidad funcional y flujo de referencia y 3) Las categorías y métodos de análisis.

3.2.1.1. El sistema del producto y los límites del sistema.

Según la norma ISO 14040 [12], para aplicar el método de ACV a un producto, es necesario definir: 1) El sistema del producto y 2) Los límites del sistema. Se entiende por producto al bien o servicio que puede ser tangible (hardware) o intangible (software).

El sistema del producto, es el conjunto de procesos unitarios que desempeñan una o más funciones definidas y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto. Se define al proceso unitario, como el elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario (ver apartado 3.2.2), para el cual se cuantifican los datos de entrada (de materia y energía) y salida (de emisiones, materia y vertidos), denominados flujos elementales. El proceso, es el conjunto de actividades, en cada proceso unitario, mutuamente relacionadas, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.

Los límites del sistema, definen los procesos unitarios a ser incluidos en el sistema del producto. La división de un sistema del producto en los procesos unitarios, facilita la identificación de las entradas y salidas. En la figura 3.2, se muestra el sistema del producto o modelo para un producto, integrado por flujos elementales y procesos unitarios dentro de los límites del sistema. En este caso, los procesos unitarios son: 1) Adquisición de materia prima, 2) Producción, 3) Utilización, 4) Reciclado/reutilización, 5) Tratamiento de residuos, 6) Transporte y 7) Suministro de energía.

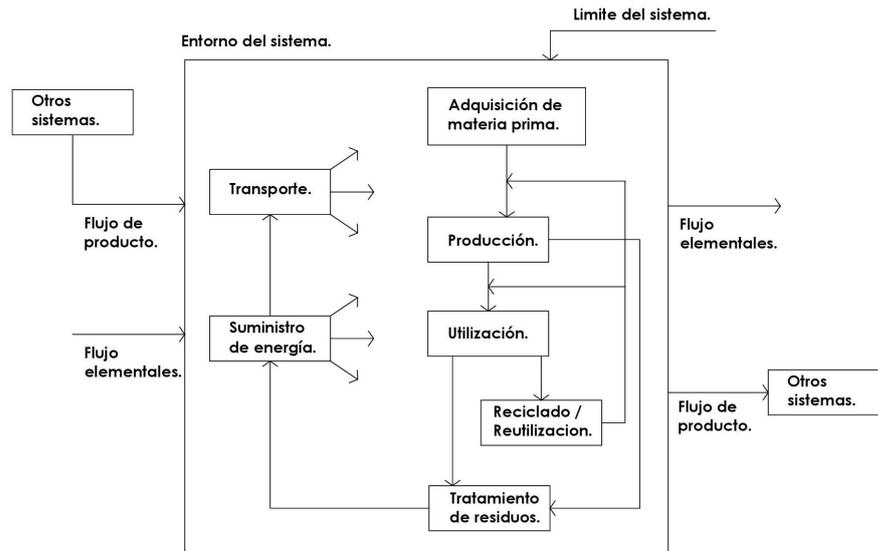


Figura 3.2: Sistema del producto o modelo para un producto [Elaboración propia].

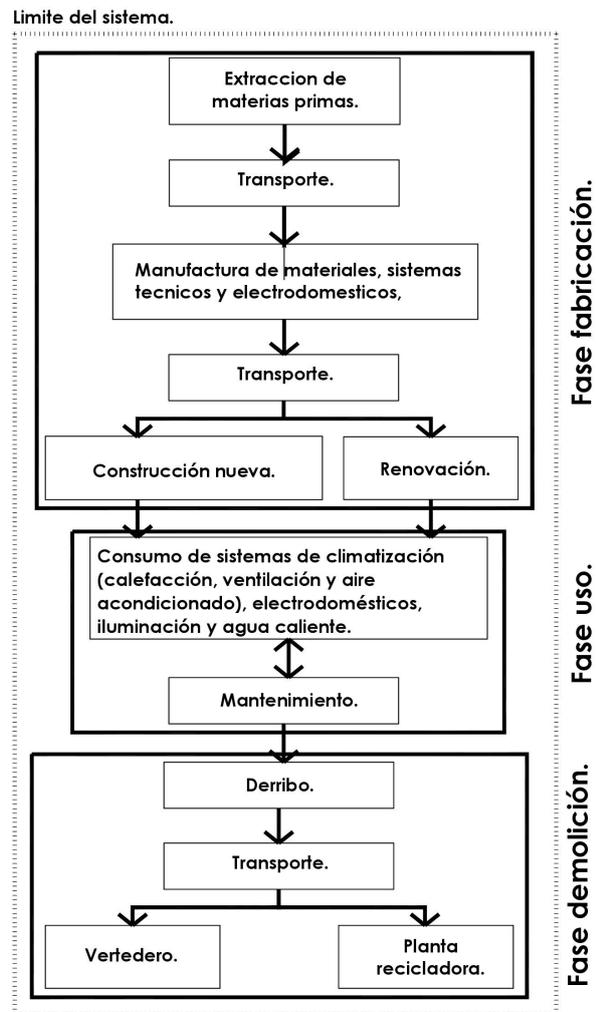


Figura 3.3: Sistema del producto o modelo para un edificio [Elaboración propia].

Capítulo N°3.

Un edificio es un sistema complejo. Comprende un conjunto de productos (por ejemplo: ladrillo, carpinterías, etc,) o servicios (por ejemplo, la climatización, el transporte de productos o personal de construcción, uso de maquinaria de obra, etc.). Las entradas y salidas se producen en los procesos unitarios, que pueden incluir varios sistemas del producto, y se pueden agrupar en 3 fases del ciclo de vida, para su análisis: 1) Fabricación, 2) Uso y 3) Demolición. En la figura 3.3, se muestra el sistema del producto o modelo para un edificio, integrado por los flujos elementales y procesos unitarios relacionados, dentro de los límites del sistema. Los procesos unitarios definidos son: 1) Extracción de materia prima, 2) Transporte a la fábrica, 3) Manufactura, 4) Transporte al sitio construcción, 5) Construcción o renovación, 6) Climatización, 7) Mantenimiento, 8) Derribo, 9) Transporte para la disposición final y 10) Vertedero o planta recicladora.

El ciclo de vida de un sistema del producto, son las etapas consecutivas e interrelacionadas, desde la adquisición de materia prima hasta la disposición final. En el ciclo de vida de un edificio intervienen varios factores que determinan su duración. Algunos artículos (e.g. [3,4,6]) comentan que la extensión temporal depende de: 1) El mercado inmobiliario, 2) El ciclo de vida de los materiales, 3) Las soluciones de construcción, 4) El mantenimiento y reemplazo de los componentes, 5) El clima donde esté inserto el edificio y 6) El comportamiento de los usuarios. Por lo general, estudios de ACV realizados en el contexto europeo adoptan 50 años (e.g. [3,4,10,18]), muy distinto al sudamericano, con periodos que podemos estimar hasta 100 años [6].



Figura 3.4. VSC, construidas en 1973 (izquierda) y 2006 (derecha), fuera del casco histórico de SFDVDC. [Fotos Lucio A. Molas].

La VSC, de estilo racionalista, se construyen desde 1950, fuera del casco histórico de la ciudad de SFDVDC, donde el costo de la tierra es bajo. Por lo general son bien conservadas y ampliadas en función de las necesidades de los habitantes (ver capítulo

Capítulo N°3.

Nº2). En la figura 3.4, se observa dos tipologías de VSC, con ciclos de vidas de 50 y 17 años (tomando como referencia el año 2023).

La VSV, de estilo italianizante, se construyeron hace más de 100 años, en SFDVDC y están ubicadas dentro del caso histórico. Debido a la dinámica del mercado inmobiliario, son demolidas progresivamente para dejar lugar a construcciones contemporáneas. En la figura 3.5, podemos observar una VSV existente con más de 100 años y otra demolida, para dar lugar a una construcción contemporánea.



Figura 3.5: VSV, existente con más de 100 años (izquierda) y otra demolida por el mercado inmobiliario (derecha) dentro del casco histórico de SFDVDC. [Fotos Lucio A. Molas].

El criterio de corte, se refiere a la especificación de la cantidad de flujo de materia o de energía, o del nivel de importancia ambiental asociado a los procesos unitarios, o al sistema del producto, para su exclusión del estudio. Al respecto Zabalza Bribián et al. [13], proponen un método simplificado de AECV, para dejar fuera de los límites del sistema aquellos procesos unitarios que conllevan un menor impacto en términos de energía primaria y emisiones de CO₂ y reducir los datos y cálculos necesarios para el estudio. En comparaciones entre un ACV completo y otro simplificado para edificios residenciales, justifica el error cometido por el ahorro en el tiempo de adquisición de datos. Dicha simplificación consiste en: 1) Seleccionar como categorías de impacto únicamente la energía incorporada y el potencial de calentamiento global, 2) Dejar fuera de los límites del sistema las etapas de construcción del edificio y fin de vida, 3) Limitar los aspectos incluidos en la etapa de producción del edificio, a la fabricación de la estructura y cerramientos del edificio y 4) Limitar los aspectos incluidos en la etapa de uso del edificio, al consumo de energía primaria necesarios para la operación del edificio. En la figura 3.6, está graficado el método simplificado de Zabalza Bribián con las incorporaciones que se propone: validación del MTE con datos experimentales y el análisis de confort térmico.

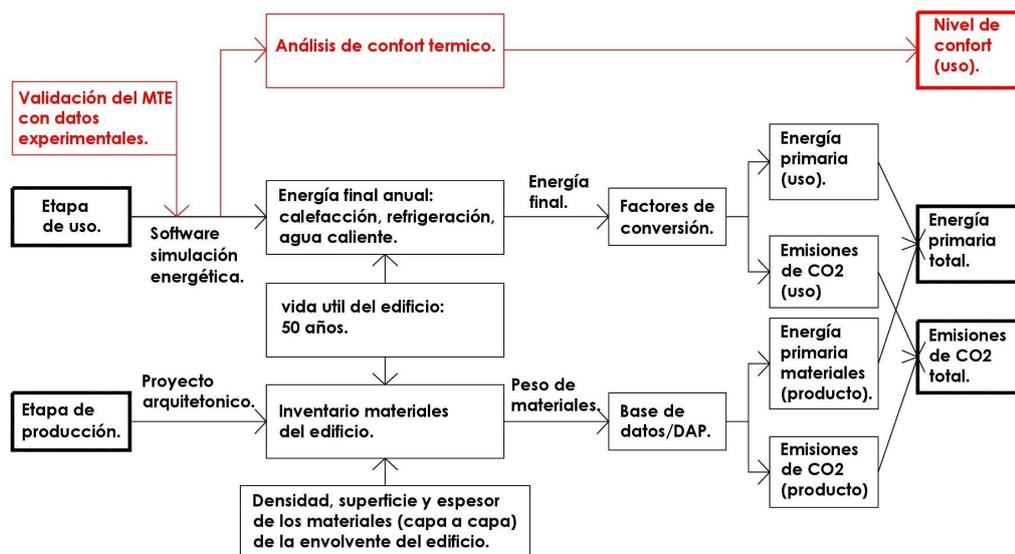


Figura 3.6: Método simplificado de ACV de Zabalza Bribián con las nuevas incorporaciones (en rojo) [Elaboración propia].

En este trabajo, el límite del sistema de los casos de estudio englobará a todos los procesos unitarios del ciclo de vida y se enfocará en el cálculo, evaluación y comparación de las entradas de energía primaria y salidas de emisiones de CO₂ y confort térmico. El criterio de corte, dejará fuera del modelo a los procesos unitarios pocos representativos en la evaluación del impacto ambiental. La extensión temporal para los casos de estudio y propuesta, será estimada en 100 años.

3.2.1.2. Función, unidad funcional y flujo de referencia.

Un sistema del producto puede tener varias funciones y dependen del objetivo y alcance establecido. La función, esta referida a la utilidad que brinda. La unidad funcional, se refiere al desempeño cuantificado de un sistema del producto, para su uso como flujo de referencia. El flujo de referencia, es la medida de las entradas y salidas de los procesos unitarios, en un sistema del producto determinado, requerida para cumplir la función expresada, mediante la unidad funcional.

Para el AECV, la mayoría de los autores (e.g.[3,4,7,10]) utilizan la función de confort térmico, para analizar y evaluar los edificios y definen como unidad funcional, 1 m² de superficie climatizada, y al flujo de referencia como, la cantidad de energía primaria consumida por unidad de superficie (MJ/m²).

El modelo térmico, es un conjunto de sistema del producto o modelo específico para un edificio, con la función de confort térmico.

La tesis plantea la función de confort térmico, con el propósito de estudiar y comparar tres tipologías con el mismo modelo térmico: VSV, VSC y PMVSC. La unidad funcional es 1 m² de superficie habitable mantenida con un rango de confort normativo. Los flujos de referencia son: 1) Entrada: cantidad de energía primaria consumida durante el ciclo de vida (MJ/m²) y 2) Salida: cantidad de emisiones de CO₂ (tCO₂/m²) y nivel de confort térmico (% de horas ocupadas en zonas en confort y desconfort térmico).

3.2.1.3. Las categorías y los métodos de análisis.

Para analizar y evaluar los impactos ambientales, definidos en el objetivo, es necesario seleccionar las categorías y los métodos de análisis. Esto permitirá cuantificarlos, en el análisis de inventario (ver apartado 3.2.2) y calificarlos, en la evaluación de impacto (ver apartado 3.2.3).

Los estudios de ACV, pueden contener desde una a múltiples categorías de evaluación de los impactos. El estudio de AECV, comprende la categoría denominada energía primaria y emisiones de CO₂.

El indicador ambiental denominado Demanda Acumulada de Energía (DAE), permite evaluar los impactos ambientales relacionados con un producto o proceso y se basa en un único parámetro: la demanda total de energía primaria asociada a su producción, transporte, uso y disposición final. Es utilizado en la mayoría de los trabajos (e.g.[3,4,6,7,13]) y facilita la evaluación del modelo por medio de: 1) La energía primaria renovable (hidráulica, solar, eólica, etc.) y no renovable (de origen fósil y nuclear) [equiv. MJ] y 2) La incidencia relativa del consumo de energía primaria de los diferentes procesos [equiv. MJ]. También permite la comparación de modelos con características equivalentes.

El indicador ambiental denominado Potencial de Calentamiento Global (PCG), permite evaluar los impactos ambientales a través de las toneladas equivalentes totales de emisiones de CO₂ y se calcula a partir del consumo de energía (MWh) en toda la vida del edificio. Es utilizado en la mayoría de los trabajos (e.g.[19, 20]).

El indicador ambiental denominado Nivel de Confort Térmico (NCT), permite evaluar las condiciones de confort durante todo el año en las viviendas sociales, por medio del porcentaje de horas ocupadas, divididas en 3 categorías: 1) Categoría A: nivel alto de expectativa, 2) Categoría B: nivel normal de expectativa y 3) Categoría C: nivel de expectativa aceptable. También se definirá el porcentaje de horas en desconfort [21].

En la tesis, para realizar el AECV, se incorpora a la categoría de energía primaria y emisiones de CO₂, el confort térmico. En la etapa de evaluación del impacto ambiental, se utilizará los indicadores ambientales DAE, PCG y NCT, para evaluar y comparar las variables constructivas de los casos de estudio y propuesta de mejora

3.2.2. Análisis del inventario del ACV.

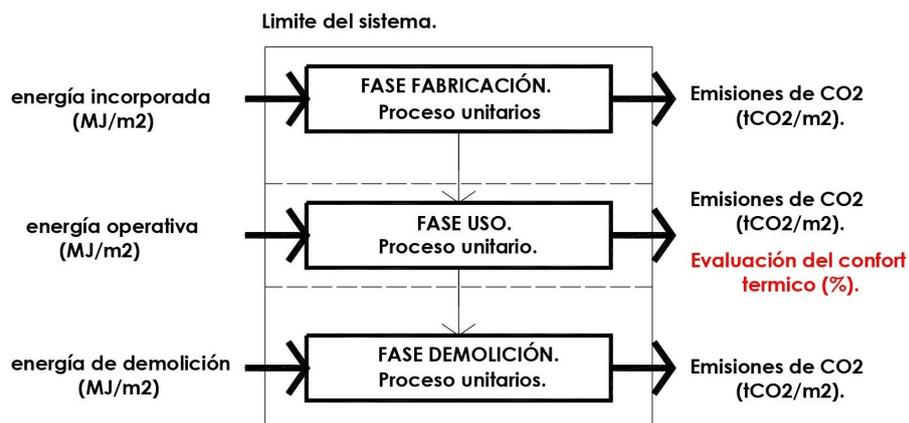


Figura 3.7: Entradas y salidas de los procesos unitarios. En rojo se propone incorporar el nivel de confort térmico [Elaboración propia].

En términos generales, el análisis de inventario implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (de materia y energía) y salidas (de emisiones y residuos), de los procesos unitarios, dentro de un sistema del producto [12].

En el caso del AECV para un edificio, el análisis de inventario implica la recopilación de los datos, la definición de las herramientas y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (de materia y energía) y salidas (de emisiones de CO₂) de los procesos unitarios que conforman el modelo. En la tesis, se agrega la salida en el proceso unitario de climatización del nivel de confort térmico. En la figura 3.7, se describen los flujos elementales y las relaciones secuenciales de los procesos unitarios del presente trabajo.

Antes del cálculo de la energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico, objeto del análisis del inventario, se determinan las cargas térmicas de la tipología arquitectónica, por medio de la simulación térmica del modelo. La carga térmica de una zona, es la energía que hay que introducir o extraer en la misma para mantener ciertas condiciones de temperatura y humedad de confort [15].

Para el cálculo de las cargas térmicas, es necesario conocer previamente diferentes datos que serán incorporados a un entorno gráfico, vinculado a un programa de simulación térmica. Para la carga de datos, se deben completar las siguientes etapas: 1) Geometría y elementos constructivos, 2) Zonificación y condicionantes normativos, 3) Perfil de uso de zonas y 4) Condiciones de contorno. El resultado final del procedimiento determinará las cargas térmicas del modelo térmico (MT) de base.

Los datos de la geometría y los elementos constructivos del cerramiento son particulares para cada a tipología arquitectónica. Sin embargo, para comparar los modelos térmicos es necesario que la zonificación, los datos de uso de zonas y condiciones de contorno sean comunes. Por este motivo, se denomina modelo térmico equivalente (MTE), al que utiliza en la modelización, datos equivalentes con otros modelos, para el cálculo de las cargas térmicas.

Con la simulación del MTE, se han obtenido como resultados las demandas de frío y calor por hora y durante todo un año (kWh año). Estos resultados serán comparados y validados con datos experimentales.

También, se estudian las condiciones de confort térmico alcanzadas, por medio del porcentaje de insatisfechos (PPD) y el voto medio estimado (PMV).

Por último, se calculan los flujos de referencia, en términos de energía primaria (MJ) y emisiones de CO₂ (tCO₂) por unidad de superficie, en el tiempo determinado para el ciclo de vida.

3.2.2.1. Modelización térmica equivalente.

El modelo térmico equivalente (MTE), es el conjunto de procesos unitarios subordinados a la función de confort térmico, que utiliza datos similares a otros MTE en la simulación térmica, para evaluar y comparar el impacto ambiental debido al consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y el nivel confort térmico. El procedimiento de cálculo es el siguiente: 1) Geometría y elementos constructivos, 2) Zonificación y condicionantes normativos, 3) Perfil de uso de zonas y 4) Condiciones de contorno y 5) Cálculo de las demandas de climatización.

- **Geometría y elementos constructivos.**

Debido a la influencia que tienen los cerramientos en el cálculo de la carga térmica de una zona, se deben conocer las dimensiones, sus características térmicas y las condiciones de contorno a las que están sometidos. En este sentido, hay que disponer de la información de:

1. La geometría de los espacios internos:

- Medidas de planta y secciones verticales.
- Espesores de los cerramientos.

2. Las propiedades térmicas de los materiales que integran los cerramientos opacos (muros exteriores e interiores, puertas y forjados):

- Conductividad térmica [W/m.K].
- Densidad [Kg/m³].
- Calor específico [J/kg.K]).

3. Las propiedades térmicas de los materiales que integran los cerramientos semitransparentes (ventanas):

- Transmisividad solar de la radiación normal incidente.
- Reflectividad solar de la radiación normal incidente.
- Transmisividad visible de la radiación normal incidente.
- Reflectividad visible.
- Emisividad de la radiación de larga longitud de onda.
- Transmisividad de la radiación de larga longitud de onda.
- Reflectividad de la radiación de larga longitud de onda.
- Conductividad.

Para representar gráficamente la geometría y cargar los elementos constructivos de las envolventes del modelo térmico de la tipología arquitectónica estudiada, se utilizan los programas GoogleSketchup [22] y EnergyPlus [17] vinculados mediante un plugin.

- **Zonificación y condicionantes normativos.**

La zonificación, es la división de la tipología arquitectónica, en zonas térmicas para determinar la superficie total climatizada. Se define zona térmica al espacio (volumen) que tiene el mismo control de temperatura.

Los condicionantes normativos, se refiere a las normas que rigen para la función establecida. Puntualmente para el confort térmico, en la Argentina está vigente la norma del Instituto Argentino de Racionalización de Normalización (IRAM) N°11659 [23], que establece los valores recomendados para verificar las condiciones higrotérmicas. En la tabla 3.1, se especifican los valores de temperaturas de consigna y en la tabla 3.2, se muestra la cantidad de aire recomendada para ventilación.

Tabla 3.1. Valores recomendados de temperatura en consigna para locales habitables de viviendas [23].

Estación año.	Nivel de confort.		
	Máximo.	Normal.	Mínimo.
Verano	27°C	26°C	24°C
Invierno	21°C	20°C	18°C

Tabla 3.2. Cantidad de aire recomendada para ventilación de locales tipo según intensidad de actividad en verano e invierno [23].

Destino típico del local.	Caudal de aire.		Renovaciones horarias. Ren/hora.	
	Verano.	Verano/Invierno.	Mínimas.	Recomendadas.
	m ³ / minuto persona.	m ³ / minuto persona.		
Vivienda.	0.58	15	1.2	1.5

El MTE de los casos de estudio, deberán tener la misma zonificación (1 comedor y 2 dormitorios) y condicionantes normativos (temperatura de consigna y caudal de aire).

- **Perfil de uso de las zonas.**

El uso de zonas corresponde al consumo energético debido a las ganancias internas de un edificio: 1) Las personas, 2) Las luminarias y 3) Los equipos eléctricos. Además de los elementos constructivos que limitan las zonas y las condiciones climáticas, el consumo energético esta influenciado por el perfil de uso que se le dé a cada zona [15].

Capítulo N°3.

Los perfiles de uso o patrones operativos incluyen los horarios y días de ocupación de las zonas térmicas por los usuarios. Durante la semana están condicionados por las actividades que se dividen en: 1) Laborables: lunes a viernes, 2) Fin de semana: sábados y domingos y 3) Festivos.

Las ganancias internas y perfil de uso de las zonas que se utilizarán en los MTE de los casos de estudios (capítulos N°4 y 5) y propuesta de mejora (capítulo N°6), corresponden al proyecto de investigación, analizado en el capítulo N°2.

- **Condiciones de contorno.**

Las condiciones de contorno buscan representar de la forma más exacta posible la relación que tienen los cerramientos que limitan la vivienda con su entorno. Se pueden presentar dos situaciones de superficies que limitan a: 1) Otra vivienda o zona no climatizada adyacente y 2) Al exterior.

En el primer caso, se plantea como condición de contorno de temperatura idéntica. Supone que las dos superficies de estos cerramientos se encuentran a la misma temperatura, es decir, supone que la zona adyacente tiene las mismas características y condiciones térmicas que la del modelo.

En el segundo caso, los muros del contorno orientados al exterior, están expuesto a condiciones de temperatura, de viento y de sol. El programa de simulación térmica EnergyPlus utiliza el fichero climático EPW (EnergyPlus Weather) para recrear las condiciones climáticas exteriores.

Para la simulación de los MTE de los casos de estudio, se utilizará el fichero climático EPW, confeccionado para cada hora del año, con el programa Meteonorm (ver descripción en apartado 3.3.3). Las temperaturas simuladas por el programa Meteonorm, serán comparadas validadas con los datos climáticos experimentales del proyecto de investigación de la VSC (ver capítulo N°2), para determinar el error absoluto promedio.

- **Cálculo de las demandas de climatización.**

Completada la carga de datos, se calcula las demandas de calefacción y refrigeración por hora y durante todo un año (kWh año). El procedimiento de cálculo es el siguiente:

A1. En los programas vinculados GoogleSketchup [22] y EnergyPlus [17], cargamos la geometría y los elementos constructivos de la tipología arquitectónica.

A2. En el programa EnergyPlus, cargamos los siguientes datos: 1) Localización (incorporamos el fichero climático EPW), 2) Carga de propiedades físicas de los elementos constructivos de las envolventes, 3) Definición de superficies opacas y semitransparentes, 4) Designación de la zona térmica, 5) Asignación temperatura al suelo, 6) Definición grado de infiltración, 7) Carga ganancias internas: personas, luminarias y electrodomésticos y 8) Climatización: consignas para calefacción – refrigeración según normativa [23].

A3. En el programa EnergyPlus procedemos a simular, calibrar y determinar las demandas térmicas de calefacción y refrigeración (kWh año).

3.2.2.2. Validación del MTE con datos experimentales.

Esta es una importante contribución de la tesis al método de ACV. Al comparar datos numéricos y simulados del MTE, se evitan las incertidumbres propias de las simulaciones alejadas de la realidad.

Luego de calibrar y obtener las demandas de climatización con EnergyPlus, los resultados del MTE serán comparados y validados con datos experimentales.

Se propone una comparación más detallada, con el cálculo de dos índices estadísticos estándar utilizados para evaluar el desempeño del modelo numérico: el Error de Parcialidad Media (con sus siglas en ingles MBE: Mean Bias Error) y el Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio (con sus siglas en ingles CV RMSE: Coefficient of Variation of Root Mean Square Error) [38].

El MBE, se define como la suma de errores entre las temperaturas medidas y simuladas en cada intervalo de tiempo. Aunque el MBE representa la diferencia media entre los datos medidos y simulados, los valores positivos pueden compensarse con los valores negativos. Se calcula de la siguiente manera:

$$MBE (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} m_i}$$

Capítulo N°3.

, donde m_i y s_i son las temperaturas medidas y simuladas y N_p es el número de horas correspondientes al período del análisis.

El CV RMSE, determina cómo el modelo se ajusta correctamente a los datos en términos de los tamaños relativos de los residuos al cuadrado y los valores de los resultados. Cuanto menor es el CV, menores son los residuos en relación con el valor predicho. El CV se calcula:

$$CV \text{ RMSE } (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)^2 / N_p}}{\bar{m}}$$

, donde \bar{m} es el promedio de las temperaturas medidas.

El criterio de aceptación estándar utilizado para la calibración de los modelos de Simulación de Rendimiento Energético de Edificios (SREE), es la directriz 14 de ASHRAE [38]. Los límites para el MBE y el CV RMSE, a un intervalo de tiempo de 1 hora, son 10% y 30%, respectivamente.

En el presente trabajo, la validación de los datos experimentales solo se efectuará en la VSC por: 1) Disponer del registro climáticos de 1 año (2008-2009) y 2) Es una tipología predominante en los barrios sociales.

3.2.2.3. Análisis del confort térmico.

Como se comentó en la introducción (ver apartado 3.1), el análisis de confort térmico constituye otra importante contribución de la tesis al método de ACV.

Finalizada la simulación térmica del MTE, estudiamos las condiciones de confort térmico alcanzadas para evaluar la sensación térmica global, por medio del cálculo del Voto Medio Estimado (con sus siglas en inglés PMV: Predicted Mean Vote) y el Porcentaje Estimado de Insatisfechos (con sus siglas en inglés PPD: Predicted Percentage Dissatisfied), según el procedimiento establecido en la norma ISO 7730 [21].

La percepción térmica de una persona depende del balance térmico global del cuerpo, que a su vez es función de los siguientes factores: 1) El nivel de actividad, 2) El uso de ropas y 3) Parámetros ambientales (temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad).

Capítulo N°3.

El disconfort térmico puede ser global (la persona siente calor o frío de forma global) o local (enfriamiento o calentamiento de una parte del cuerpo) y puede ser provocado por los siguientes factores: 1) Asimetría de la temperatura radiante, 2) Las corrientes de aire, 3) El salto térmico vertical del aire y 4) La presencia de suelos fríos o calientes.

El PMV, es un índice que refleja el valor medio de los votos emitidos por un amplio número de personas respecto de una escala de sensación térmica con 7 niveles, al ser sometidos a diferentes ambientes térmicos, basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano:

- Muy frío: - 3°C.
- Frío: -2°C.
- Ligeramente frío: -1°C.
- Neutro (confortable): 0°C.
- Ligeramente caluroso: +1°C.
- Caluroso: +2°C.
- Muy Caluroso: +3°C.

Este equilibrio se obtiene cuando la producción interna de calor del cuerpo es igual a su pérdida hacia el ambiente, que se regula por la temperatura de la piel, la transpiración, el sudor y la respiración. El cálculo del PMV, permite estimar la sensación térmica del cuerpo humano en su conjunto a partir de la estimación o medición de los parámetros que condicionan el equilibrio térmico global del cuerpo: tasa metabólica del sujeto, aislamiento de la ropa, temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad relativa del aire y humedad del aire. La norma ISO 7730 [21] contiene la fórmula para el cálculo del PMV y tablas para ello. Se puede obtener mediante herramientas informáticas como la desarrollada por la Universidad de Berkeley (CBE Thermal Comfort Tool) [24].

El PPD, es un índice que suministra información acerca de la incomodidad o insatisfacción térmica, mediante la predicción cuantitativa del porcentaje de personas que, probablemente, sentirán demasiado calor o demasiado frío en un ambiente determinado. Conforme con la norma ISO 7730 [21], los valores para proporcionar bienestar térmico global al 90% de los trabajadores comprenden un valor de PPD < 10%. Una vez obtenido el PMV, se calcula el PPD a través de la siguiente expresión:

$$PPD=100 - 95 \exp (-0,03353 PMV^4 - 0,217 PMV^2)$$

Tabla 3.3. Parámetros seleccionados para el cálculo de PPD y PMV.

Parámetros Zonas.	La vestimenta: (Clo)		Estado metabólico: (met)	Velocidad del viento: (m/s)
	Invierno.	Verano.		
Estar comedor.	1	0.3	1.2	0.1
Dormitorio norte.	1.5	0.5	0.7	0.1

La tabla 3.3, muestra los parámetros requeridos para el cálculo de PPD y PMV.

La norma ISO 7730 [21] incluye los requisitos recomendados para el bienestar térmico, tanto los relativos al bienestar general como al inconfort térmico local. En este sentido, debemos estudiar las condiciones de confort durante todo el año. Para ello, se calcula el porcentaje de horas ocupadas de cada zona de PPD y PMV, según las siguientes categorías de confort térmico:

- Categoría A: PPD < 6% y PMV entre -0.2 y 0.2. Alto nivel de expectativa. Para espacios ocupados por personas muy sensibles y frágiles con necesidades especiales.
- Categoría B: PPD < 10% y PMV entre -0.5 y 0.5. Nivel normal de expectativa. Para nuevos edificios y renovaciones.
- Categoría C: PPD < 15% y PMV entre -0.7 y 0.7. Nivel de expectativa aceptable y moderada. Puede usarse para edificios existentes.

3.2.2.4. Caracterización de energía primaria y emisiones de CO₂.

Los resultados del inventario del ciclo de vida deben estar en unidades comunes para ser comparados y evaluar la importancia del impacto. La energía del ciclo de vida (descrita en el capítulo N°1), debe estar expresada en términos de energía primaria (MJ) y emisiones CO₂ (tCO₂). La tabla 3.4, muestra los factores de conversión de energía primaria y emisiones de CO₂ para la región noroeste de Argentina (NOA). A continuación, se describen los cálculos para su obtención.

Tabla 3.4. Factores de conversión para el NOA.

Fuente de energía.	Energía final a emisiones de CO ₂ (tCO ₂ eq/kWh)	Energía final a energía primaria (kWh/kWh).
Electricidad.	1.00	4.18

- **Conceptos básicos de energía primaria y final.**

La electricidad llega a nuestros hogares luego de un camino compuesto por 4 etapas: generación, transporte, transformación y distribución.

La energía primaria, es toda forma de energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada. Constituye la energía contenida en los combustibles crudos, la energía solar, la eólica, la geotérmica y otras. Si no es utilizable directamente, debe ser transformada en una fuente de energía secundaria (electricidad, calor). Las unidades son MWh o MJ.

La energía final, se define como la cantidad de recursos energéticos consumidos en los procesos que utilizan energía para obtener un bien concreto o un servicio de uso final. Las unidades son MWh o MJ.

Por ejemplo, en el caso de la resistencia eléctrica, la energía primaria, sería el combustible que utilice la central térmica necesaria para producir la electricidad consumida por la resistencia. Incluye todas las pérdidas desde el consumo de combustible en la central hasta que llega la electricidad a la vivienda: rendimiento de la central, transformadores y transporte. La energía final, sería el consumo de electricidad transformada en calor. La resistencia eléctrica colocada en el local no tiene pérdidas. Toda la electricidad consumida se transforma en calor por efecto Joule.

- **Cálculo del factor de conversión para emisiones de CO₂ (tCO₂/MWh), en el punto de consumo.**

El procedimiento de cálculo del factor de conversión para emisiones de CO₂, en el punto de consumo es el siguiente:

A. Determinar la producción total por tecnología del mix de generación para la región Noroeste del Informe anual 2019 – generación mensual 2018-2019 – CAMMESA [25]: Biogás: 80.47 MWh, Biomasa: 253371.31 MWh, Eólica: 219242.10 MWh, PV: 295522.70 MWh, Hidro<50MW: 887074.72 MWh, Diesel: 991534.16 MWh, Hidráulica: 281545.24 MWh, Turbina de Gas: 13505103.5 MWh y Turbina de Vapor: 7595049.88 MWh. El total de producción del mix de generación para la región Noroeste: 24028524.02 MWh.

Capítulo N°3.

La producción durante el periodo 2018-2019, por tecnología del mix de generación para la región Noroeste, se concentran en Turbo Gas (56.20%) y Turbo Vapor (31.60%), que representan el 88 % del total.

B. Aplicar los factores de emisión a cada tecnología, para obtener las emisiones de CO₂ totales se utiliza el Informe de la Red Eléctrica de España [26]. Las generaciones Diesel (698691.69 tCO₂), Turbo Gas (13614127.5 tCO₂) y Turbo Vapor (6836421.81 tCO₂), representan el 100% de las emisiones del mix eléctrico: 21149241 tCO₂.

C. Obtener el Factor de emisión tCO₂/MWh, en Borna de Central:

Emisiones totales de tCO₂ / Total de producción de mix de generación.

21149241 tCO₂ / 24028524.02 MWh = 0.88017229 tCO₂/MWh.

D. Obtener el Factor de conversión en tCO₂/MWh, en el Punto de Consumo:

Pasar de borna de central a punto de consumo:

Factor de emisión tCO₂/MWh en Borna de Central x coeficiente de pérdida del IDAE-Anexo III [27]:

$$0.88017229 \times 1.1381 = 1.00 \text{ tCO}_2/\text{MWh}.$$

- **Cálculo del factor de conversión MWh para energía primaria (MWh/MWh), en punto de consumo.**

El procedimiento de cálculo del factor de conversión de energía primaria, en punto de consumo es el siguiente:

A. Determinar las emisiones específicas tCO₂/L o Nm³:

Diesel 0.00279 tCO₂/L, Turbo Gas y Turbo Vapor (Gas Natural): 0.00215 Nm³.

B. Determinar Poder Calorífico Superior (MWh/L o MWh/Nm³):

Diesel 0.01018 MWh/L, Turbo Gas y Turbo Vapor (Gas Natural): 0.00902 MWh/Nm³.

C. Determinar el consumo de combustible (L o Nm³):

Emisiones totales Diesel, TG o TV tCO₂/ emisiones específicas tCO₂/L o Nm³:

Diesel: 250427131 L, Turbo Gas: 6332152304 m³ y Turbo Vapor: 3179731075 m³.

D. Determinar la Energía Primaria (MWh):

PCI (MWh/L o MWh/Nm³) x Consumo de CB (L o Nm³)

Capítulo N°3.

Diesel: 2549348.2 MWh, Turbo Gas: 57116013.8 MWh y Turbo Vapor: 28681174.3 MWh.

E. Obtener el Factor de Conversión MWh Energía Primaria / MWh electricidad en punto de consumo:

$(2549348.2 \text{ MWh} + 57116013.8 \text{ MWh} + 28681174.3 \text{ MWh}) / 24028524.02 \text{ MWh}$ (total producción mix eléctrico NOA) $\times 1.1381$ (coeficiente de pérdida IDEA-Anexo III) = 4.18 MWh Eprimaria / MWh Efinal.

3.2.2.5. Cálculo de energía primaria y emisiones de CO₂.

Es este apartado, se describirán los procedimientos de cálculo, para determinar los flujos de referencia de los procesos unitarios que integran el MTE, para la función confort térmico y la unidad funcional de 1 m² de superficie total climatizada, determinadas en el alcance. Los flujos de referencia de entrada corresponden a la energía primaria (MJ/m²) y los de salida a las emisiones de CO₂ (tCO₂/m²). La salida de nivel de confort térmico, del proceso unitario de climatización, fue determinada en el apartado 3.2.2.3.

Los procesos unitarios, fueron ordenados en función de la evolución del ciclo de vida y divididos según la energía que consumen: incorporada, operativa y de demolición. En la figura 3.8, se describen los procesos unitarios utilizados en los MTE de los casos de estudio y propuesta de mejora, ordenados de manera secuencial y por tipo de energía que consumen: 1) Fase fabricación: energía incorporada, 2) Fase uso: energía operativa y 3) Fase demolición: energía de demolición.

Los factores de conversión, se aplicarán a la energía final y emisiones de CO₂ de los siguientes procesos unitarios: 1) Maquinarias de construcción (herramientas eléctricas de albañilería) y 2) Climatización (calefacción y refrigeración).

Los resultados obtenidos con la base de datos BEDEC [14], en los procesos unitarios de producción de materiales y pérdidas de materiales, fueron determinados directamente en energía primaria y emisiones de CO₂.

A continuación, se describe el procedimiento de cálculo para determinar el consumo de energía primaria y emisiones de CO₂, de los procesos unitarios que integran el ciclo de vida del edificio, discriminados por energía incorporada, operativa y de demolición.

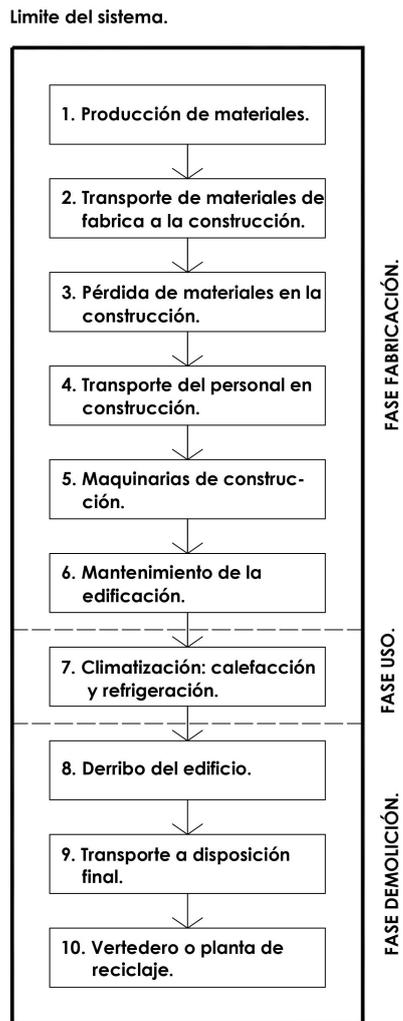


Figura 3.8: Procesos unitarios del ciclo de vida del MTE [Elaboración propia].

1. Energía incorporada.

Comprende el consumo de energía primaria (MJ) y emisiones de CO₂ (tCO₂), por metro cuadrado de superficie total climatizada, cada 100 años, de los siguientes procesos unitarios: 1) Producción de materiales, 2) Transporte de materiales de fábrica a la construcción, 3) Pérdida de materiales en construcción, 4) Transporte del personal en construcción, 5) Maquinarias en construcción y 6) Mantenimiento de la edificación (ver figura 3.8)

- **Producción de materiales.**

Son los procesos unitarios necesarios para la fabricación del elemento constructivo: 1) Extracción de materia prima, 2) Transporte del origen a la fábrica y 3) Transformación en fábrica. Para el cálculo se utilizó la base de datos BEDEC [14], que divide los

Capítulo N°3.

elementos constructivos (codificados) en: a) Elemento básico, b) Elemento auxiliar, d) Elemento unitario y e) Elemento complejo. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

A1. Dividir en componentes constructivos la tipología arquitectónica: a) Envoltente superior, b) Envoltente inferior, c) Envoltente vertical, d) Carpintería y e) Artefactos eléctricos. Se entiende por componente constructivo, a todos los planos horizontales y verticales del edificio.

A2. Medir los elementos constructivos originales, que integran cada componente constructivo. Se entiende por elemento constructivo originales, a cada material que forma parte del componente constructivo en la tipología arquitectónica medida.

A3. Asociar por similitud a los elementos constructivos originales y los que dispone la base de datos BEDEC.

A4. Relacionar los elementos constructivos originales medidos, con las unidades de medida que figuran en la base de datos BEDEC.

A5. Determinar para cada material (asociado) en la base de datos BEDEC, el coste energético (MJ) y el valor de las emisiones CO₂ (tCO₂), por unidad de medida, calculados sobre el total medido.

A6. Determinar el coste energético (MJ) y el valor de las emisiones (tCO₂) total por metro cuadrado de superficie total climatizada en 100 años.

- **Transporte de materiales de fábrica a la construcción.**

Involucra al transporte del elemento constructivo, desde la fábrica o cantera, hasta la obra. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

A1. Definir el elemento constructivo y el peso del material (kg/m³).

A2. Determinar la distancia media y consumo de diésel. Se consideraron 2 distancias y transportes: a) Urbano: camión mediano (tipo IVECO) de 10 toneladas, con un consumo medio de 15 litros diésel cada 100 km, con un volumen 6 m³, que cubre una distancia máxima de 15 km, dentro de la ciudad y b) Interurbano: camión pesado (tipo IVECO) de 16 toneladas, con un consumo medio de 25 litros diésel cada 100 km, con un volumen de 15 m³, que comprende distancias mayores a 15 km, entre ciudades o provincias.

Capítulo N°3.

A3. Determinar la energía primaria (MJ) por m² de superficie total climatizada.

$EP = [\text{Consumo litros (Diésel)} \times 0.01018 \text{ MWh/litro (Poder Calorífico Superior)}] \times 3.6 / \text{superficie total climatizada} = \text{MJ/m}^2 \text{ en 100 años.}$

A4. Determinar las emisiones específicas tCO₂/L diésel por m² de superficie total climatizada.

$EM = [\text{Consumo litros (Diésel)} \times 0.00279 \text{ tCO}_2/\text{litro (Factor de emisión)}] / \text{superficie total climatizada} = \text{tCO}_2/\text{m}^2 \text{ en 100 años.}$

- **Pérdida de materiales en construcción.**

Corresponde al elemento constructivo que se derrocha en la construcción. Los factores que inciden en el derroche son: vencimiento, roturas, pérdidas en el almacenamiento, cortes de adecuación y manipulación en el transporte interno de la obra. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

A.1. Aplicar el factor de residuo a la cantidad total de los elementos constructivos medidos, con posibilidad de pérdida. En base a la experiencia constructiva, las principales pérdidas de materiales en obra son: 1) Revestimiento frágiles (5%), 2) Ladrillo y piezas de morteros (2%) y 3) Hormigón y aportación de tierras y granulados (1%).

A2. Determinar para cada elemento constructivo el coste energético (MJ) y el valor de las emisiones CO₂ (tCO₂), por unidad de medida, calculados sobre el total medido.

A3. Determinar el coste energético (MJ) y el valor de las emisiones CO₂ (tCO₂) total por metro cuadrado de superficie total climatizada en 100 años.

- **Transporte del personal en construcción.**

Abarca al transporte en días laborables de los operarios que intervienen en los diferentes trabajos, desde la residencia hasta el emplazamiento de la construcción. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

A1. Determinar la distancia media y consumo en combustible (gasolina). Se consideró como medio de transporte personal la moto de uso más frecuente: 125 cc con un consumo medio por ciudad de 3,5 litros cada 100 km. El tiempo programado para la ejecución completa de cada vivienda, es de 6 meses aproximadamente, desde el

Capítulo N°3.

movimiento de suelo hasta las terminaciones. Durante este lapso se consideró la participación de un oficial y un ayudante, que se movilizaron en vehículos independientes (moto de 125 cc), de lunes a viernes, realizando un viaje medio de 10 km y considerando la distancia de ida y vuelta. En total completaron 120 viajes con una distancia recorrida de total de 1200 km, cada uno.

A2. Determinar la energía primaria (MJ) por m² de superficie total climatizada

$EP = [\text{consumo litros (gasolina)} \times 0.0089 \text{ MWh/litro (poder calorífico superior)}] \times 3.6 / \text{superficie total climatizada} = \text{MJ/m}^2 \text{ en 100 años.}$

A3. Determinar las emisiones CO₂ (tCO₂) por m² de superficie total climatizada.

$EM = [\text{Consumo litros (Gasolina)} \times 0.00226 \text{ tCO}_2 \text{ tCO}_2/\text{litro (Factor de emisión)}] / \text{superficie total climatizada} = \text{tCO}_2/\text{m}^2 \text{ en 100 años.}$

- **Maquinarias en construcción.**

Comprende a las herramientas eléctricas y maquinarias con consumo de diésel, utilizadas durante la ejecución de los trabajos de la obra, estimados en un tiempo de 6 meses.

- **Herramientas eléctricas para albañilería.**

Corresponde a las herramientas eléctricas básicas empleadas para la ejecución de los componentes constructivos: hormigonera (550W), vibradora de concreto (1500W), cortadora de mosaico (1200W), soldadora (5500W), amoladora (2000W), taladro (1500W). El procedimiento de cálculo es el siguiente:

A1. Definir tipo de maquinaria y potencia en vatios (Watt).

A2. Definir consumo diario (kWh).

$CD = (\text{Potencia maquinaria} \times \text{horas día}) / 1000 = \text{kWh.}$

A3. Definir consumo mensual (kWh/mes).

$CM = \text{consumo diario (kWh)} \times \text{cantidad de días} / \text{cantidad de meses} = \text{kWh.}$

A4. Determinar Energía Primaria (MJ).

$EP = \text{energía final (kWh)} \times 4.18 \text{ (factor de conversión energía primaria/ electricidad en punto de consumo)} \times 3.6 = \text{MJ en 100 años.}$

A5. Determinar Emisiones (tCO₂).

EM= energía final (kWh) x 1.00 (factor de conversión en tCO₂/EP en punto de consumo)
/ 1000 = tCO₂ en 100 años.

○ **Maquinaria.**

Se refiere a la maquinaria con motor a combustión (diésel), utilizada para movimientos de suelo y manipulación de diferentes cargas en la construcción: áridos, tosca, tierra, grava, escombros. El modelo utilizado es la multicargadora CAT 216B3. Potencia neta 51 hp 38 kW, capacidad de operación: 635 kg, peso en orden de trabajo: 2581 kg, consumo: 3.98–5.69 (4.84) litros diésel/hora. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

B1. Determinar los litros de diésel consumidos.

El tiempo estimado en obra para realizar tareas de movimiento de suelos: 24 horas x 4.84 litros/hora = 116.16 litros.

B2. Determinar la energía primaria (MJ).

EP = consumo litros (diésel) x 0.01018 MWh/litro (poder calorífico superior) x 3.6 = MJ en 100 años.

B3. Determinar las emisiones específicas tCO₂/L diésel.

EM = consumo litros (diésel) x 0.00279 tCO₂/litro (factor de emisión) = tCO₂ en 100 años.

● **Mantenimiento de la edificación.**

Involucra los trabajos de mantenimiento de los componentes constructivos, durante el uso del edificio, estimados en 100 años. Según datos locales y por la propia experiencia del tesista en construcción, los principales trabajos de mantenimiento en vivienda sociales son: 1) Reparación de revoques por desprendimientos o aparición de humedades, 2) Pintura, 3) Cambio de luminarias, 4) Reparación o reposición de equipos de climatización y 5) Reparación de cubierta. La incidencia en el ciclo de vida es baja (<1%).

2. Energía operativa.

Comprende el consumo de energía primaria (MJ) y emisiones CO₂ (tCO₂), por metro cuadrado de superficie total climatizada, cada 100 años, del proceso unitario de climatización (ver figura 3.8).

- **Climatización: calefacción y refrigeración.**

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

A1. Definir la energía final (kWh), mediante la relación de las demandas mensuales (de calefacción – refrigeración) y los coeficientes de eficiencia de la bomba de calor: 1) 2.5 Coeficiente de Rendimiento (en ingles Coefficient of Performance -COP) y 2) 2.2 Relación de Eficiencia Energética (en ingles Energy Efficient Ratio - EER).

A2. Determinar la energía final (kWh) por m² de superficie total climatizada.

EF= energía final (kWh año) / superficie total climatizada (m²) = kWh / m².

A3. Determinar energía primaria (MJ/m²) en tiempo del ciclo de vida.

EP=energía final / m² (kWh) x 4.18 (Factor de conversión energía primaria/ electricidad en punto de consumo) x 100 (cantidad de años) x 3.6 = MJ/m² 100 años.

A4. Determinar emisiones CO₂ (tCO₂) en tiempo del ciclo de vida.

EM= energía final / m² (kWh) x 1.00 (Factor de conversión en tCO₂/EP en punto de consumo) x 100 años / 1000 = tCO₂/m² 100 años.

3. Energía de demolición.

Comprende el consumo de energía primaria (MJ) y emisiones CO₂ (tCO₂), por metro cuadrado de superficie total climatizada en 100 años, de los siguientes procesos unitarios: 1) Derribo del edificio, 2) Transporte a disposición final y 3) Vertedero o planta de reciclaje (ver figura 3.8).

- **Derribo del edificio.**

Corresponde a la maquinaria utilizada para el derribo de la edificación, al final del ciclo de vida.

- **Transporte a disposición final.**

Se refiere al transporte utilizado para movilizar los escombros desde el lugar de la edificación hasta el vertedero (planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos). El procedimiento de cálculo es el siguiente:

A1. Definir el elemento constructivo y el peso del material (kg/m³).

A2. Determinar la distancia media y el consumo de combustible. Se considero la distancia de ida y vuelta para cada viaje, desde el sitio de la edificación hasta el vertedero municipal (26 km en total). El transporte utilizado corresponde a un camión mediano (tipo IVECO) de 10 toneladas, con un consumo medio de 15 litros diésel cada 100 km, con un volumen 6 m³, que cubre una distancia máxima de 15 km, dentro de la ciudad. Se eligió este transporte por sus dimensiones y maniobrabilidad en áreas urbanas. Por lo general, los proveedores de materiales de construcción de SFDVDC, se inclinan por este vehículo, por la operatividad en los repartos.

A3. Determinar la energía primaria (MJ) por m² de superficie total climatizada.

$EP = [\text{consumo litros (diésel)} \times 0.01018 \text{ MWh/litro (poder calorífico superior)}] \times 3.6 / \text{superficie total climatizada} = \text{MJ/m}^2 \text{ en 100 años.}$

A4. Determinar las emisiones específicas tCO₂/L diésel por m² de superficie total climatizada.

$EM = [\text{consumo litros (diésel)} \times 0.00279 \text{ tCO}_2/\text{litro (factor de emisión)}] / \text{superficie total climatizada} = \text{tCO}_2/\text{m}^2 \text{ en 100 años.}$

- **Vertedero o planta de reciclaje.**

Comprende los procesos unitarios involucrados en el tratamiento final de los residuos de la construcción. Actualmente la Municipalidad de San Fernando del Valle de Catamarca [28], realiza de forma incipiente, la separación diferenciada de residuos sólidos en origen. En la planta, por medio de cooperativas, separan las 200 toneladas diarias que ingresan en orgánico e inorgánico. El cartón y plástico lo envían a organizaciones sin

finés de lucro (ONG) e industrias papeleras. Con respecto a los materiales de construcción, los mismos son depositados directamente en el vertedero, sin ningún tipo de tratamiento.

El reciclado consiste en procesar un residuo de la construcción para utilizarlo como materia prima. Para su elaboración es necesario un Plan de Gestión Municipal para Reciclaje (PGMR) que contemple la clasificación, transporte, tecnología en la planta de reciclaje y un mercado que los demande. Los residuos de hormigón y cerámicos son reciclados para ser utilizados principalmente como áridos. Entre los principales beneficios ambientales podemos mencionar: 1) Disminución de escombros depositados en el vertedero y 2) Reducción del número de explotaciones necesarias para suministrar materia prima y protección de los recursos naturales. Sin embargo, no se observa un estudio del consumo energético y emisiones de CO₂ para el reciclaje [29]. Por otro lado, la reutilización, consiste en incorporar directamente los residuos en la construcción sin ningún tratamiento. Por lo general, son iniciativas escasas por lo dificultoso que resulta construir con productos descartados [30].

En la tesis, no se tendrá en cuenta el consumo de energía primaria (MJ) y emisiones CO₂ (tCO₂), de los residuos de la construcción por: 1) Resulta difícil predecir cuándo estará habilitado el PGMR por el Municipio de Catamarca, 2) No se encontró estudios comparativos que justifiquen el ahorro de energía en el reciclado de materiales y 3) En el contexto latinoamericano, la energía incorporada debida al desperdicio de materiales de la construcción en el ciclo de vida, es insignificante (1%), a diferencia del europeo donde es considerable (5%).

3.2.3. Evaluación de impacto del ACV.

La evaluación de impacto, tiene como propósito valorar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales, utilizando los resultados del análisis de inventario. Este proceso implica la asociación de los datos del inventario con la categoría de impactos ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías para entender estos impactos [12].

Por otro lado, proporciona información para la etapa de interpretación y puede incluir un proceso interactivo de revisión del objetivo y del alcance, para determinar si se ha cumplido con los objetivos del mismo, o para modificar el objetivo y el alcance si la evaluación indica que no se puede alcanzar [12].

En el caso particular de la tesis, los impactos potenciales son el consumo de energía primaria, las emisiones de CO₂ y el confort térmico del modelo, durante el ciclo de vida. En esta etapa, se evalúan y comparan los impactos ambientales de cada proceso unitario, calculados en el análisis de inventario, para determinar la importancia relativa de cada uno en el conjunto. Esto permitirá aplicar el criterio de corte, para excluir del modelo a los procesos unitarios de poca relevancia. Los procesos unitarios significativos, serán estudiados en la etapa de interpretación, para establecer medidas tendientes a reducirlos.

3.2.3.1. Balance global y comparación del MTE.

El balance global del MTE, consiste en evaluar los impactos ambientales, parciales y totales, producido por el consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y el confort térmico de los procesos unitarios de la vivienda social. En este sentido, utilizaremos los indicadores ambientales establecidos en la etapa de objetivo y alcance (ver apartado 3.2.1.1): 1) Demanda Acumulada de Energía (DAE), 2) Potencial de Calentamiento Global (PCG) y 3) Nivel de Confort Térmico (NCT).

La tabla 3.5, muestra las variables y los indicadores utilizados para evaluar la magnitud de los impactos ambientales para un tiempo de 100 años. Por ejemplo, en la variable componentes constructivos, podemos identificar cual es la envolvente (techo, piso, pared) con mayor consumo de energía primaria y emisiones de CO₂. Con respecto, a los elementos constructivos, determinamos cual material tiene mayor impacto ambiental. En el caso de climatización, se identifican los meses con mayor demanda de calefacción y refrigeración. Por último, en el confort térmico, se dimensionan las zonas confortables y en disconfort.

Tabla 3.5. Variable e indicadores ambientales para un periodo de 100 años.

Variable ambiental.	Indicador ambiental.		
	DAE	PCG	NCT
	Energía primaria.	Emisiones de CO ₂ .	Horas ocupadas en zonas.
	MJ/m ² 100 años.	tCO ₂ /m ² 100 años.	% 100 años.
Procesos unitarios.	o	o	
Componentes constructivos	o	o	
Elementos constructivos	o	o	
Climatización.	o	o	
Confort térmico.			o

Capítulo N°3.

Además de identificar los impactos ambientales relevantes en las variables, por medio de la aplicación de los indicadores, en esta etapa se determinarán las causas que los originan. Esto permitirá, en la etapa de interpretación, encontrar las soluciones para reducirlos.

La evaluación del impacto ambiental se determina por medio de la aplicación de indicadores ambientales a las variables elegidas. Además de efectuarse en el propio modelo, se puede realizar entre modelos equivalentes (ver apartado 3.2.2.1), comparando las magnitudes (MJ/m^2 / tCO_2/m^2 / % de horas ocupadas en confort o discomfort térmico). Esto tiene la ventaja de evaluar sistemas constructivos completos e identificar las causas que promueven el impacto ambiental.

En este trabajo, se plantea realizar la comparación de los MTE de las VSV y VSC, en el capítulo N°5. En el capítulo N°6 se realizará la comparación de las PMVSC con las VSV y VSC (caso base).

3.2.4. Interpretación del ACV.

La interpretación, es la etapa del ACV, en la cual los hallazgos del análisis del inventario y de la evaluación de impacto, se consideran juntos, en sintonía con el objetivo y el alcance, para llegar a conclusiones que expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones [12].

En el caso del consumo de la energía primaria, emisiones de CO_2 y confort térmico, las recomendaciones deben estar orientadas a: 1) Explicar los procesos unitarios que tienen el mayor impacto y 2) Proponer estrategias pasivas o activas para favorecer la eficiencia energética.

El análisis de sensibilidad, nos permite reducir los impactos ambientales más relevantes del MTE, identificados en la evaluación del impacto, por medio de estrategias pasivas y activas. Esto implica para cada medida de mejora, aplicar el método de ACV.

En el caso de la tesis, se plantea realizar el análisis de sensibilidad a la VSC (unidad de referencia), por medio de estrategias pasivas y activas en el capítulo N°6.

3.3. Instrumentos de cálculo del ACV.

En esta sección, planteada en tres partes, se describen las principales herramientas para evaluar el impacto ambiental de los edificios durante el ciclo de vida, en particular la energía incorporada - operativa y emisiones de CO₂. En primer lugar, en el apartado 3.3.1, se definen los métodos para la certificación ambiental, cuyo principal objetivo es mejorar la imagen comercial de los edificios. En segundo lugar, en el apartado 3.3.2, se describe las herramientas de cálculo de la energía incorporada y emisiones de CO₂ de los elementos constructivos. En tercer lugar, en el apartado 3.3.3, se estudiará las herramientas de cálculo de la energía operativa y emisiones de CO₂, de las demandas de climatización.

3.3.1. Métodos para la certificación ambiental de edificios.

Los métodos para la Certificación Ambiental de Edificios (CAE), surgieron con la Agenda 21 a comienzo de la década de los 90. Actualmente, existen más de 70 herramientas para la evaluación de la sostenibilidad en el mundo, que trabajan por medio de sistemas de indicadores ambientales, con diferentes bases de datos. Las más conocidas son LEED, BREEAM y GBC [13].

Las razones que llevan a su utilización son: 1) Aumento del valor del edificio, 2) Reducción del gasto de operación (agua y energía), 3) Mejora de la imagen, marketing, 4) Mejora de la productividad de los ocupantes del edificio y 5) Reducción del absentismo del personal. En la tabla 3.6, se realiza una breve descripción de las herramientas más conocidas para la evaluación de la sostenibilidad de las construcciones.

Estas herramientas pueden resultar muy útiles para dar a los edificios valores medibles y comparables. Presentan las siguientes dificultades [13]: 1) La gran variedad de herramientas no favorece la implantación, además presentan incertidumbre y cierta subjetividad durante la selección de criterios, indicadores y su normalización, 2) La ausencia de un consenso global y estandarizaciones lleva a que cada sistema evalúe de acuerdo a su propio criterio, 3) Es imprescindible la adaptación de los modelos a las condiciones locales de cada país y región para una utilización verdaderamente efectiva.

Tabla 3.6. Descripción de las herramientas más conocidas [13].

Herramienta.	Característica.	Funcionamiento.	Categorías de impacto.	Proceso de certificación.
LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). https://www.argentinagbc.org.ar/	Es un programa de certificación voluntario destinado a potenciar y promover la eficiencia en los edificios sostenibles. Evalúa el impacto ambiental en 6 categorías. Permite incrementar el valor de los edificios. Utiliza un sistema de puntuación para certificar.	El Consejo de Construcción Verde contrasta los edificios con criterios establecidos por el sistema de certificación para otorgar calificación en niveles: plata, oro o platino.	1) Sostenibilidad del emplazamiento, 2) Eficiencia en el uso del agua, 3) Energía y atmósfera, 4) Materiales y recursos y 5) Calidad del aire interior.	1) Aplicabilidad, 2) Registro, 3) Preparación de la aplicación para la certificación, 4) Envío de la documentación, 5) Revisión y 6) Certificación.
BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology). www.breeam.es	Es un método de evaluación y certificación para mejorar el nivel de sostenibilidad de la edificación. Evalúa impactos en 10 categorías. Para certificar utiliza un sistema simple de puntuación.	La estructura orgánica está compuesta por: 1) Consejo de gobierno, 2) Consejo asesor, 3) Grupos de trabajo, 4) Asesores acreditados y 5) Entidad gestora.	1) Gestión, 2) Salud y bienestar, 3) Energía, 4) Transporte, 5) Agua, 6) Materiales, 7) Residuos, 8) Uso del suelo y ecología, 9) Contaminación y 10) Innovación.	1) Registro BREEAM, 2) Diseño del nuevo edificio, 3) Certificado provisional sobre el diseño, 4) Construcción, 5) Certificado BREEAM.
VERDE (Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios). www.gbce.es	VERDE es la herramienta de evaluación ambiental de edificios que nace como regionalización de GBTool desarrollada por la organización internacional Green Building Challenge. Se basa en un método de reducción de impactos por cuantificación.	La metodología VERDE está basada en una aproximación al análisis de ciclo de vida mediante la reducción de los impactos del edificio. El proceso de evaluación requiere definir una escala de rendimientos y puntuaciones para establecer criterios de ponderación.	1) Parcela y emplazamiento, 2) Energía y atmósfera, 3) Recursos naturales, 4) Calidad del ambiente interior, 5) Calidad del servicio, 6) Calidad del servicio y 7) Aspectos sociales y económicos.	1) Registro previo del edificio, 2) Evaluación VERDE realizada por un evaluador acreditado, 3) Solicitud de certificación, 4) Supervisión técnica, 5) Propuesta de certificación, Emisión de certificación.

En 1993, se funda en Estados Unidos, US Green Building Council, organización destinada a promover el diseño sostenible. USGBC ha desarrollado un sistema de certificación de edificios sustentable conocido como LEED (Leadership in Energy & Environmental Design), estableciendo estándares, niveles y pruebas para distintos tipos de edificios, nuevos y existentes [31]. Argentina Green Building Council [32], es una organización no gubernamental, sin fines de lucro, constituida en la ciudad de Buenos Aires en el año 2007, cuyo accionar es de alcance nacional y regional con participación a nivel global. Opera bajo licencia World Green Building Council, entidad que nuclea a los Consejos Green Building y, que conforma la mayor organización con carácter internacional en la construcción sustentable. Entre otras actividades, incentiva la implementación de certificación LEED, estándar que posee el mayor reconocimiento de prestigio y logros obtenidos, en el país y el mundo. La certificación LEED (que tiene una tarifa para quien la contrate) proporciona una verificación independiente del rendimiento de un edificio y permite validar los logros mediante un proceso de revisión externo. Con respecto a la

AECV, podemos destacar la certificación de: 1) El uso eficiente de la energía y de las energías renovables y 2) La conservación de materiales y recursos.

Estas herramientas resultan de mucha utilidad para reducir el impacto ambiental de la edificación. En el caso particular del consumo energético del sector residencial, deberían ser aplicables por normativa. También es importante destacar que evalúan las energías incorporadas y operativas en el ciclo de vida de los edificios. Por el momento los principales clientes de estas certificadoras internacionales son corporaciones con alto poder adquisitivo que buscan una imagen "sustentable", con el propósito de mejorar sus ventas, en un contexto muy distinto al de las viviendas sociales.

3.3.2. Herramienta de cálculo de energía incorporada y emisiones de CO₂.

Luego de realizar la medición de los materiales que integran los cerramientos del edificio, en el análisis de inventario, se debe calcular su energía primaria y emisiones de CO₂, mediante la utilización de programas de base de datos.

Debido a la gran complejidad de los cálculos y aprovechando los desarrollos tecnológicos, en los últimos años se han perfeccionado herramientas informáticas, basadas en la fase de evaluación de impacto. La función básica del programa es que, una vez seleccionados los datos en la etapa de análisis del inventario, el programa realiza los cálculos y proporciona los valores numéricos de los indicadores de las categorías de impacto seleccionadas en la etapa de objetivo y alcance [33].

Las bases de datos cumplen la misma función de la Declaración Ambiental de Producto (DAP) [34], ya que aportan información de los impactos asociados a un producto. La principal diferencia entre las bases de datos, es el grado de transparencia de la información facilitada, es decir, si permiten conocer o no la información referida a los procesos aguas arriba: 1) Extracción de materia prima y 2) Transporte del lugar de extracción de materia prima a la fábrica [5].

Por otro lado, el proceso de obtención de datos de impacto ambiental de la fabricación de productos resulta bastante complicado, dado que las DAP son voluntarias y no las tienen todos los productos. Además, no siguen un único modelo, cambia según los países [14].

Capítulo N°3.

Las herramientas informáticas para el ACV de un edificio, se clasifican de acuerdo a los requerimientos ambientales. Las de uso general, permiten realizar ACV completos, con múltiples métodos de evaluación de impactos y variadas bases de datos: Gabi, SimaPro. Las específicas, realizan la simulación del ciclo de vida de un edificio con diversos indicadores ambientales: Equer. Por último, están las bases de datos orientados a un único indicador ambiental, por ejemplo, el coste energético y emisiones de CO₂ de los materiales de la edificación: Ecoinvent, BEDEC. En la tabla 3.7, se describen las principales características de las bases de datos que se pueden utilizar en estudios de AECV [13].

Tabla 3.7. Bases de datos para estudios de AECV [13].

Base de dato (año)	Contenido.	Entidad desarrolladora.	Nº procesos.
ELCD core Database v.II (2009).	Materiales, transformación de energía, transporte y gestión de residuos.	Diversas entidades, asociaciones y organizaciones europeas < http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetCategories.vm >	316
U.S. Life-Cycle Inventory database v.1.6.0 (2008).	Flujos de energía y materiales para los procesos unitarios más comunes.	National Renewable Energy Laboratory (Estados Unidos) < www.nrel.gov/lci/database >	355
US IO database (2003).	Datos input-output para Estados Unidos.	CML, University of Leiden (Países Bajos) < www.leidenuniv.nl/interfac/cml >	481
Danish IO database (1999).	Data input-output para Dinamarca.	2.0 LCA Consultants (Dinamarca) < www.lca-net.com >	793
LCA Food DK (2003).	Datos de alimentación.		671
Ecoinvent v1.2 (2005).	Gran variedad de procesos incluyendo energía, transporte, materiales de construcción, productos químicos, agricultura, gestión de residuos, etc. De Suiza y Alemania.	Ecoinvent centre (Suiza) < www.ecoinvent.ch >	2.700
Ecoinvent v2.0 (2007).			4.000
IVAM LCA Data v.4.06 (2004).	Datos holandeses sobre materiales, transporte, energía y tratamiento de residuos.	IVAM Environmental Research (Holanda) < www.ivam.uva.nl/index.php >	1.350
Boustead Model v.5.0.12 (2006)	Amplia base de datos de materiales, producción de combustibles y energía.	Boustead Consulting Limited (Reino Unido) < www.boustead-consulting.co.uk >	-
Athena database v.4 (2009).	Consumos energéticos y emisiones de productos de la construcción a lo largo de su vida útil.	Athena Institute (Canada) < www.athensmi.org/tools/database/index.html >	1.200
Industry data (2001).	Diversos datos publicados por asociaciones industriales.	Varias asociaciones internacionales, como la asociación Plastics Europe < www.plasticeurope.org >	74
Idemat (2001).	Base de datos holandesa, compilada a partir de distintas fuentes.	Delft Technical University (Países Bajos) < www.io.tudelft.nl >	508
Buwal 250 (1997).	Materiales generales, energía, transporte, residuos, etc.	Swiss Institute of Packaging (Suiza) < www.umwelt-schweiz.ch/buwal/eng/index >	248
ETH-ESU (1996).	Amplia base de datos suiza centrada en energía, transporte y residuos.	ETH-ESU (Suiza) < www.uns.ethz.ch >	1.200
GEMIS 4.5 (2009).	Base de datos gratuita que engloba procesos energéticos y de transporte, materiales, procesos de reciclaje y tratamiento de residuos.	Oko-Institut (Alemania) < www.gemis.de >	-
Franklin (1996).	Bases de datos estadounidense sobre energía, transporte y materiales generales.	Franklin Associates Ltd (EE.UU.) < www.fal.com >	78
Banco Bedec (2009).	Coste energético y emisión de CO ₂ de elementos de edificación, urbanización, ingeniería civil, etc.	ITEC (España) < www.itec.es/nouBedec.e/presentaciobedec.aspx >	-
LCA_sostenipra v.1.0 (2007).	Producción de biomasa, uso de madera, reciclaje, arquitectura sostenible.	SosteniPrA-Universitat Autònoma de Barcelona (España) < www.sostenipra.cat >	-

Capítulo N°3.

A la hora de decidir qué programa utilizar, hay que considerar diversos criterios. Uno de los puntos clave a valorar es el número de procesos que incorpora, su procedencia, calidad y extensión. Las principales bases de datos utilizadas en la bibliografía analizada son: 1) Ecoinvent [4] [6] y 2) BEDEC [14].

La base de datos Ecoinvent [35], en su última versión ofrece más de 2000 conjuntos de datos nuevos revisados y actualizados en 5 sectores, así como representaciones mejoradas de las cadenas de suministros. Es la base de datos líder en el mundo que ofrece tanto en términos de transparencia como de coherencia. La base de datos proporciona datos de procesos bien documentados para miles de productos, sobre su impacto ambiental. Es una asociación sin fines de lucro suiza, sin embargo, para acceder a la base de datos hay que abonar para el 1º año 3.800 €.

La base de datos BEDEC [14], es un conjunto de datos de productos de la construcción que ofrece información de precios, pliegos de condiciones, características técnicas, empresas, certificaciones, imágenes de productos y datos ambientales de España únicamente. BEDEC contiene banco de datos del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, que sirven para facilitar la confección de presupuestos, pliegos de condiciones técnicas, estudios y planes de seguridad y salud, planes de control de calidad, estudios y planes de gestión de residuos y cálculos ambientales en fase de proyecto. El banco BEDEC se estructura en elementos constructivos básicos, auxiliares, unitarios y complejos. Los elementos disponen de código, definición completa y resumida, precios de referencia, unidad de medición, descomposición y rendimientos y datos ambientales (coste energético, emisión de CO₂, residuos de obra y embalaje, % de materia prima, % contenido reciclado, coste total para el usuario) y permiten la selección de los 60.000 artículos de 90 fabricantes de productos de la construcción. Para cada material se muestra el coste energético y emisión de CO₂, por unidad de medida calculados a partir de la cantidad de material constitutivo que lo forma, operado por un valor unitario del coste energético y emisión de CO₂, de este material constitutivo. Para los materiales, el coste energético contempla el proceso de extracción, el transporte del origen a la fábrica y el proceso de transformación en fábrica de sus materiales constitutivos. No se contempla el coste energético que supone la transformación del material en un elemento específico (por ejemplo, la transformación del acero en un tubo, perfil o plancha) ni el transporte del material del almacén del fabricante hasta la obra. Para la maquinaria, el coste energético contempla el consumo de la máquina durante su funcionamiento en el proceso de ejecución del elemento unitario, referido a la unidad de medida de la máquina. Para validar los datos, se contrastaron con otras bases de datos

Capítulo N°3.

(Ecoinvent, Institute of Environmental Sciences – CML, Instituto de Diversificación y Ahorro Energético – IDAE, etc.).

BEDEC, permite conocer el porcentaje de materia prima y reciclado en la fabricación del material para ayudar a elegir al proyectista y reducir el impacto del consumo energético y emisiones de CO₂. También determina el “coste total para el usuario”, un indicador de eficiencia energética asociado a los materiales y los elementos unitarios que además del coste de fabricación, incluye el costo del futuro mantenimiento en base a su consumo (caldera, bomba, etc.) por año. La licencia anual para acceder al banco de datos BEDEC (Consulta Premium anual) es de 110 €.

La tesis utilizará para el cálculo de la energía incorporada y emisiones de CO₂ de los elementos constructivos, la base de datos BEDEC, por el número de artículos que maneja, la información de los procesos aguas arriba, el fácil manejo y el bajo costo de la licencia. Es importante aclarar que la adaptación de esta base de datos de origen europeo, al contexto argentino, implica un cierto nivel de incertidumbre.

3.3.3. Herramienta de cálculo de energía operativa y emisiones de CO₂.

Tabla 3.8. Programas de simulación térmica para un ACV [16].

Grupo.	Programas.	Características.
1	EnergyPlus. TRNSYS. Tas. ESP-r.	Programas centrados en la simulación térmica del edificio: Implementan el método de balances. Efectúan métodos nodales para el flujo de aire. Requieren de un diseñador con bastante experiencia en su manejo y tener amplios conocimientos en térmica de edificios y sistemas de climatización. El modelado de cada caso suele ser largo y tedioso.
2	HAP. TRANCE 700. EnergyPlus.	Programas centrados en la simulación de sistemas: Ofrecen gran cantidad de opciones en la configuración de los sistemas. A excepción de EnergyPlus, corresponden a empresas de venta de equipos y sistemas de HVAC, por lo que están menos interesados en modelar sistemas pasivos de climatización. Las opciones de diseño del edificio están siempre centradas en los sistemas de HVAC que incorpora. Las interfaces suelen ser fáciles de manejar.
3	Energy10. ECOTEC. EQuest.	Programas de simulación para las primeras etapas de diseño: Entornos muy gráficos y fáciles de manejar. Permiten comparar distintas alternativas a la vez, incorporar sistemas pasivos de climatización y todo con una interfase intuitiva que no requiere de demasiada experiencia del diseñados. Sin embargo, ninguna incorpora un motor de simulación suficientemente detallado que implemente los métodos de balance para el cálculo de cargas y métodos nodales para el intercambio de aire.

Las herramientas de simulación, son usadas para evaluar el comportamiento térmico de los edificios, considerando los parámetros físicos que lo definen: 1) Forma y orientación del edificio, 2) Sombras del propio edificio o de edificios colindantes, 3) Condiciones climáticas, 4) Composición de cerramientos, 5) Inercia térmica del edificios, 6) Elementos de protección solar, 7) Ganancias de radiación solar, 8) Infiltraciones, 9) Ventilación natural o artificial, 10) Ganancias internas: iluminación, ocupación y equipos

y 11) Características de radiación y convección [15]. En el mercado existe una oferta importante de programas informáticos que se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a sus características más significativas [16] (ver tabla 3.8).

EnergyPlus, de acceso gratuito, es un programa de simulación de carga térmica y análisis energético de edificios. Está constituido por distintos módulos que trabajan juntos, simulando el edificio cuando está expuesto a diferentes condiciones de operación y medioambientales. La estimación de las cargas la hace realizando balances térmicos de conducción, convección y radiación a cada una de las superficies de cada zona y un balance convectivo al aire de la misma [15]. Se destaca por las siguientes características específicas [16][17][36]:

1. Se presenta como el programa de simulación térmica de edificios más detallado del mercado. Implementa un método de balances para calcular las cargas y modela con precisión cada uno de los fenómenos de transferencia de calor y masa que se producen en un edificio. Completa el programa, un manual tanto a nivel usuario como a nivel desarrollador, que explica con rigor las soluciones adoptadas y sus limitaciones. De esta forma, el diseñador experimentado conoce hasta qué punto son válidos los resultados obtenidos de cada simulación.
2. Incorpora multitud de opciones de diseño, tanto de sistemas activos como pasivos, modelando cada componente por separado y permitiendo configuraciones variadas. De esta forma se pueden simular casi todas las condiciones de operación que pueden presentarse en los edificios.
3. Por sí mismo, no incorpora una interfase adecuada de entrada y salida de datos. Para solucionar este inconveniente se utiliza la capacidad gráfica 3D de GoogleSketchup [22] vinculado a EnergyPlus.
4. Requiere de mucha experiencia por parte del diseñador y el modelado de cada caso en concreto es largo y tedioso.

3.3.3.1. Fichero climático.

Una vez dibujado el objeto en GoogleSketchup, se utiliza el programa Meteonorm [37], para crear un fichero climático con extensión EPW (EnergyPlus Weather), con los datos de localización geográfica de la tipología arquitectónica analizada. Este archivo se carga en EnergyPlus, para facilitar la simulación del MTE.

Capítulo N°3.

Como se explicó en el capítulo N°2, los datos climáticos que aportan las estaciones meteorológicas en la ciudad de SFDVDC, son incompletos. Ante esta dificultad, el programa Meteonorm resulto adecuado para generar un fichero climático y validar su precisión con datos experimentales del proyecto de investigación (ver capítulo N°5).

Meteonorm, ofrece acceso exclusivo a los datos de archivo del Balance Energético Global (BEG). Los datos de BEG, provienen de los servicios meteorológicos nacionales y cumplen los criterios de calidad de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). También incluye redes de medición de alta calidad como la Baseline Surface Radiación Network BSRN o las redes de MeteoSwiss y el Servicio Meteorológico Alemán. Periodos anuales de irradiación solar a escala global y de otros parámetros meteorológicos están disponibles. También permite descargar datos mensuales actuales de temperatura e irradiación. La base de datos de estaciones terrestres se amplía con datos de cinco satélites geoestacionarios para llenar los vacíos en áreas donde no hay estaciones meteorológicas disponibles. Los datos de satélite están disponibles en una cuadrícula global. Los datos se correlacionaron con mediciones terrestres a largo plazo para obtener promedios homogéneos a largo plazo. Meteotest comprueba la calidad de todos los datos. La incertidumbre de la base de datos y los años típicos generados se muestra de forma transparente directamente en el software y en la documentación.

Para determinar las cargas térmicas, se usará en la tesis el programa de simulación térmica EnergyPlus. Si bien presenta la dificultad de un diseñador con bastante experiencia para su manejo y amplios conocimientos en transferencia de calor de edificios y sistemas de climatización, resulta ser el programa de simulación térmica más detallado del mercado. EnergyPlus utilizará el entorno gráfico GoogleSketchup. Es importante destacar que los cálculos de las demandas de climatización, ofrecen la mayor certeza en el ciclo de vida del edificio. Por último, Los datos climáticos serán generados con Meteonorm. Los resultados se validarán con los datos experimentales del proyecto de investigación.

3.4. Resumen y conclusiones.

En el capítulo N°3, se describe el método del ACV, los conceptos fundamentales y herramientas de cálculo para realizar la evaluación comparativa del consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico, en la vida útil de los casos de estudio, VSC - VSV y PMVSC, en los capítulos N°4, 5 y 6 respectivamente. Las conclusiones son:

1. El consumo de energía primaria y emisiones de CO₂, se produce en procesos

unitarios consecutivos e interrelacionados, desde la adquisición de materia prima hasta su demolición. Estos se los puede agrupar en 3 fases para su análisis: 1) Fabricación, 2) Uso y 3) Demolición.

2. Los procesos unitarios, consumen tres tipos de energía: 1) Incorporada, 2) Operativa y 3) De demolición. En los edificios contemporáneos, la energía incorporada (15-20%) y operativa (80-95%) totalizan el consumo de la energía en el ciclo de vida. Los demás procesos consumen una cantidad insignificante (1%).
3. El método de ACV, está integrado por cuatro etapas: 1) Definición de objetivos y alcance, 2) Análisis del inventario, 3) Evaluación de impacto y 4) Interpretación. El AECV, es un enfoque del ACV para evaluar una sola categoría de impacto y establecer medidas pasivas o activas para la reducirlo. En este trabajo se agrega al método, la validación de los resultados con datos experimentales y el análisis del confort térmico.
4. En la etapa de objetivos y alcance, el objetivo establece: a) La aplicación prevista, b) Las razones para realizar el estudio y c) El público a quien va dirigido. El alcance incluye: a) El sistema del producto y límites del sistema, b) Función, unidad funcional y flujo de referencia y c) Las categorías y los métodos de análisis.
5. La etapa análisis del inventario, implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (energía primaria) y salidas (emisiones de CO₂ y nivel de confort térmico) de los procesos unitarios del MTE. Para el cálculo de la energía incorporada y operativa se seleccionó la base de datos BEDEC y el programa de simulación térmica EnergyPlus (con el entorno gráfico GoogleSketchup), respectivamente. El fichero climático para EnergyPlus, será generado con el programa Meteonorm. Por último, los resultados de la simulación térmica de la VSC, serán validados con datos experimentales.
6. La etapa evaluación de impacto, tiene como propósito determinar cuan significativos son los impactos ambientales, evaluando las entradas y salidas de los procesos unitarios del MTE. Los indicadores para evaluar el impacto ambiental las variables elegidas en la VSV, VSC y PMVSC son: 1) Demanda Acumulada de Energía, 2) Potencial de Calentamiento Global y 3) Nivel de Confort Térmico.
7. En la etapa interpretación, los hallazgos del análisis del inventario y de la evaluación de impacto, se consideran juntos, en sintonía con el objetivo y el

alcance, para llegar a conclusiones que expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones para: 1) Explicar los procesos unitarios que tienen el mayor impacto y 2) Determinar soluciones para reducirla y evaluar la factibilidad de aplicación. Las propuestas de mejoras se realizarán en la VSC.

Referencias del capítulo N°3.

- [1] Ramesh, T., Praskash, R., Shukla, K, "*Life cycle energy analysis of buildings: An overview*", Energy and Buildings, 42 (2010), 1592-1600.
- [2] Filippín, C., Sipowicz, E., Flores Larsen, S., "*Análisis del ciclo de vida de una vivienda auditada en condiciones reales de uso en la región central de la Argentina*", ASADES Vol. 35 (2015), 7-19.
- [3] Rodrigues, C., Freire, F., "*Integrated life-cycle assessment and thermal dynamic simulation of alternative scenarios for the roof retrofit of a house*", Building and Environment, 81(2014), 204-215.
- [4] Monteiro, H., Fernandez, J., Freire, F., "*Comparative life-cycle energy analysis of a new and an existing house: The significance of occupant´s habits, buildings systems and embodied energy*", Sustainable Cities and Society, 26 (2016), 507-518.
- [5] Assiego de Larriva, R., 2015. "*Eficiencia energética en edificios desde la perspectiva de ciclo de vida. Casos de estudio*". Tesis Doctoral, Universidad de Málaga. Disponible en: https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/10571/TD_Assiego_de_Larriva.pdf?sequence=1, acceso diciembre 2023.
- [6] Oyarzo, J., Peuportier, B., "*Life cycle assessment model applied to housing in Chile*", Journal of Cleaner Production, 69 (2014), 109-116.
- [7] Monteiro, H., Freire, F., "*Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods*", Energy and Buildings, 47 (2012), 572-583.
- [8] Terrados, F., Moreno, D., "*Patio and Botijo. Energy strategies architectural integration in Patio 2.12 prototype*", Energy and Buildings 83 (2014), 70-88.

Capítulo N°3.

- [9] Molas, L., García, V., Iriarte, A., Correa, E., "Auditoria térmica y variables del confort. Caso de una vivienda del Instituto Provincial de la Vivienda, ciudad de Catamarca", ASADES Vol. 12 (2008), 121-128.
- [10] Rodrigues, C., Freire, F., "Building retrofit addressing occupancy: An integrated cost and environmental life-cycle analysis, *Energy and Buildings*", 140 (2017), 388-398.
- [11] Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A., "Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses", *Building and Environment* 54 (2012) 86-99.
- [12] UNE-EN ISO 14040, 2006. "Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marcos de referencia".
- [13] I. Zabalza Bribián, A. Raranda Usón, 2011. "Ecodiseño en la Edificación", Prensas Universitarias de Zaragoza. ISBN 978-84-15274-16-2.
- [14] BEDEC BANCO DE CONSTRUCCIÓN 2022, Instituto de Tecnología de la Construcción (ITeC). Disponible en: <<https://metabase.itec.es/vide/es/bedec>>, acceso diciembre 2023.
- [15] G. Calleja, 2008. "La influencia de los sistemas de automatización residencial en la demanda de climatización". Proyecto fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Málaga.
- [16] B. Bueno, J. Cejudo, A. Carrillo, F. Muñoz, 2007. "Desarrollo de nuevas herramientas y sistemas para la sostenibilidad en la edificación residencial". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Málaga.
- [17] Programa EnergyPlus. Departamento de Energía de los Estado Unidos. Disponible en: <<https://energyplus.net/>>, acceso diciembre 2023.
- [18] IDAE Instituto para la diversificación y ahorro de energía, 2010. "Factores de conversión energía final – energía primaria y factores de emisión de CO2 ". Disponible en: <<file:///C:/Users/EM%20Informatica/Downloads/factores-de-conversi-211-n-energ-205-a-final.pdf>>, acceso diciembre 2023.

- [19] Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. García-Martínez, A., "*Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments*", Building and Environment 103 (2016) 215-227.
- [20] Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A., "*Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses*", Building and Environment 54 (2012) 86-99.
- [21] ISO 7730, 2005. "*Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort, International Standardization Organization, Geneva*".
- [22] Programa SketchUp. Disponible en: <<https://www.sketchup.com/>>, acceso diciembre 2023.
- [23] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2004. "*Norma 11659-1. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración*".
- [24] Programa para cálculo PMV. Universidad de Berkeley, CBE Thermal Comfort Tool, Disponible en: <<https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>>, acceso diciembre 2023.
- [25] Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico, 2019. "*Informe anual 2019 CAMMESA*". Disponible en: <<https://portalweb.cammesa.com/Pages/PgInformeAnual.aspx>>, acceso diciembre 2023.
- [26] Red Eléctrica. "*Informe de la red eléctrica de España*". Disponible en: <www.ree.es>, acceso diciembre 2023.
- [27] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2016. "*Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria. Anexo III*". Disponible en <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf>, acceso diciembre 2023.

Capítulo N°3.

- [28] Municipalidad de San Fernando del Valle de Catamarca. Disponible en: <<https://www.catamarcaciudad.gob.ar/>>, acceso diciembre 2023.
- [29] Gobierno de España. Ministerio de transportes, Movilidad y Agenda Urbana. "Catálogo de residuos utilizables en la construcción". Disponible en: <<http://www.cedexmateriales.es/2/catalogo-de-residuos/>>, acceso diciembre 2023.
- [30] A., Bahamon, M Sanjines 2008. "Rematerial. Del desecho a la arquitectura". Parramón Arquitectura y Diseño. ISBN: 978-84-342-3365-2.
- [31] E., Sprovieri, 2011. "La Vivienda de interés social". Editorial Nobuko. ISBN: 978-987-584-345-5.
- [32] Página web de Argentina Green Building Council (AGBC), <<https://www.argentinagbc.org.ar/institucion/>>, acceso diciembre 2023.
- [33] J. Ros García, 2015. "Arquitectura de emergencia: cuestiones pendientes", ediciones asimétricas. ISBN 978-84-944300-5-3.
- [34] ISOVER SAINT-GOBAIN, 2018. "Declaración ambiental de producto, Climaver neto y Climaver neto pro".
- [35] Ecoinvent. Disponible en: <www.ecoinvent.org>, acceso diciembre 2023.
- [36] A. Carrillo, "EnergyPlus First Simple Building Model", Universidad de Málaga. ETS Industriales. acarrillo@uma.es.
- [37] Programa Meteonorm. Disponible en: <<https://meteonorm.com/en/>>, acceso diciembre 2023.
- [38] ASHRAE. Measurement of Energy, Demand and Water Savings. ASHRAE Guidelines 14-2014, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2014.

SEGUNDA PARTE.

Estudio comparativo de casos.

Capítulo N°4.

Evaluación energética de vivienda social vernácula.

4.1. Introducción.

La segunda parte de la tesis, está dedicada al estudio comparativo de casos, mediante la evaluación del impacto ambiental de dos tipologías de vivienda social representativas del noroeste de la Argentina (NOA). En particular, en los capítulos N°4 y 5, se realizará la evacuación comparativa de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico de las viviendas sociales vernácula (VSV) y contemporánea (VSC) respectivamente, localizadas en la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca (SFDVDC), provincia de Catamarca, en el marco del método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) propuesto.

Para tener una perspectiva amplia de la evaluación energético y ambiental de ambas viviendas, la comparación es justa si se realiza a través del método de ACV, con la incorporación de la validación con datos experimentales y el análisis del confort térmico. En líneas generales, el método consta de 4 etapas: objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación. En el objetivo y alcance, se consideran todos los procesos unitarios que intervienen en el ciclo de vida de los casos de estudio y el criterio de corte descarta los poco relevantes. En el análisis de inventario, para la modelización térmica equivalente (MTE), se utilizarán las ganancias internas y el patrón de uso del proyecto de investigación (ver capítulo N°2). El modelo de la VSC se valida con datos experimentales, por ser la predominante en los barrios sociales y se aplican las propuestas de mejora. Las principales herramientas de cálculo, son la base de datos BEDEC y el programa de simulación térmica EnergyPlus. En la evaluación de impacto, aplicaremos los indicadores ambientales definidos en el capítulo N°3: 1) Demanda Acumulada de Energía (DAE), 2) Potencial de Calentamiento Global (PCG) y 3) Nivel de Confort Térmico (NCT).

Por último, con los indicadores ambientales, se evaluará y establecerán las recomendaciones para 100 años, utilizando las siguientes variables: 1) La energía incorporada de los componentes y elementos constructivos, 2) La energía operativa para

Capítulo N°4.

refrigerar y calefactar y 3) Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort.

En el capítulo N°2, se definió a la VSV, como un modo de construir surgido de la relación entre la comunidad y el ambiente donde se inserta, en un tiempo y contexto sociocultural determinado. En este sentido, la tipología fue concebida en la región del noroeste argentino, adaptando su función, forma y tecnología al microclima y los recursos naturales, en tres etapas socioculturales diferentes: americana, española e italiana. El patio, centro de la actividad doméstica y productiva, fue el elemento compositivo organizador de todas las tipologías arquitectónicas surgidas en cada etapa. La VSV, analizada en este capítulo, responde al contexto sociocultural italiano, que se caracterizó por las corrientes de inmigrantes europeos, principalmente italianos y españoles, desde mediados del siglo XIX hasta principios del XX en el NOA. Básicamente se trata una tipología arquitectónica española, originaria de Andalucía y Extremadura, con la incorporación de la fachada urbana denominada "italiana". Se destaca en su construcción el empleo de materiales locales, la mampostería de abobe y la doble cubierta ventilada.

En el capítulo N°4, se aplicará el método de ACV propuesto para cuantificar y evaluar la energía primaria, las emisiones de CO₂ y el confort térmico del ciclo de vida de la VSV, en modo de evolución libre. A continuación, se menciona el orden establecido en el presente capítulo:

- 4.2 Objetivo y alcance del ACV.
- 4.3 Análisis de inventario del ACV.
 - 4.3.1 Descripción arquitectónica de la VSV.
 - 4.3.2 Modelización térmica equivalente.
 - 4.3.3 Análisis de confort térmico.
 - 4.3.4 Cálculo de energía primaria y emisiones de CO₂.
 - 4.3.5 Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.
- 4.4 Evaluación de impacto del ACV.
- 4.5 Interpretación del ACV.
- 4.6 Resumen y conclusiones.

4.2. Objetivo y alcance del ACV.

El objetivo del estudio de casos, es la evaluación comparativa de la energética primaria, emisiones de CO₂ y el confort térmico del ciclo de vida de las VSV y VSC. La razón

principal de la evaluación del impacto ambiental, es encontrar propuestas para reducirlo. Los resultados servirán para direccionar las políticas habitacionales hacia la eficiencia energética.

El límite del sistema de los casos de estudio, se enfocará al cálculo y evaluación del consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico de todos los procesos unitarios que integran el MTE. El criterio de corte, dejará fuera del modelo a los procesos unitarios pocos representativos (menor al 1% de la energía del ciclo de vida). La extensión temporal del ciclo de vida, será de 100 años.

La función elegida es el confort térmico para estudiar y comparar los MTE de la VSV y VSC. La unidad funcional, es 1 m² de superficie climatizada mantenida con un rango de confort normativo. Los flujos de referencia son: 1) Entrada: cantidad de energía primaria consumida, durante el ciclo de vida (MJ/m²) y 2) Salida: cantidad de emisiones de CO₂, durante el ciclo de vida (tCO₂/m²). Con respecto al confort térmico, el flujo de referencia serán el porcentaje de horas ocupadas por zona, según categorías de confort y el disconfort.

4.3. Análisis de inventario del ACV.

El análisis de inventario tiene por objetivo determinar la energía primaria, emisiones de CO₂ y las condiciones de confort térmico alcanzadas en el ciclo de vida de la VSV. En este sentido, seguiremos el siguiente procedimiento: 1) Descripción arquitectónica de la VSV, 2) Modelización térmica equivalente, 3) Análisis de confort térmico, 4) Cálculo de energía primaria y emisiones de CO₂ y 5) Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.

4.3.1. Descripción arquitectónica de la VSV.

La VSV, está ubicada en la localidad de Santa Rosa, Departamento Valle Viejo, a 8 km al noroeste de la plaza principal 25 de mayo, de la ciudad de SFDVDC. Es un área semirrural con un tejido urbano irregular, donde prevalecen las edificaciones de baja densidad. Si bien, esta tipología está fuera de los límites municipales de la capital, por su cercanía se la consideró como caso de estudio de la ciudad de SFVDC. Las coordenadas geográficas son: latitud 28°26'13.95"Sur y longitud 65°42'16.06"Oeste. En la figura 4.1, se muestra la ubicación aérea y la morfología urbana.



Figura 4.1: Ubicación de la VSV. A la izquierda se señala la localización en el tejido irregular semirrural no planificado [Google Earth] y a la derecha la morfología urbana [Fotos Lucio A. Molas].

Por sus características arquitectónicas, la vivienda es vernácula. Fue construida por la propia comunidad, incorporando en el diseño estrategias pasivas y aspectos socioculturales del periodo de la inmigración europea. Según la Carta de Patrimonio Vernáculo Construido del Comité Internacional sobre Arquitectura Vernácula (CIAV) [1], el patrimonio tradicional o vernáculo construido, es la expresión fundamental de la identidad de una comunidad, de sus relaciones con el territorio y al mismo tiempo, expresión de la diversidad cultural del mundo. Los ejemplos de vernáculo pueden ser reconocidos por: un modo de construir emanado de la propia comunidad; un reconocible carácter local o regional ligado al territorio; coherencia de estilo; forma y apariencia, así como el uso de tipos arquitectónicos tradicionalmente establecidos; sabiduría tradicional en el diseño y en la construcción, que es transmitida de manera informal; una respuesta directa a los requerimientos funcionales, sociales y ambientales; la aplicación de sistemas, oficios y técnicas tradicionales de construcción.

La identidad propia del diseño de la VSV, se logró por la incorporación de las condicionantes ambientales del lugar. Al respecto Gonzalo [2], divide las condicionantes o factores, en dos grupos principales: 1) Factores socioculturales: que incluyen el modo de organización social del grupo, la estructura familiar, la religión, cosmovisión, organización económica, actividades productivas, relación con otros grupos, nivel cultural del pueblo, tecnologías manejadas por el grupo, etc. y 2) Factores físicos: que incluyen todos aquellos dados por las características naturales del lugar; esto es, clima, características geomorfológicas del sitio, paisaje natural, hidrología, fauna y vegetación, materiales existentes en el lugar, etc. Por su parte, Gómez [3], clasifica a los condicionantes o elementos gestores, en: 1) Circunstancias del medio físico, 2) Funciones humanas a resolver, 3) Posibilidades constructivas del lugar, 4) Ciertas

particularidades de diseño provenientes de centros culturales mayores y 5) Situación económica generalmente restringida.

La VSV, debe tener un origen genuino, es decir, que la sociedad que la produjo estaba carente de conocimientos academicistas, que impusieran reglas preestablecidas. En este sentido Gómez [3], señala que es arquitectura sin arquitectos. Se trata de una arquitectura construida por los propios usuarios, a diferencia de las obras diseñadas por los profesionales, para que sean construidas y usadas por otros. La creación de formas se aprende por imitación y corrección, a diferencia de aquellos procesos conscientes en los que el especialista o arquitecto, en la mayoría de los casos diseña según sus principios y reglas explícitas y aprende la creación de formas en escuelas especializadas.

La forma que adquirió a través del tiempo, fue la respuesta constructiva de la comunidad para adaptarse al clima del lugar. En esta dirección Gauzin Muller [4], asevera que el microclima y las características de los recursos naturales que ofrece la región han dictado las formas, los materiales y las técnicas. Por su parte, Serra [5], considera que la arquitectura popular, característica de estas zonas (cálido-secas), siempre ha tendido a ser compacta, con escasas aberturas, muchas veces con gruesas paredes o subterráneas, para obtener la máxima inercia térmica frente a las variaciones del clima exterior y, por último, con el magnífico recurso del patio para generar un espacio protegido del sol, humedecido y refrescado con la presencia del agua, que permite reconciliar la arquitectura con el exterior.

El patio, característica de la VSV del NOA, posee límites poco definidos y es el elemento articulador entre el medio rural y la galería. La comunidad, con una fuerte tradición en el uso de espacios abiertos desde las épocas prehispánicas hasta la actualidad, desarrolló allí sus principales actividades domésticas. En sintonía Blaser [6], reflexiona que el patio, debido a su aislamiento, proporciona a sus habitantes la ilusión de una zona de dominio figurado.

Los constructores vernáculos, a través del tiempo fueron mejorando las soluciones tecnológicas apropiadas, para lograr condiciones aceptables de confort térmico. Al respecto Evans [7], sustenta que las viviendas vernáculas, representan excelentes ejemplos de adaptación al clima y recursos de diseño bioambiental que modifican el clima natural exterior para mejorar las condiciones de confort. Cada ejemplo de vivienda vernácula, construido con tecnologías sencillas y materiales locales, es el resultado de un proceso tradicional de diseño con cambios y mejoras realizados lentamente a través del tiempo, una evolución que requirió siglos para su perfeccionamiento.

Por último, para conseguir la vivienda confortable, la comunidad se valió de un proceso de diseño o método proyectual holístico, en el cual prevaleció el sentido común para interpretar las condicionantes ambientales. Al respecto Olgyay [8], define este proceso en cuatro etapas; el primer paso hacia la adecuación ambiental consiste en un análisis de los elementos climáticos del lugar elegido; el segundo paso será realizar una evaluación de las incidencias del clima en términos fisiológicos; en tercer lugar, se analiza la solución tecnológica adecuada para cada problema de confort climático y en cuarto lugar dichas soluciones deberán combinarse de acuerdo con su importancia en una unidad arquitectónica.

4.3.1.1. Análisis de componentes: función, forma y tecnología.

La VSV, estudiada en este capítulo, responde a las características de la tipología italiana, descrita en el capítulo N°2.

La organización funcional, está definida por un zaguán o recibidor que articula el espacio público con el privado, cuyo ingreso principal está orientado al este. Por intermedio del zaguán se accede a la galería que mira al oeste, y a los 2 dormitorios principales, orientados al sur y norte. El estar-comedor, con orientación norte y oeste, por ser un área social, se vincula directamente a la galería y por un vano a un dormitorio. La galería es un espacio semicubierto, de transición entre el espacio interior construido y el espacio abierto o patio. El contorno de la vivienda orientado al sur, es colindante con otra vivienda.

El patio, es un espacio abierto sin límites definidos, típico de la tipología en área semirural. En él, se ubica el aljibe para la extracción de agua subterránea y una estructura precaria de madera para sostener una vid, necesaria para protección climática de las actividades de ocio. El baño y la cocina están fuera de la vivienda por cuestiones sanitarias. La superficie construida total es de 111,30 m². En la figura 4.2, se muestra la geometría en planta de la VSV. Para mayor información ver descripción en el Anexo B.

La morfología, es netamente cúbica definida por el sistema constructivo utilizado: mampostería de adobe y cubierta ventilada. En ella sobresale la fachada urbana italiana sobre la línea municipal, con un basamento, conformado por la vereda sobreelevada de la calle (actualmente está enterrada y no se la observa) y un remate constituido por una doble cornisa que limita un friso. El techo es a una sola agua y colecta los drenajes parciales, en sentido este – oeste, arrancando desde la fachada principal y terminando en la galería. Las alturas interiores oscilan de 3.81 a 2.58 metros. En la figura 4.3, se

Capítulo N°4.

muestra la morfología resultante de la VSV. Para mayor información ver descripción en el Anexo B.

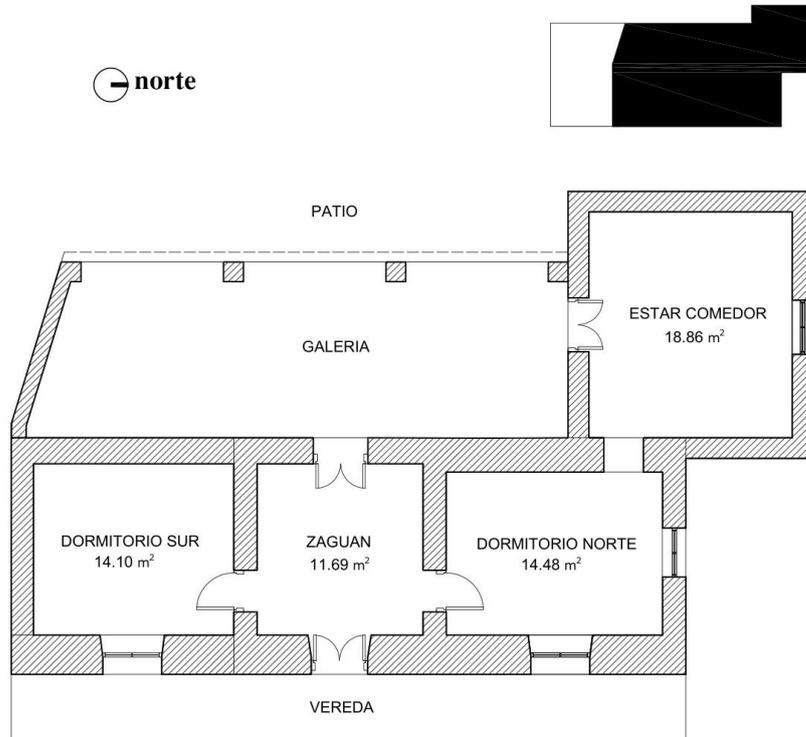


Figura 4.2: Planta general de la VSV [Elaboración propia].



Figura 4.3: Morfología de la VSV. Se destaca la fachada de estilo italianizante y el techo a una sola agua. [Fotos Lucio A. Molas].

La tecnología, se basa fundamentalmente en el empleo de 3 sistemas constructivos pasivos, que limitan espacio interior del exterior: 1) Envoltente vertical: mampostería de

adobes, 2) Envolvente superior: doble cubierta ventilada y 3) Envolvente inferior: piso sobre terreno natural. En la figura 4.4, se muestra una sección del zaguán y la galería de la VSV, con la ubicación de los sistemas constructivos. Para mayor información ver descripción en el Anexo B. A continuación, se describen los tres sistemas constructivos.

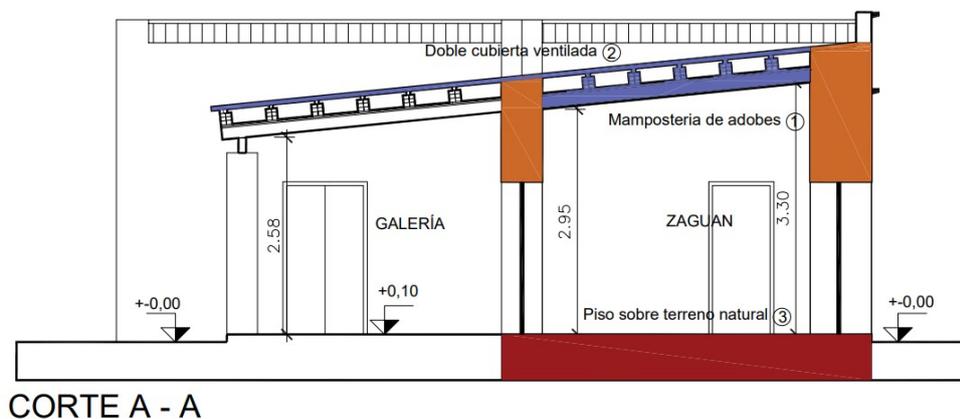


Figura 4.4. Sección con la ubicación de los sistemas constructivos [Elaboración propia].

- **Sistema constructivo de mampostería de adobe.**

El sistema constructivo de mampostería de adobe, utilizado en las envolventes verticales, está integrado por bloques de 0.20 x 0.40 x 0.10 (espesor) metros en promedio, revoque de arena y cal y cemento de piedra bola. Básicamente el sistema cumplía una doble función, de ser portante del techo y amortiguadores de las variaciones climáticas anuales. La vivienda fue ampliada en diferentes oportunidades, variando los espesores de los muros de 0.42 a 0.80 metros, posiblemente debido al uso de distintos moldes de adobe o a un criterio estructural.

En casi todos los climas cálidos-secos y templados del mundo, la tierra ha sido el material de construcción predominante. La tierra utilizada como material de construcción se le ha dado diferentes nombres. Se denomina barro a la mezcla de arcilla, limo (arena muy fina), arena y agregados mayores como gravilla o grava. Cuando se habla de bloques de tierra arcillosa hechos a mano se emplea por lo general el término de bloques de barro o adobe. El barro tiene muchas ventajas en comparación con los materiales de construcción industriales: 1) Regula la humedad ambiental (tiene la capacidad de absorber y emitir humedad), 2) Almacena calor, 3) Ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental, 4) Es reutilizable, 5) Economiza materiales de construcción y costos de transporte, 6) Es apropiado para la autoconstrucción, 7) Preserva la madera y otros materiales orgánicos y 8) Absorbe contaminantes [9].

Capítulo N°4.

Para darles mayor resistencia a la tracción, solían mezclar con el barro, guano de caballo, paja cortada, crin de caballo y hasta lana de oveja. El revoque de cal y arena da al abobe una mayor protección del clima y permite la construcción de cornisas y molduras más durables. La fragilidad del adobe y su escasa resistencia hacen que se construya muros muy gruesos para suplir esta deficiencia.

Las mamposterías de adobe poseen una gran inercia térmica que le permiten el control del confort térmico. La inercia térmica es una estrategia pasiva utilizada en los cerramientos de un edificio, que permite almacenar y liberar el calor de manera paulatina con el objetivo de mantener las temperaturas de confort interiores. Podríamos resumir que la inercia térmica es un gestor de energía que actúa como una batería con un ritmo diario.

La capacidad de almacenamiento de calor de un material (S) se define como el producto del calor específico (c) y la densidad (ρ). Un muro con una alta capacidad de almacenamiento, crea un largo retraso de la penetración del calor y una disminución de la amplitud térmica.

$$S = c \cdot \rho \text{ [kJ / m}^3\text{K] o [Wh / m}^3\text{K]}$$

La velocidad en que un material absorbe y pierde calor se define por la difusión térmica (b), que es dependiente del calor específico (c), la densidad (ρ) y la conductividad (λ). Mientras mayor es el valor b más rápido penetra calor.

$$b = \sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda} \text{ [kJ / Km}^2\text{h}^{0,5}]$$

La inercia térmica o masa térmica, se mide a través de la amortiguación de la onda térmica y del desfase entre las ondas térmicas en el interior en relación con el exterior durante 24 horas del día. La amortiguación de la onda térmica describe el grado de oscilación de las temperaturas interiores comparado con las del exterior. El desfase de las ondas, a su vez, es el tiempo que necesita para entrar desde el exterior el pico de temperatura de un día de mucho calor. El desfasaje de la onda térmica debería ser como mínimo de 10 horas (aconsejable 14), de modo que la temperatura máxima exterior a las 15:00 no llegue antes de la 1:00 al interior, cuando las temperaturas exteriores ya hayan bajado lo suficiente como para poder enfriar el edificio con ventilación natural

[10]. En la figura 4.5, se muestra la amortiguación y desfase de las ondas térmicas interiores (con baja y alta inercia térmica) en comparación con la onda térmica exterior.

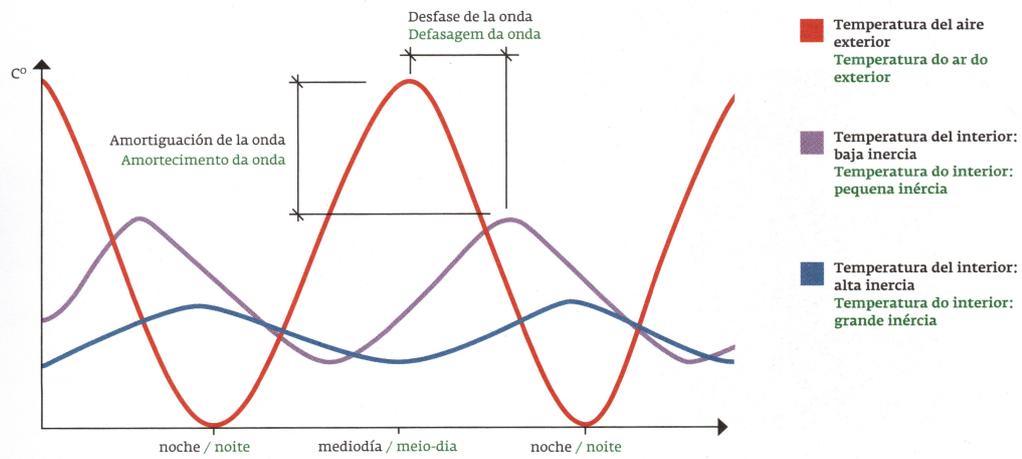


Figura 4.5: Amortiguación y desfase de la onda térmica [10].

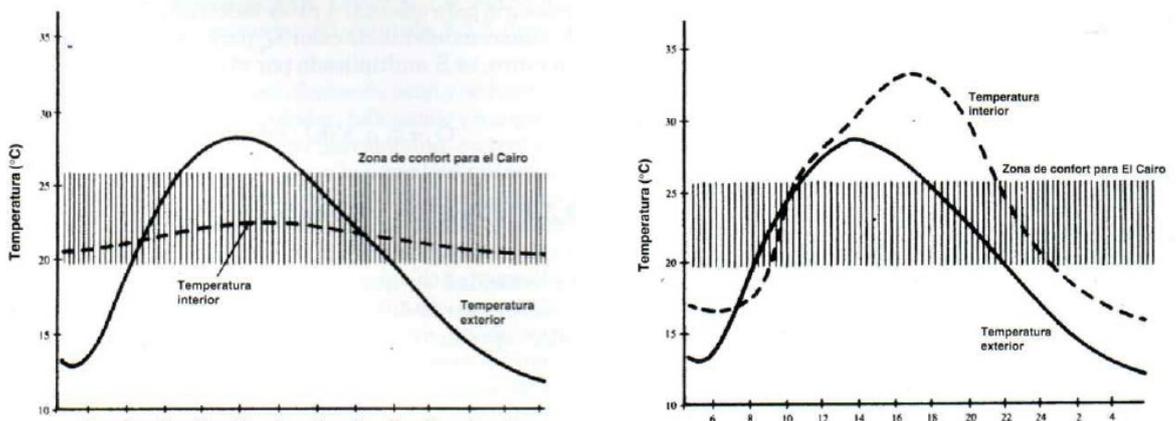


Figura 4.6. Comparación de temperaturas interiores y exteriores de una construcción con bóvedas de adobe (izquierda) en relación a una construida con elementos prefabricados de hormigón (derecha) [9].

En la figura 4.6, se muestra el efecto del material y de la forma de una edificación en relación al clima interior (con un rango de confort de 17°C y 25°C) de acuerdo a datos tomados en dos construcciones experimentales del mismo volumen en El Cairo, Egipto. Una se construyó con muros de barro apisonado de 50 cm de espesor y con bóvedas de bloques de barro y la otra con elementos de hormigón prefabricado de 10 cm de espesor y con un techo plano. Cuando la variación diaria de la temperatura exterior era de 13°C, la temperatura interior en la vivienda de tierra solo variaba 4°C, mientras que en la vivienda de hormigón la variación era de 16°C. Es decir que la amplitud era de cuatro veces mayor en la vivienda de hormigón en comparación a la vivienda de tierra.

Capítulo N°4.

El impacto positivo en el confort térmico de las construcciones con tierra depende del diseño de la vivienda. En este sentido Rincón et al. [11], analizaron el confort térmico en una vivienda de tierra en el África subsahariana con un diseño pasivo que mejoró significativamente el confort térmico en comparación con el caso base. Por otro lado, Kansara [12], presenta las zonas de transición de los edificios vernáculos y modernos en Abu Dhabi y discutió el uso de diseños pasivos en factores como la comodidad, satisfacción y productividad del usuario.

El consumo de energía incorporada y operativa en el ciclo de vida de las viviendas de tierra es menor a las construcciones contemporáneas. En esta dirección Pakdel et al. [13], compara los sistemas de construcciones iraníes tradicionales y contemporáneos desde el punto de vista del ACV y concluye que las técnicas tradicionales y los materiales de tierra podrían mejorar la energía del CV y las emisiones de carbono. De la misma manera, Pircozfar et al. [14], propusieron la misma comparación en Palestina y los resultados muestran que los impactos ambientales, el uso de energía y el potencial de calentamiento global para las casas contemporáneas son, en su mayoría, muchos más altos que los de las casas tradicionales.

Desde el punto de vista económico, las construcciones con tierra son más accesibles para los usuarios con bajos recursos. En este camino, Morales-Cristóbal et al. [15], propusieron un estudio económico comparativo con casas tradicionales y contemporáneas en México y determinaron que las viviendas construidas con materiales locales son las más económicas y con menos consumo de energía.

La mitad de la población del mundial viven o trabajan en edificios construidos con tierra barro o arcilla, distribuidos en todo el mundo (e.g. [16,17,18,19,20]) En particular, la mampostería de adobe con alta inercia térmica se debería utilizar donde se produzcan fluctuaciones de temperatura diurnas de 7°C a 10°C (superiores a 10°C es altamente recomendable), especialmente en clima cálidos y secos [9].

Para resumir, la mampostería de adobe es una estrategia pasiva que permite el control del confort interior por medio del almacenamiento del calor y desfase de la onda térmica, debido a las propiedades térmica del material. Este recurso tecnológico funciona mejor en climas cálidos y secos, con fluctuaciones diurnas superiores a 10°C. En el caso de estudio, este sistema constructivo fue correctamente elegido según el clima del lugar.

- **Sistema constructivo de doble cubierta ventilada.**

El sistema constructivo de doble cubierta ventilada, conformado con vigas estructurales de madera, ladrillo cerámico y chapa de zinc, se utilizó en la envolvente superior. El sistema proporciona una segunda cubierta por encima del techo de una edificación dejando un espacio vacío entre ellos. La cubierta secundaria contribuye a disminuir las ganancias térmicas al formar un escudo contra la radiación solar y proporcionar sombra al techo principal, por su parte el espacio de aire propicia el desalojo del exceso de calor y humedad mediante la ventilación antes de que puedan ser transmitidos al interior de la edificación [21].

La cubierta es un elemento clave en la transferencia de calor entre el exterior y el interior de los edificios, por estar sujeta a las mayores fluctuaciones térmicas: durante el día alcanza elevadas temperaturas por su exposición directa a la radiación solar y durante la noche, es la parte de la construcción que mas calor pierde, por irradiación hacia el espacio.

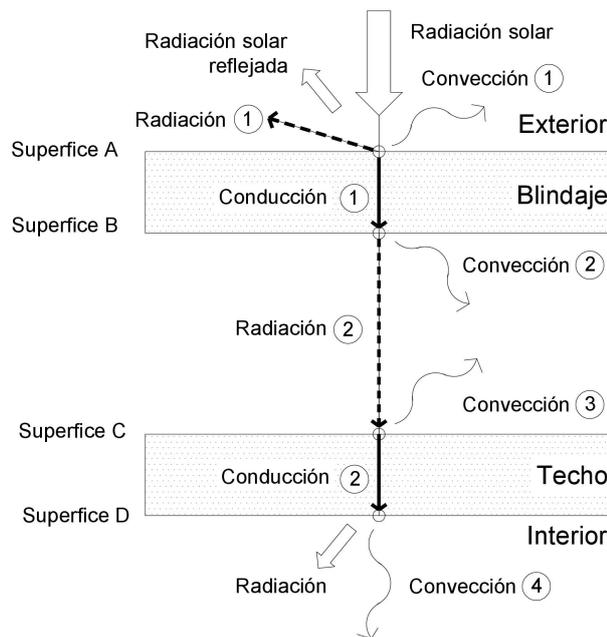


Figura 4.7: Mecanismos de transferencia de calor en la doble cubierta ventilada [21].

La figura 4.7, muestra un esquema de los componentes principales de la doble cubierta ventilada, así como los mecanismos de transferencia de calor que intervienen en el sistema, desde el blindaje externo hacia el espacio interior. La superficie externa (superficie A) del blindaje es receptora de la radiación solar, una parte de ésta es reflejada hacia la atmosfera y otra se transmite por conducción hacia la superficie

interior del blindaje (superficie B). A continuación, el blindaje irradia el calor que recibe hacia la superficie externa del techo principal (superficie C) y parte de este calor se transmite al aire y es disipado mediante convección. Por último, el calor se transmite por conducción de la superficie externa a la superficie interna del techo principal (superficie D), posteriormente hacia el espacio interior por convección y radiación [21].

El material del blindaje de la doble cubierta ventilada (chapa de zinc en este caso), debe cumplir con ciertas características que lo hacen adecuado para que su desempeño térmico sea conveniente, como los coeficientes de absorción (α) y de transferencia del calor (K) bajos. Otras propiedades deseables son la baja capacidad térmica, para evitar que el calor se acumule y los altos valores de reflectancia, para reflejar hacia la atmosfera tanta radiación solar como sea posible.

En el espacio ventilado, el aire se mueve desde el fondo hacia la parte superior del techo bajo el efecto de la flotabilidad, debido a la diferencia de temperaturas, removiendo así el calor acumulado proveniente de las ganancias térmicas solares, por lo tanto las ganancias de calor en el ambiente interior a través del techo principal podrían reducirse, sobre todo en el verano [22]. Luego, por medio de la ventilación que ingresa y egresa por medio de las rejillas de ventilación, se remueve el calor y la humedad interna de manera efectiva hacia el exterior.

- **Sistema constructivo de piso sobre terreno natural.**

El sistema constructivo del piso, conformado por el suelo compactado, contrapiso de cal y piso de baldosas cerámicas se utilizó como envolvente inferior. Este sistema es un disipador del calor por conducción, porque aprovecha la temperatura superficial del suelo, más baja que el aire interior.

- **Mecanismos de transferencia de calor.**

La transferencia del calor exterior-interior-exterior, se produce de manera combinada de los 3 sistemas constructivos, para favorecer el confort térmico en los espacios de la vivienda vernácula. Durante el día, la radiación (directa y reflejada) calienta las superficies externas de los cerramientos y por medio de la conducción se transfiere del exterior a interior, debido a la temperatura interior más baja. Por la noche, con la temperatura exterior más baja, el flujo de calor invierte el sentido hacia el exterior. Se busca el confort térmico interior mediante la convección y la regulación de la ventilación.

Capítulo N°4.

En la figura 4.8, se describe el funcionamiento de los mecanismos de transferencia de calor durante el día y la noche en verano.

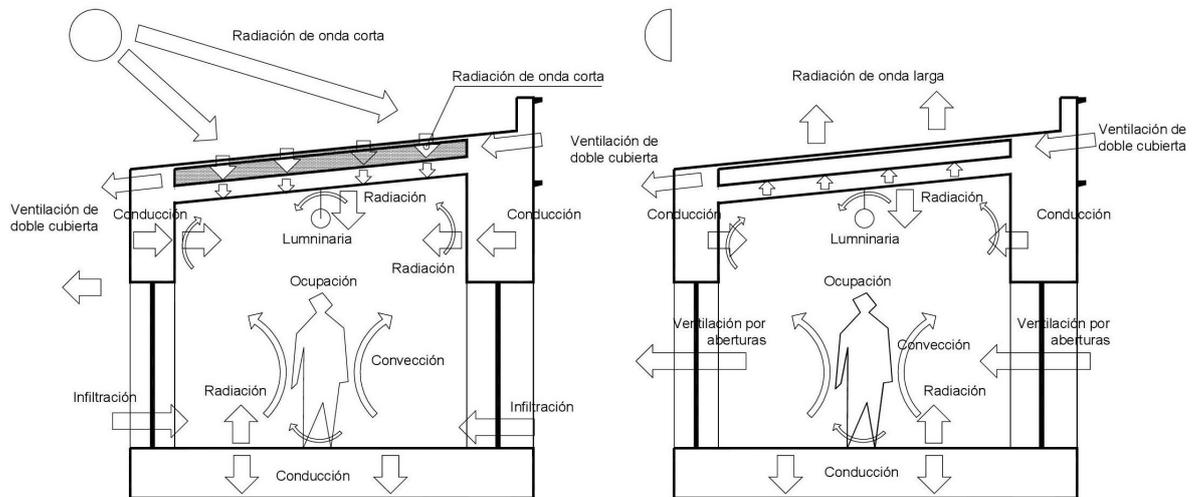


Figura 4.8: Transferencia de calor a través de los sistemas constructivos, durante el día (izquierda) y la noche (derecha) [Elaboración propia].

4.3.2. Modelización térmica equivalente.

En esta sección, la VSV se ha graficado y modelado con los programas GoogleSketchup [23] y EnergyPlus [24], vinculados mediante un plugin, con el propósito de determinar las cargas térmicas del MTE. Para la carga de datos, se aplicará el siguiente procedimiento, descrito en el capítulo N°3 (apartado 3.2.2.1): 1) Geometría y elementos constructivos, 2) Zonificación y condicionantes normativos, 3) Perfil de uso de zonas y 4) Condiciones de contorno.

Los datos de la geometría y las propiedades térmicas de los materiales que integran los cerramientos, son particulares para la VSV. La zonificación, las cargas internas, el perfil de uso y el fichero climático, son comunes con la VSC.

Por último, se estudia las condiciones de confort térmico alcanzadas para los días diseño de verano e invierno, por medio del Voto Medio Estimado (con sus siglas en inglés PMV: Predicted Mean Vote) y el Porcentaje Estimado de Insatisfechos (con sus siglas en inglés PPD: Predicted Percentage Dissatisfied).

Debido a la influencia que tienen los cerramientos en el cálculo de la carga térmica de una zona, se deben conocer las dimensiones, sus propiedades térmicas y las condiciones de contorno a las que están sometidos.

Capítulo N°4.

Previamente, hay que disponer de la información de la geometría (medidas de planta y corte de los espacios internos) y las propiedades térmicas de los materiales de las envolventes. La VSV, por tratarse de una construcción antigua, no disponía de la documentación gráfica o las características de los elementos constructivos. Para resolver este inconveniente, se ejecutó el relevamiento in situ de las dimensiones de todos los espacios, los espesores de las envolventes y los materiales que la integraban. Las características físicas de los elementos constructivos, se consiguieron en la bibliografía. La figura 4.9, muestra el modelo geométrico de la VSV creado por GoogleSketchup.

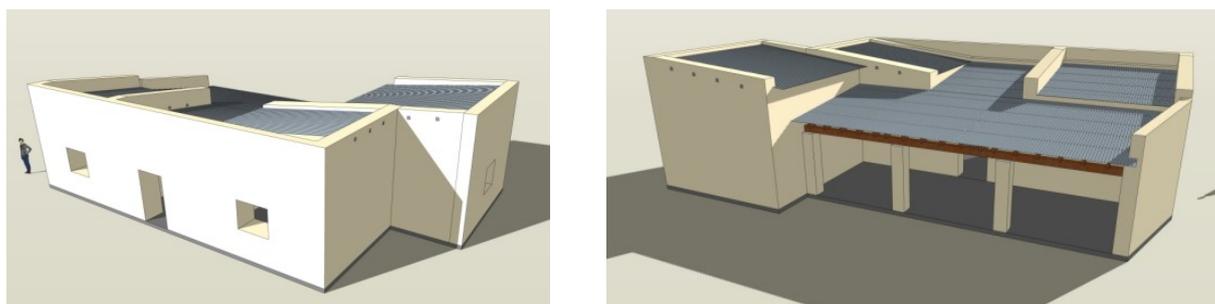


Figura 4.9: Modelo geométrico de la VSV: vista este (izquierda) y vista oeste (derecha) [Elaboración propia].

En la tabla 4.1, se describen las propiedades necesarias de los materiales de los cerramientos opacos de la VSV. Las propiedades térmicas del adobe se han obtenido de Abanto et al [25].

Tabla 4.1. Propiedades térmicas de los materiales de la VSV.

Elementos constructivos.	Espesor.	Conductividad térmica.	Densidad.	Calor específico.
	(m)	(W/m.K)	(Kg/m ³)	(J/kg.K)
Pared externa e interna.				
Revoque de cal.	0.02	1.8	2100	1000
Bloques de adobe.	0.70	0.3	1700	670
Revoque de cal.	0.02	1.8	2100	1000
Techo.				
Chapa ondulada de zinc.	0.002	60	7800	450
Cámara de aire.	0.15			
Bovedilla cerámica.	0.02	1	2000	800
Viga de madera secundaria.	0.02	0.28	400	1600
Viga de madera principal.	0.15	0.28	400	1600
Piso.				
Tierra compactada.	0.1	0.8	1700	1000
Contrapiso de cal.	0.02	1.8	2100	1000
Baldosa cerámica.	0.02	2.3	2500	1000

Capítulo N°4.

En cuanto a los cerramientos semitransparentes, las ventanas de la VSV tienen vidrio simple y marco de madera; el valor de transmitancia térmica es $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ y el valor del factor solar es 0.8. Las ventanas están equipadas con cortinas para proporcionar sombra interna.

Para estudiar y comparar edificios con la misma función, en nuestro caso confort térmico, los modelos térmicos deben ser equivalentes o con características similares. En el caso particular de la VSV, el modelo térmico debe ser equivalente al de la VSC (estudiada en el capítulo N°5). A continuación, se describen las equivalencias: 1) Zonificación y condicionantes normativos, 2) Perfil de uso de las zonas y 3) Condiciones de contorno (fichero climático).

Lo primero que hay que hacer es decidir en cuantas zonas térmicas vamos a dividir la VSV. Se define zona térmica, al espacio (volumen) que tiene el mismo control de temperatura [26].

Se han considerado 3 zonas para realizar el cálculo de las cargas térmicas, que se corresponden con las 3 estancias principales de la VSV: 1) Estar comedor, 2) Dormitorio norte y 3) Dormitorio sur. La zona térmica exceptuada del cálculo comprende al zaguán y la galería. En la figura 4.10, se identifican las zonas térmicas en la planta.

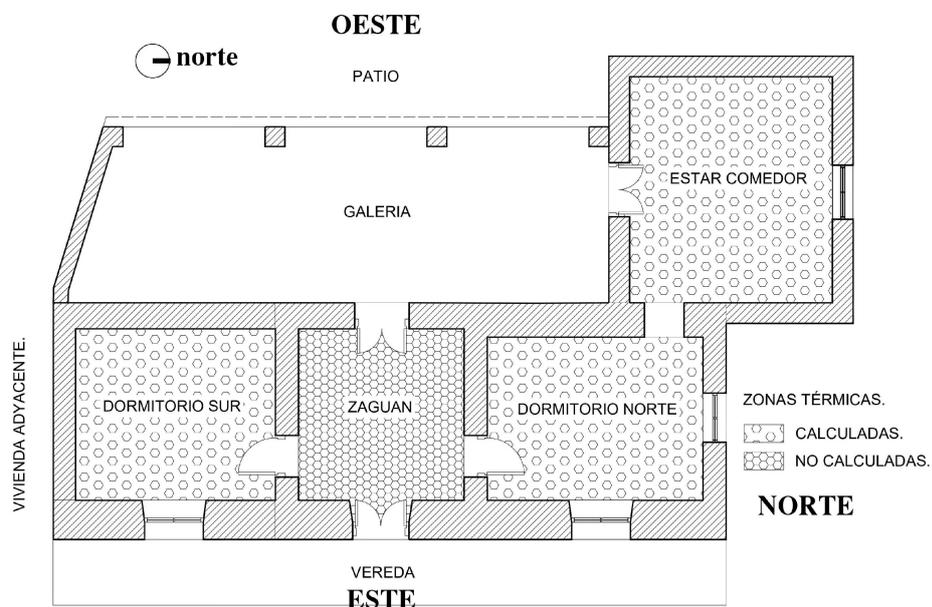


Figura 4.10: Zonas térmicas de la VSV [Elaboración propia].

La tabla 4.2, resumen las principales dimensiones de cada zona. La superficie total climatizada es de 47.44 m^2 .

Tabla 4.2. Dimensiones de las zonas térmicas.

Zonas / Geometría.	Superficie suelo (m ²).	Volumen (m ³).	Altura (m).
Comedor.	18.86	68.74	3.48-3.81
Dormitorio norte.	14.48	52.61	3.46-3.81
Dormitorio sur.	14.10	51.74	3.53-3.81
Zaguán.	11.69	36.54	2.95-3.30

En el capítulo N°3, se definieron los condicionantes normativos. La calidad del aire interior se mantiene mediante renovación con infiltración y ventilación. Según IRAM 11659 [27], la tasa de ventilación, se fijan en 1.5 renovación de aire por hora y las temperaturas de consigna de las zonas climatizadas son de 20°C en invierno y 26°C en verano.

Se utilizará el perfil de uso de las zonas y las ganancias internas diarias de la VSC, definidas en el capítulo N°2 (apartado 2.3.1).

Las condiciones de contorno pretenden representar de la forma más exacta posible la relación que tienen los cerramientos que delimitan la vivienda con su entorno. En la VSV se pueden identificar cinco tipos de superficies: 1) Muro que limita con otra vivienda, 2) Techo, 3) Suelo, 4) Superficies que limitan con el zaguán y 5) Paredes exteriores.

El muro que limita con otra vivienda (al sur) y el zaguán, se plantea la condición de contorno de temperatura idéntica. Esto supone que las dos superficies de estos cerramientos se encuentran a la misma temperatura, es decir, supone que la zona adyacente tiene las mismas características y condiciones térmicas que la del modelo.

Las superficies exteriores y techo, están expuestos a condiciones de temperatura exterior, al viento y al sol. El fichero climático con extensión EPW, para la simulación del modelo térmico con EnergyPlus, fue obtenido con el programa Meteonorm [28].

Concluida la simulación con el programa EnergyPlus, se han obtenido como resultados las demandas de frío y calor del MTE de la VSV, por horas y durante todo el año.

4.3.3. Análisis de confort térmico.

Con los resultados de la simulación térmica del MTE de la VSV, estudiamos las condiciones de confort térmico alcanzadas por medio del cálculo del PPD y el PMV, de acuerdo a la norma ISO 7730 [28][29]. En el capítulo N°3 (apartado 3.2.2.3), se

definen los parámetros por zonas: 1) La vestimenta para invierno y verano, 2) Estado metabólico y 3) velocidad del viento.

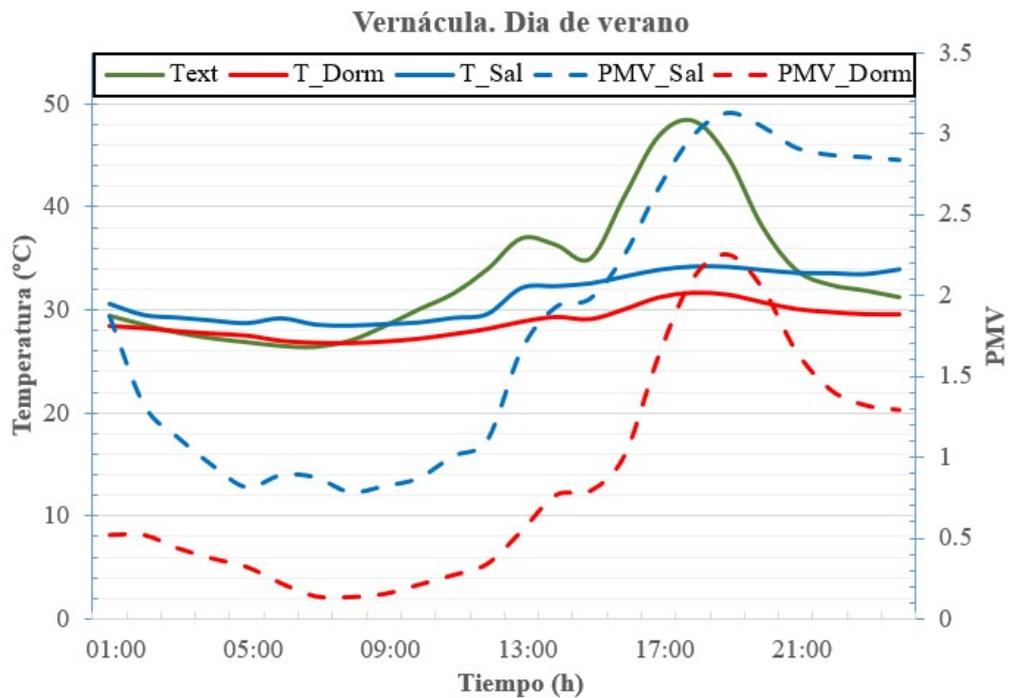


Figura 4.11: Análisis de confort térmico para el día de diseño de verano [Elaboración propia].

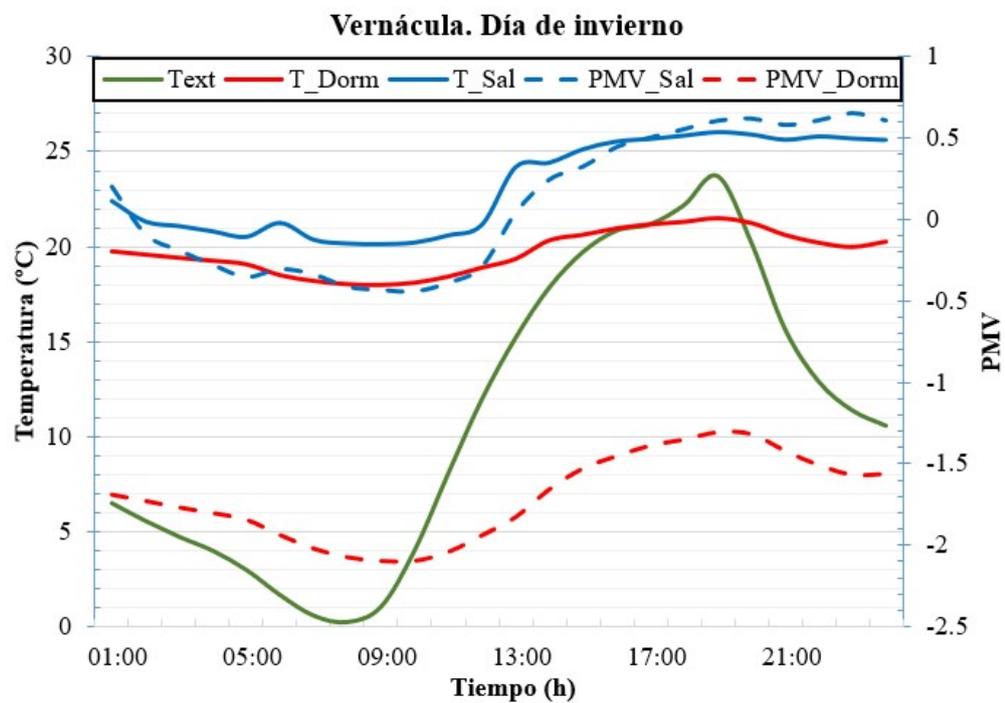


Figura 4.12: Análisis de confort térmico para el día de diseño de invierno [Elaboración propia].

Capítulo N°4.

En las figuras 4.11 y 4.12, se representan las temperaturas y PMV para los días de diseño de verano e invierno. Las líneas continuas representan las temperaturas (eje izquierdo): temperatura exterior (Text), temperatura del dormitorio norte (T_Dom) y temperatura de la sala de estar (T_Sal), mientras que las líneas discontinuas el PMV (eje derecho).

Durante el verano, el dormitorio norte está en condiciones de confort durante el periodo de ocupación (de 24 a 06 horas) con un PMV menor a 0.5 (PMV entre -0.5 y 0.5). Sin embargo, en la sala de estar presenta un PMV superior a 1 (disconfort) la mayor parte del periodo de ocupación (06 a 24 horas). En invierno, ocurre lo contrario; en la sala de estar, las condiciones de confort son satisfactorias (PMV entre -0.7 y 0.7) pero no en el dormitorio norte con valores de PMV desfavorables (menores que -1). Una de las razones para que esto ocurra es la inercia térmica de las paredes de adobe. En verano, la ganancia solar en horas diurnas afecta directamente a la ocupación en la sala de estar, con temperaturas exteriores cercanas a los 48°C. Sin embargo, la evolución de la temperatura interior está amortiguada por la acumulación de calor en los cerramientos de la vivienda, que se traduce en una temperatura superficial más baja lo que mejora la sensación térmica de los ocupantes en el interior. En invierno el proceso es el contrario, ya que la acumulación de la radiación solar en las paredes es aprovechada por la noche en el dormitorio para aumentar la temperatura superficial y mejorar el confort térmico.

De todos modos, cabe destacar que, en este tipo de construcciones para alcanzar las condiciones de confort, se requiere un sistema de climatización.

La República Argentina se ha dividido en 5 zonas de acuerdo con el grado de peligrosidad sísmica. La provincia de Catamarca se encuentra en la zona 2 (moderada) [30]. En sintonía con esta zonificación, la norma vigente de construcciones de mampostería, establece que las vigas de encadenado de hormigón armado, serán iguales al espesor del muro [31]. Esta condicionante ha repercutido negativamente en las construcciones de adobe, ante la necesidad de reducir los espesores de muros (generalmente a 20 cm) por economía, en detrimento de la inercia térmica.

Para evaluar la inercia térmica de las paredes de adobe, se ha comparado la evolución en un día típico de verano de la temperatura de la zona (líneas continuas) y el PMV (líneas discontinuas) de la sala de estar y dormitorio norte, con la aplicación de la normativa sísmica, al reducir los espesores de muros a 20 cm. En las figuras 4.13 y 4.14 se muestra la influencia de la inercia térmica en un día típico de verano de la sala de estar y dormitorio norte.

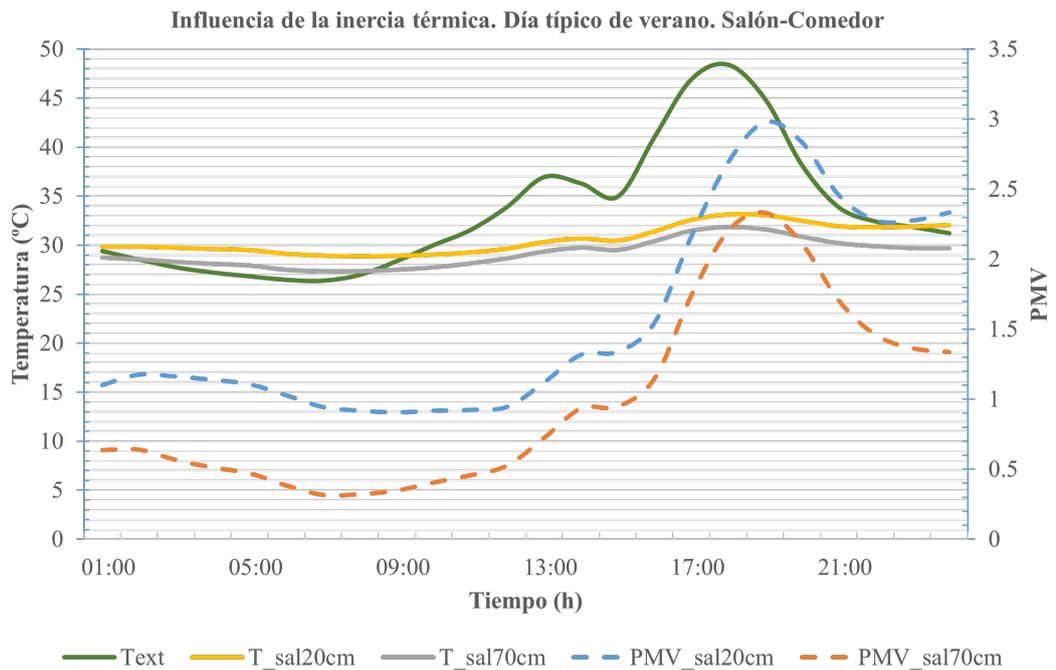


Figura 4.13: Comparación de la inercia térmica en cerramientos de 20 y 70 cm, para un día típico de verano [Elaboración propia].

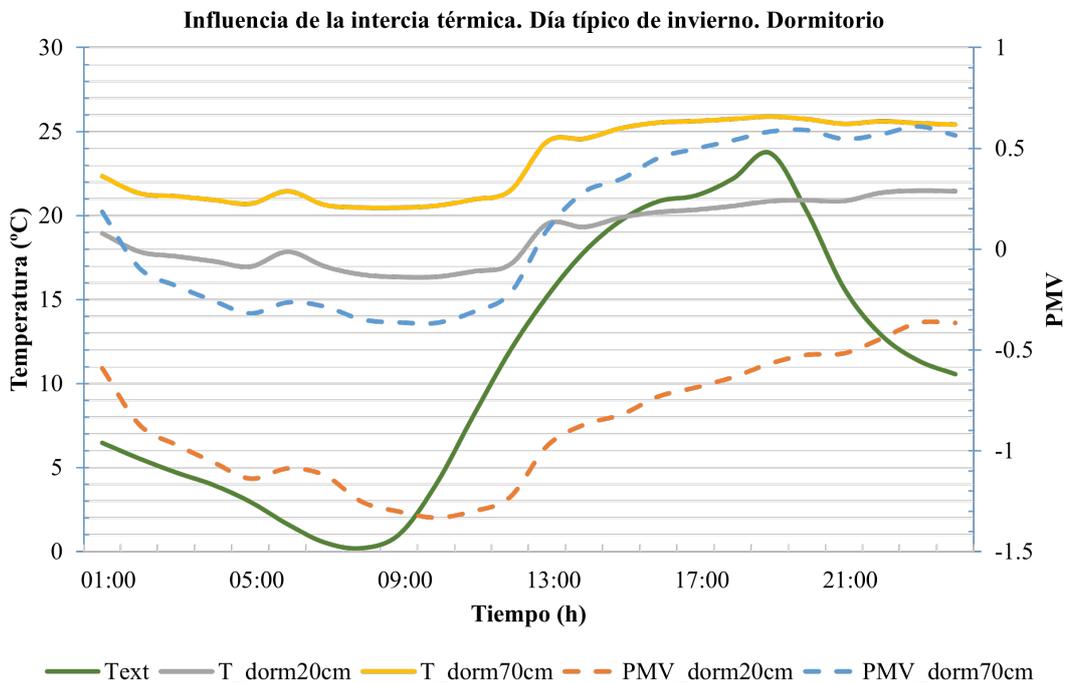


Figura 4.14: Comparación de la inercia térmica en cerramientos de 20 y 70 cm, para un día típico de invierno [Elaboración propia].

En primer lugar, se observa que el espesor de 70 cm de adobe proporciona un mayor aislamiento térmico con respecto al exterior que es de 20 cm, dando lugar a una

temperatura menor durante el día y, en mayor medida, durante las horas nocturnas. La influencia de la inercia térmica se observa sobre todo durante el periodo de la noche. El caso del bloque de adobe de 70 cm provoca un desfase temporal de la temperatura interior entre el exterior y el interior más importante que el caso de 20 cm, que, junto con la apertura de ventanas al inicio de la noche, hace que las condiciones de la zona durante la noche sean más favorables tanto en la temperatura seca como en la sensación de confort, con valores de PMV más favorables.

4.3.4. Cálculo de energía primaria y emisiones de CO₂.

A continuación, se describen los supuestos considerados en cada proceso unitario, para el cálculo de los flujos de referencia de energía primaria (MJ/m²) y emisiones de CO₂ (tCO₂/m²), según los procedimientos explicados en el capítulo N°3 (apartado 3.2.2.4).

4.3.4.1. Energía incorporada y operativa.

En la producción y pérdida de materiales en obra, se utilizó la base de datos BEDEC [33], para realizar el cálculo de los elementos constructivos, integrados por tres procesos unitarios: 1) Extracción de materia prima, 2) Transporte del origen a la fábrica y 3) Transformación en fábrica.

El transporte de materiales desde la fábrica a la construcción, no se consideró, suponiendo que los materiales a principios del siglo XX estaban disponibles localmente y eran transportados en vehículos de tracción a sangre.

No se consideró el transporte de personal, suponiendo que, a principios del siglo XX, los operarios de la construcción se desplazaban con vehículos de tracción a sangre.

No se consideró la maquinaria de construcción, suponiendo que esta tecnología no estaba disponible para la construcción a principios del siglo XX.

Los trabajos de mantenimiento corresponden a los habituales en vivienda sociales: la reparación de revoques por desprendimientos o aparición de humedades, pintura, cambio de luces y reparación de techos.

Para las VSV y VSC, se ha seleccionado un sistema de climatización, con un COP (coeficiente de rendimiento) de 2.5 para calefacción y 2.2 para refrigeración.

4.3.4.2. Energía de demolición.

No se consideró la maquinaria utilizada para demoler el edificio al final de su ciclo de vida, porque en la mayoría de los casos se realiza de forma manual.

Tampoco se consideró el transporte a disposición final, asumiendo que todos los materiales se reutilizan (por ejemplo, el adobe se pulveriza y se convierte en tierra de jardín).

Por último, no se consideró la planta de tratamiento de residuos del municipio de SFDVDC, porque los materiales de demolición se reutilizan en el sitio de construcción.

4.3.5. Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.

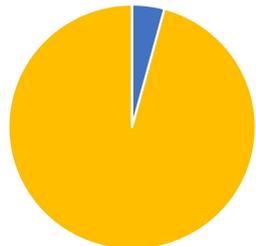
Los resultados del cálculo de la energía primaria y emisiones de CO₂, del ciclo de vida de las VSV y la VSC (analizada en el capítulo N°5), permitieron especificar el criterio de corte y determinar que procesos unitarios fueron excluidos del MTE. En este sentido, por el nivel de importancia ambiental, los procesos unitarios que no fueron excluidos y quedaron en el MTE son: 1) Producción de materiales, 2) Pérdidas de materiales, 3) Maquinarias y 4) Calefacción y refrigeración.

Para determinar la medida de los flujos de referencia de la función confort térmico, con las entradas de energía primaria (MJ/m²) y las salidas de emisiones CO₂ (tCO₂/m²), se dividen los resultados de la energía primaria (MJ) y emisiones de CO₂ (tCO₂), de cada proceso unitario incluido en el MTE de la VSV, en la superficie total climatizada (47.44 m²).

Tabla 4.3. Energía primaria y emisiones de CO₂, asociadas a cada proceso unitario en 100 años.

Proceso unitario.	Energía primaria. (MJ/m ²)	Emisiones de CO ₂ . (tCO ₂ /m ²)
Producción de materiales.	1350.4	0.1
Pérdida de materiales.	33.2	0
Maquinarias.	0	0
Total incorporada.	1383.6	0.1
Calefacción y refrigeración.	30622.6	2.04
Total operativa.	30622.6	2.04
Total ciclo de vida.	32006.3	2.14

Energía primaria (MJ/m²) en 100 años.



Producción de materiales 4%

Calefacción y refrigeración 96%

Capítulo N°4.

El proceso unitario maquinarias, si bien no tiene valor alguno en la VSV, se decidió conservarlo porque es importante en la VSC (analizada en el capítulo N°5). La tabla 4.3, resume la energía primaria (MJ/m^2) y emisiones CO_2 (tCO_2/m^2), asociada a cada proceso unitario, en 100 años de ciclo de vida.

La energía del ciclo de vida de la VSV, para un periodo de 100 años, es de 32006.3 MJ/m^2 de energía primaria y 2.14 tCO_2/m^2 de emisiones de CO_2 . La energía operativa representa del total, el 95.68% y el 95.33% de las emisiones de CO_2 asociadas. La energía incorporada, representa del total solo el 4.32% de energía primaria y el 4.67% de emisiones de CO_2 asociadas. Podemos resumir, que la energía operativa y emisiones asociadas representan el mayor impacto del ciclo de vida. En el caso de la energía incorporada, el proceso de producción de materiales representa el 97.60%.

El consumo energético por m^2 y emisiones asociadas en el ciclo de vida, indicador ambiental de eficiencia energética relacionada con el diseño arquitectónico, lo podremos establecer al compararlo con la VSC, analizada en el capítulo N°5.

4.4. Evaluación de impacto del ACV.

Como se explicó en el capítulo N°3 (apartado 3.2.3), la evaluación de impacto tiene como propósito determinar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del inventario del ciclo de vida. En ese sentido, se realizó la evaluación de la energía primaria, emisiones de CO_2 y confort térmico mediante los indicadores ambientales: 1) Demanda Acumulada de Energía (DAE), 2) Potencial de Calentamiento Global (PCG) y 3) Nivel de Confort Térmico (NCT).

El primer y más evidente resultado, es que la energía operativa es mucho más alta que la energía incorporada. La energía operativa, representa el 95.7% de la energía del ciclo de vida. Las diferencias son tan altas que incluso, en caso de reducir la vida útil prevista, los resultados serían similares. Los resultados son coherentes con la bibliografía estudiada en el capítulo N°3 (apartado 3.1). Por otro lado, las horas de incomodidad son del 47.9%, valor que justifica la instalación de un sistema de climatización. El % mínimo de incomodidad que hemos establecido es el límite de confort, donde empieza el disconfort. En este caso: Categoría C: $\text{PPD} < 15\%$ y PMV entre -0.7 y 0.7. Nivel de expectativa aceptable y moderada. Puede usarse para edificios existentes. Los ventiladores sin climatización no se han contemplado por las condiciones tan desfavorables exteriores y las cargas térmicas tan importantes en la vivienda.

Capítulo N°4.

En cuanto a la energía incorporada, el mayor consumo se produce en el proceso unitario de producción de materiales. La figura 4.15, muestra la descomposición de la energía incorporada de los diferentes componentes constructivos de la VSV. La envolvente superior representa el 67.20 % de la energía incorporada total.

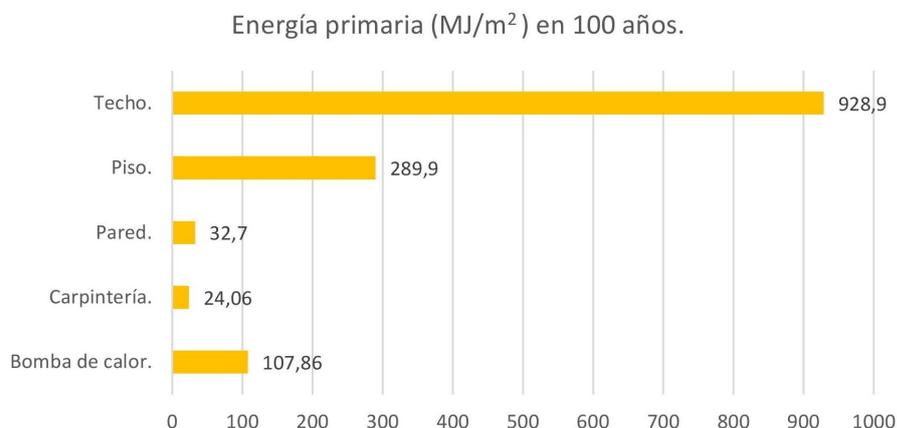


Figura 4.15: Energía incorporada de cada componente constructivo (MJ/m²) [Elaboración propia].

Centrándonos en los elementos constructivos, la figura 4.16 presenta la energía incorporada de todos ellos. Los materiales cerámicos constituyen la mayor parte de la energía incorporada con el 45%.

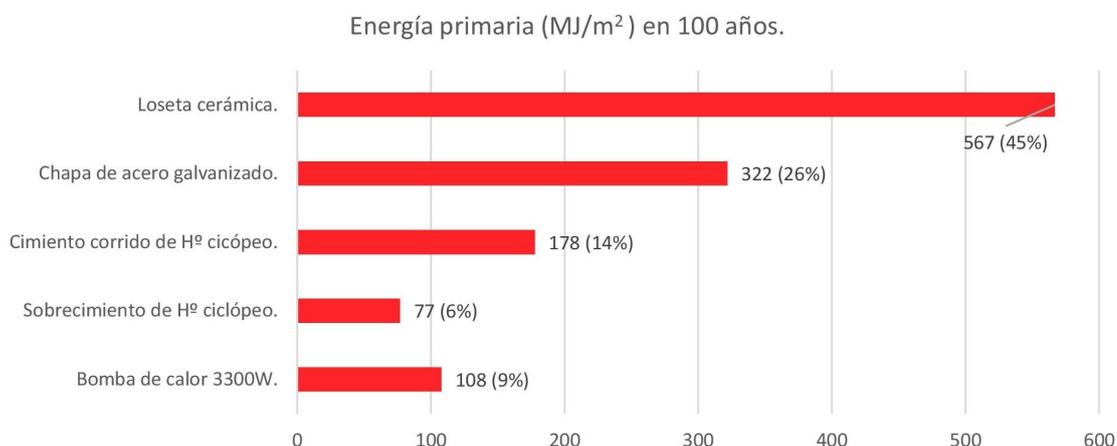


Figura 4.16: Energía incorporada de cada elemento constructivo (MJ/m²) [Elaboración propia].

Es interesante analizar la descomposición de la energía operativa durante el año promedio (en un período de 100 años). A tal efecto, la figura 4.17, muestra la energía operativa necesaria para refrigerar y calefactar cada mes del año. De mayo a septiembre la mayor parte de la energía para calefacción y el resto de los meses se dedica casi exclusivamente a la refrigeración. Durante el año, se utiliza un total de 24341.32 MJ/m²

y 6281.28 MJ/m² para enfriar y calentar respectivamente la VSV. La demanda de refrigeración representa el principal impacto con el 79.49 % de la energía operativa total. La inercia térmica y el efecto del techo ventilado que extrae el calor de la casa por convección natural, condicionan el consumo energético.

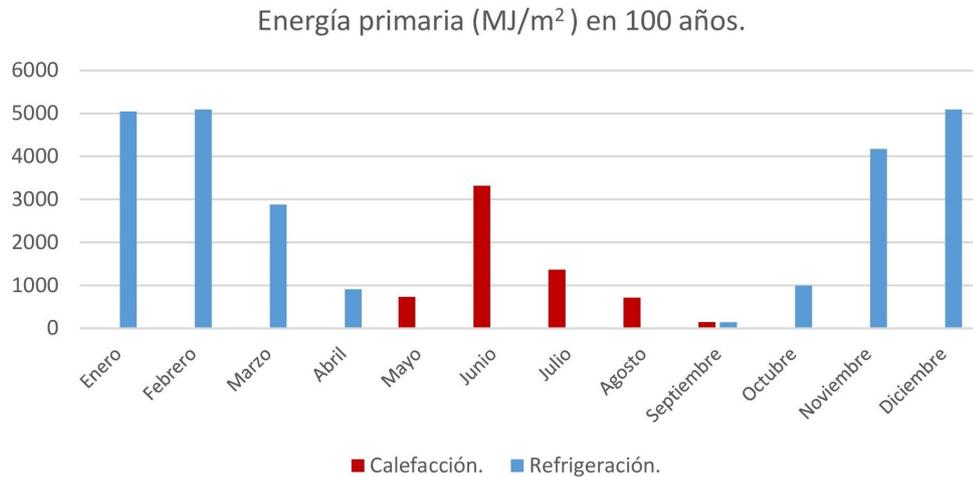


Figura 4.17: Energía operativa requerida para refrigerar y calefactar (MJ/m²) [Elaboración propia].

La influencia de la inercia térmica se cuantifica en términos de energía operativa en la figura 4.18. Se compara la energía primaria mensual en refrigeración (ref) y calefacción (cal), para el caso de mampostería de adobe de 70 cm (caso base de estudio) con respecto a un espesor de 20 cm.

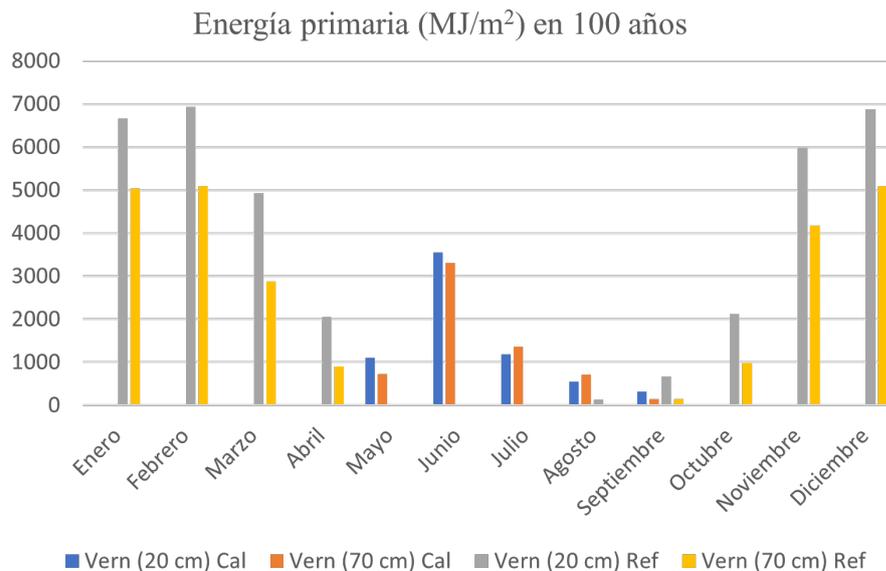


Figura 4.18: Comparación de la inercia térmica y la energía operativa para refrigerar y calefactar (MJ/m²) [Elaboración propia].

Capítulo N°4.

Se destaca que la reducción de la inercia térmica y el efecto del techo ventilado, tiene un fuerte impacto en el consumo de energía para refrigeración. En este sentido, es notable el aumento del consumo de energía primaria mensual de la VSV con mampostería de adobe de 20 cm respecto al caso base de estudio con 70 cm, para los meses más calientes. Sin embargo, no tiene el mismo efecto en el consumo de energía para calefaccionar los meses más fríos, donde la diferencia es mínima.

A continuación, se han estudiado las condiciones de confort durante todo el año. La tabla 4.4, resume el porcentaje de horas ocupadas de cada zona, según las categorías de confort térmico, definidas en el capítulo N°3 (ver apartado 3.2.2.2).

Tabla 4.4. Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort.

ZONA.	COMEDOR (%).	DO1 (%).	DO2 (%).	PROMEDIO (%).
CATEGORÍA A.	11.9	19.5	20.1	17.1
CATEGORÍA B.	16.8	24.8	21.1	20.9
CATEGORÍA C.	11.6	15.8	14.7	14.1
DISCONFORT.	59.7	39.9	44.1	47.9

Hoy en día, los requisitos de confort en los edificios son muy exigentes y se suele esperar un mínimo de categoría B, aunque durante una parte limitada del año podría aceptarse la categoría C. En la VSV las horas de incomodidad promedio son del 48%. Esto es debido a que las condiciones exteriores de la zona de Catamarca son muy extremas en verano, con temperaturas muy altas. Los materiales constructivos utilizados en la vivienda vernácula son favorables para paliar el disconfort térmico interior en las zonas, pero no son suficientes. Tal y como se ha demostrado anteriormente en la figura 11, la evolución del PMV mejora en las horas más desfavorables de un día de verano típico con valores de espesor de adobe más altos, pero, aun así, hay bastantes horas en las que se supera el valor límite superior de PMV de 0.7 que establece la norma. Este valor justifica la instalación de un sistema de climatización para mejorar las condiciones de confort.

4.5. Interpretación del ACV.

Luego de realizar el análisis de inventario y la evaluación de impacto ambiental, podemos afirmar que el consumo de energía operativa, las emisiones de CO₂ asociadas y el disconfort térmico, durante el funcionamiento de la VSV, representa el mayor impacto ambiental del ciclo de vida. Para reducirlo, se pueden realizar las siguientes acciones:

Capítulo N°4.

- a Reducir la demanda energética con un mejor diseño de la vivienda: protección solar en verano, aprovechamiento de las ganancias solares en invierno, reducción de coeficientes de transferencia del calor, etc.
- b Utilizar sistemas HVAC más eficientes, en nuestro caso la bomba de calor.
- c Mejorar el mix eléctrico hacia una mayor aportación de las energías renovables.

4.6. Resumen y conclusiones.

En el capítulo N°4, se describe y analiza la VSV en modo de evolución libre y se cuantifica el confort térmico. Luego se calcula y evalúa la energía incorporada, operativa y emisiones de CO₂ asociadas, para determinar el mayor impacto ambiental, en este caso el consumo energético y emisiones del proceso unitario de climatización. También se evalúa el confort térmico y se determina el porcentaje de horas ocupadas en zonas, para cada categoría de confort y el disconfort térmico. Por último, se formulan las recomendaciones necesarias para reducirlo. Las conclusiones son:

- 1 La energía operativa (95.7%) es muy superior a la energía incorporada (4.3%). En cuanto a emisiones de CO₂ asociadas ocurre lo mismo (95.3%-4.7%). Incluso en el escenario donde la contribución de las energías renovables aumente en el mix eléctrico, no se podrá revertir este balance.
- 2 En la energía operativa, la demanda de refrigeración representa el principal impacto con el 79.5 %, con respecto a la calefacción. Las medidas de mejora para reducir la demanda de refrigeración tienen prioridad.
- 3 El componente constructivo con mayor consumo de energía incorporada, es el techo (67.2%) y el elemento constructivo es el material cerámico (45%).
- 4 Los niveles de confort no son adecuados en modo de evolución libre, con 48% de horas por zona en disconfort térmico. Se requiere un sistema de climatización para alcanzar el confort térmico durante las horas de ocupación.
- 5 Si se mejora el diseño con estrategias pasivas y activas, se podría reducir la demanda energética. Se destaca la inercia térmica y el efecto de la doble cubierta ventilada, como estrategias de diseño para la eficiencia energética.

Referencias del capítulo N°4.

- [1] J. Pérez Gil, 2010. "*¿Qué es la arquitectura vernácula? Historia y concepto de un patrimonio cultural específico*". Universidad de Valladolid. ISBN 978-84-8448-862-0.
- [2] G. Gonzalo, 2004. "*Manual de arquitectura bioclimática*". Editorial Nobuko. ISBN 987-1135-07-6.
- [3] R. Gómez, 2010. "*Arquitectura popular de los valles calchaquíes*". Universidad Católica de Salta, 2010. ISBN 978-950-623-053-1.
- [4] D. Gauzin Muller, 2005. "*25 casas ecológicas*". Editorial Gustavo Gili. ISBN 978-84-252-2091-3.
- [5] R. Serra, 2000. "*Arquitectura y clima*". Editorial Gustavo Gili. ISBN 84-252-1767-9.
- [6] W. Blaser, 1999. "*Patios 5000 años de evolución desde la antigüedad hasta nuestros días*". Editorial Gustavo Gili. ISBN 84-252-1702-4.
- [7] M. Evans y S. Schiller, 1991. "*Diseño bioambiental y arquitectura solar*". Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de Buenos Aires. ISBN 950-29-0063-4.
- [8] V. Olgyay, 2006. "*Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*". Editorial Gustavo Gili. ISBN 978-84-252-1488-2.
- [9] G. Minke, G., 2013. "*Manual de construcción con tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*". BRC ediciones. ISBN 978-987-24705-2-4.
- [10] M. Wassouf, 2014. "*Passivhaus. De la casa pasiva al estándar. La arquitectura pasiva en climas cálidos*". Editorial Gustavo Gili, SL. ISBN: 978-84-252-2452-2.
- [11] Rincon, L., Carrobé, A., Martorell, I., Medrano, M., "*Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design*", Journal of Building Engineering 24 (2019) 100732.

- [12] Kansara, T., "Transitional zone design in the desert environment of Abu Dhabi: Vernacular vs. modern", *Sustainable Cities and Society* 23 (2016) 59-67.
- [13] Pakdel, A., Ayatollahi, H., Sattary, S., "Embodied energy and CO₂ emissions of life cycle assessment (LCA) in the traditional and contemporary Iranian construction systems", *Journal of Building Engineering* 39 (2021) 102310.
- [14] Piroozfar, P., Pomponi, F., El-Alem, F., "Life cycle environmental impact assessment of contemporary and traditional housing in Palestine", *Energy and Buildings* 202 (2019) 109333.
- [15] Morales-Cristobal, R., Sánchez-Medrano, M.T., Arista-González, G.J., Suárez-Domínguez, E.J., "Comparison of housing construction systems in the huasteca zone: Vernacular, industrialized and hybrid. Study cases", *Case Studies in Construction Materials* 13 (2020) d00359.
- [16] Huw Heywood, 2017. "101 reglas básicas para una arquitectura de bajo consumo energético". Editorial Gustavo Gili, SL. ISBN: 978-84-252-2845-2.
- [17] J. May, 2011. "Casas hechas a mano y otros edificios tradicionales. Arquitectura popular". Editorial Blume. ISBN: 978-84-9801-523-2.
- [18] S. Naji, 2008. "Art et Architectures berberes du Maroc". Editions la Croisée des Chemins. ISBN: 978-9954-1-0257-4.
- [19] D. Gauzin-Muller, 2017. "Architecture en terre D'aujourd'hui". Edition augmentée. ISBN: 978-2-37375-028-7.
- [20] F. Neila Gonzalez, 2017. "La arquitectura vernácula más posible. Miradas 2". García Marotto Editores S.L. ISBN: 978-84-16806-32-4.
- [21] S. Rodríguez Trejo, 2017. "Diseño y evaluación de un sistema de doble cubierta ventilada para reducir la transmisión de calor al interior de la vivienda media en Puerto Vallarta, Jalisco". Tesis Maestra en Diseño Bioclimático, Universidad Autónoma Metropolitana. Disponible en: <
http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/5944/Diseno_y_evaluacion_de_un_sistema_Rodriguez_Trejo_S_E_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, acceso diciembre 2023.

- [22] Zhang, T., Tan, Y. Yang, H., Zhang, X. "The application of air layers in building envelopes: A review". Applied Energy 165 (2016), pp. 707-734. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.108.
- [23] Programa SketchUp, 2022. Disponible en: <<https://www.sketchup.com/>>, acceso diciembre 2023.
- [24] Programa EnergyPlus, 2022. Departamento de Energía de los Estado Unidos. Disponible en: <<https://energyplus.net/>>, acceso diciembre 2023.
- [25] Abanto, G.A., Karkri, M., Lefebvre, G., Horn, M., Solis, J.L., Gómez, M.M., "Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material". Case Studies in Construction Materials volumen 6, (2017) 177-191.
- [26] G. Calleja, 2008. "La influencia de los sistemas de automatización residencial en la demanda de climatización". Proyecto fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Málaga.
- [27] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2004. "Norma 11659-1. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración".
- [28] Programa Meteonorm. Disponible en: <<https://meteonorm.com/en/>>, acceso diciembre 2023.
- [29] ISO 7730, 2005. "Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort, International Standardization Organization, Geneva".
- [30] M., Gallardo Salazar, 2015. "Confort y bienestar térmico". Ingho, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad de Málaga.
- [31] Reglamento INPRES-CIRSOC 103, 1991. "Normas argentinas para construcciones sismorresistentes. Parte I construcciones en general". Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

Capítulo N°4.

- [32] Reglamento INPRES-CIRSOC 103, 1991. "*Normas argentinas para construcciones sismorresistentes. Parte III construcciones de mampostería*". Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- [33] BEDEC BANCO DE CONSTRUCCIÓN 2022, Instituto de Tecnología de la Construcción (ITeC). Disponible en: <<https://metabase.itec.es/vid/e/es/bedec>>, acceso diciembre 2023.

Capítulo N°5.

Evaluación energética de vivienda social vernácula.

5.1. Introducción.

En el capítulo N°5, se realiza la evacuación de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico del ciclo de vida de la vivienda social contemporánea (VSC), en el marco del método del análisis del ciclo de vida (ACV) propuesto. Posteriormente se realizará la evaluación comparativa del impacto ambiental de la VSC y la vivienda social vernácula (VSV), analizada en el capítulo N°4, para valorar la eficiencia energética y el confort térmico.

En el capítulo N°2, se definió la VSC concebida en el estilo internacional a partir de la segunda mitad del siglo XX y empleada hasta el día de hoy. El estilo internacional promueve el funcionalismo, las formas geométricas simples y el uso de materiales industrializados como el acero, hormigón y vidrio. En este escenario, la vivienda está pensada como un "producto", es decir, que la misma tipología arquitectónica se puede replicar en cualquier lugar del mundo, desconociendo las condicionantes naturales y socioculturales del lugar, provocando de esta manera, un fuerte impacto ambiental debido al alto consumo energético y emisiones de CO₂. En la actualidad, es la vivienda social construida por el Instituto Provincial de la Vivienda (IPV), para cubrir el déficit habitacional.

Por otro lado, en el capítulo N°2 se describe el proyecto de investigación cuyo principal objetivo es la evaluación del impacto ambiental de la VSC. Se realizó la auditoría energética, la simulación del modelo térmico, el análisis de sensibilidad y la propuesta de mejoras tecnológicas con el programa SIMEDIF. En este capítulo utilizaremos el caso de estudio la VSC, localizada en el área periférica de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca (SFDVDC).

Al igual que el capítulo N°4, se aplicará el método de ACV propuesto, para evaluar el impacto ambiental y establecer las recomendaciones. En el análisis de inventario, para

Capítulo N°5.

la modelización térmica equivalente, se utilizarán las ganancias internas y el patrón de uso del proyecto de investigación. Como se explicó anteriormente, la validez de los resultados de la energía operacional y confort térmico, es cuestionable debido a la incertidumbre de numerosas variables de los modelos térmicos. Por esta razón, para dar un marco de certeza al trabajo, las temperaturas anuales simuladas por el programa Meteonorm serán comparadas con los datos climáticos experimentales del proyecto de investigación.

Por último, mediante la aplicación de los indicadores ambientales, se evaluará y establecerán las recomendaciones para 100 años, utilizando las siguientes variables: 1) La energía incorporada de los componentes y elementos constructivos, 2) La energía operativa para refrigerar y calefactar y 3) Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort. Luego, se realizará la comparación del balance global de los modelos térmicos equivalentes (MTE) de las VSC y VSV para 100 años por medio de: 1) Nivel de confort térmico en zonas ocupadas y 2) Consumo de energía primaria en los procesos unitarios, componentes y elementos constructivos y refrigeración.

En el capítulo N°5, se aplicará el método de ACV propuesto, para cuantificar y evaluar la energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico del ciclo de vida de la VSC en modo de evolución libre y comparar los resultados con la VSV, para establecer medidas de mejora. A continuación, se menciona el orden establecido en el presente capítulo:

- 5.2 Análisis de inventario del ACV.
 - 5.2.1 Modelización térmica equivalente.
 - 5.2.2 Análisis del confort térmico.
 - 5.2.3 Cálculo de energía primaria y emisiones de CO₂.
 - 5.2.4 Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.
- 5.3 Evaluación de impacto del ACV.
 - 5.3.1 Comparación de los MTE.
- 5.4 Interpretación del ACV.
- 5.5 Resumen y conclusiones.

5.2. Análisis de inventario del ACV.

El análisis de inventario tiene por objetivo determinar la energía primaria, emisiones de CO₂ y las condiciones de confort térmico alcanzadas en el ciclo de vida de la VSC. En este marco, seguiremos el siguiente procedimiento: 1) Modelización térmica equivalente, 2)

Capítulo N°5.

Análisis de confort térmico, 3) Cálculo de energía primaria y emisiones de CO₂ y 4) Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.

En el capítulo N°2, se definió la VSC, en el contexto del noroeste de la Argentina (NOA). También se realizó la descripción arquitectónica de la tipología, con la localización y el análisis de los componentes (función, forma y tecnología).

5.2.1. Modelización térmica equivalente.

En esta sección, al igual que la VSV, se ha graficado y modelado con los programas GoogleSketchup [1] y EnergyPlus [2], con el propósito de determinar las cargas térmicas del MTE. Los datos de la geometría y las propiedades térmicas de los materiales que integran los cerramientos, son particulares para la VSC. La zonificación, las cargas internas, el perfil de uso y el fichero climático, son comunes con VSV.

Luego de realizar el cálculo de las demandas de climatización del MTE, se realizará la validación con datos experimentales del proyecto de investigación del capítulo N°2 (apartado 2.3.1).

Por último, se estudia las condiciones de confort térmico alcanzadas para los días diseño de verano e invierno, por medio del Voto Medio Estimado (PMV: Predicted Mean Vote) y el Porcentaje Estimado de Insatisfechos (PPD: Predicted Percentage Dissatisfied).

En esta sección, se describen los datos de la geometría y propiedades térmicas de los elementos constructivos de las envolventes de la VSC.

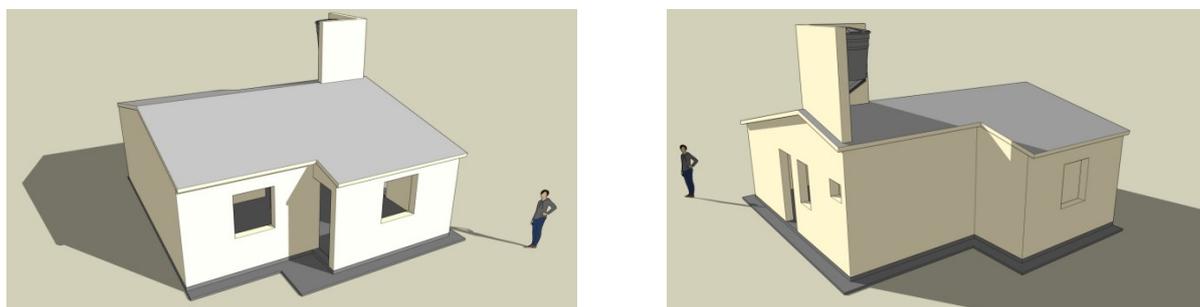


Figura 5.1: Modelo geométrico de la VSC: vista frontal (izquierda) y vista posterior (derecha) [Elaboración propia].

Por tratarse de una vivienda diseñada por arquitectos e ingenieros del IPV, en el marco del Programa Federal de Construcción de Viviendas I, se disponía de la información

Capítulo N°5.

gráfica y técnica, en planos reglamentarios (plantas, secciones, planillas de carpintería, etc.) y el Pliego Particular de Especificaciones Técnicas (con detalle de la técnica constructiva y la descripción de los materiales). Para evitar la incertidumbre de diferencias entre las medidas proyectadas y las reales, se verifico in situ, determinando coincidencias de un 100%. Las propiedades térmicas de los materiales se consiguieron en la bibliografía. La figura 5.1, muestra el modelo geométrico de la VSC creado por GoogleSketchup.

En la tabla 5.1, se describen las propiedades necesarias de los materiales de los cerramientos opacos de la VSC.

Tabla 5.1. Propiedades térmicas de los materiales de la VSC.

Elementos constructivos.	Espesor.	Conductividad térmica.	Densidad.	Calor específico.
	(m)	(W/mK)	(Kg/m ³)	(J/kgK)
Paredes.				
Externa.				
Revoque grueso exterior.	0.02	1.8	2100	1000
Bloque cerámico hueco.	0.18	0.692	730	1000
Revoque grueso interior.	0.02	1.8	2100	1000
Medianera.				
Revoque grueso interior.	0.02	1.8	2100	1000
Ladrillo macizo cerámico.	0.18	0.91	1800	1000
Revoque grueso interior.	0.02	1.8	2100	1000
Interna.				
Revoque grueso interior.	0.02	1.8	2100	1000
Bloque cerámico hueco.	0.18	0.692	730	1000
Revoque grueso interior.	0.02	1.8	2100	1000
Techo.				
Bovedilla cerámica.	0.02	1	2000	800
Carpeta de concreto.	0.02	1.8	2100	1000
Membrana de asfalto.	0.003	0.7	2000	1000
Carpeta de concreto.	0.03	1.8	2100	1000
Poliestireno expandido.	0.03	0.029	30	1000
Asfalto (barrera de vapor).	0.005	0.7	2000	1000
Losa de hormigón armado.	0.10	2.5	2600	1000
Piso.				
Losa de hormigón armado.	0.10	2.5	2600	1000
Carpeta de concreto.	0.02	1.8	2100	1000
Mosaico calcáreo.	0.02	2.3	2500	1000

En cuanto a los cerramientos semitransparentes, las ventanas de la VSC tienen vidrio simple y marco de chapa plegada; el valor de transmitancia térmica es 5 W/m²K y el

Capítulo N°5.

valor del factor solar es 0.8. Las ventanas están equipadas con cortinas para proporcionar sombra interna.

Como se explicó en el capítulo N°4, el MTE de la VSC debe ser equivalente al de la VSV para modelar y comparar las demandas térmicas de climatización. A continuación, se describen las equivalencias: 1) Zonificación y condicionantes normativos, 2) Perfil de uso de las zonas y 3) Condiciones de contorno (archivo climático).

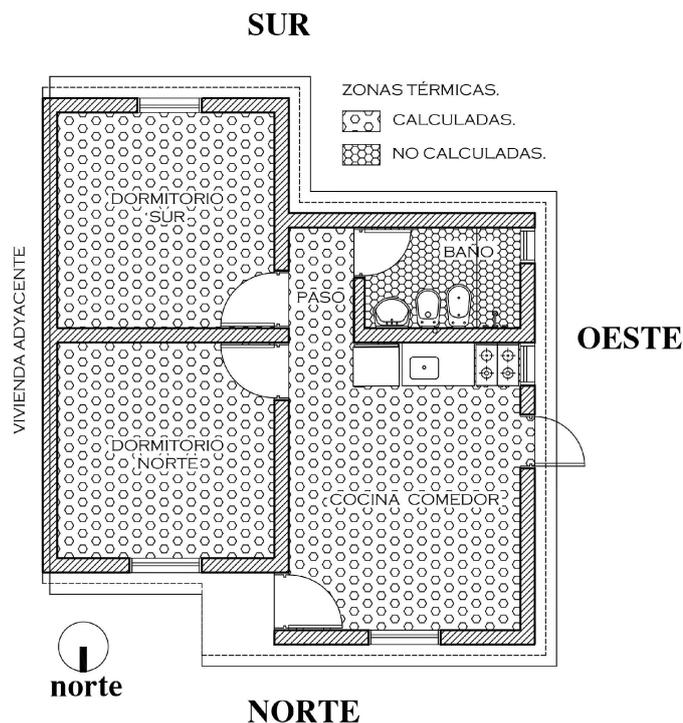


Figura 5.2: Zonas térmicas de la VSC [Elaboración propia].

Se han considerado 3 zonas para realizar el cálculo de las cargas térmicas, que se corresponden con las 3 estancias principales de la VSC: 1) Cocina-comedor, 2) Dormitorio norte y 3) Dormitorio sur. La zona térmica no calculada comprende al baño. En la figura 5.2, se identifican las zonas térmicas en la planta.

Tabla 5.2. Dimensiones de las zonas.

Locales / Geometría.	Superficie suelo (m ²).	Volumen (m ³).	Altura (m).
Comedor.	14.24	39.23	3.20-2.25
Dormitorio norte.	9.00	25.65	3.20-2.50
Dormitorio sur.	9.00	25.65	3.20-2.50
Baño.	3.01	9.11	3.20-2.85

Capítulo N°5.

La tabla 5.2, resumen las principales dimensiones de cada zona. La superficie total climatizada es de 32.24 m².

En el capítulo N°3, se definieron los condicionantes normativos. La calidad del aire interior se mantiene mediante renovación con infiltración y ventilación. Según IRAM 11659 [3], la tasa de ventilación, se fijan en 1.5 renovación de aire por hora y las temperaturas de consigna de las zonas climatizadas son de 20°C en invierno y 26°C en verano.

Se utilizará el perfil de uso de las zonas y las ganancias internas diarias de la VSC, definidas en el capítulo N°2 (apartado 2.3.1).

En la VSC, se pueden identificar cinco tipos de superficies: 1) Muro que limita con otra vivienda, 2) Techo, 3) Suelo, 4) Superficies que limitan con el baño y 5) Paredes exteriores.

El muro que limita con otra vivienda (al este) y el baño, se plantea la condición de contorno de temperatura idéntica. Esto supone que las dos superficies de estos cerramientos se encuentran a la misma temperatura, es decir, supone que la zona adyacente tiene las mismas características y condiciones térmicas que la del modelo.

Las superficies exteriores y techo, están expuestos a condiciones de temperatura exterior, viento y sol.

El fichero climático con extensión EPW, para la simulación del modelo térmico con EnergyPlus, fue obtenido con el programa Meteonorm [4]. Las temperaturas simuladas serán comparadas con los datos climáticos experimentales del proyecto de investigación de la VSC del capítulo N°2 (apartado 2.3.1), para determinar el error absoluto promedio.

Concluida la simulación con el programa EnergyPlus, se han obtenido como resultados las demandas de frío y calor del MTE de la VSC, por horas y durante todo el año.

5.2.1.1. Validación del MTE con datos experimentales.

El MTE de la VSC se ha modelado con EnergyPlus para obtener tras la simulación, las demandas de frío y calor por hora y durante todo un año. Estos resultados han sido comparados y validados con datos experimentales, en las zonas donde no hay equipo de aire acondicionado: 1) Cocina-comedor (zona 2) y 2) Dormitorio norte (zona 4). Las

Capítulo N°5.

figuras 5.3 y 5.4, muestran una vista general de la comparación durante las semanas más calurosas y más frías del año en la cocina-comedor (zona 2).

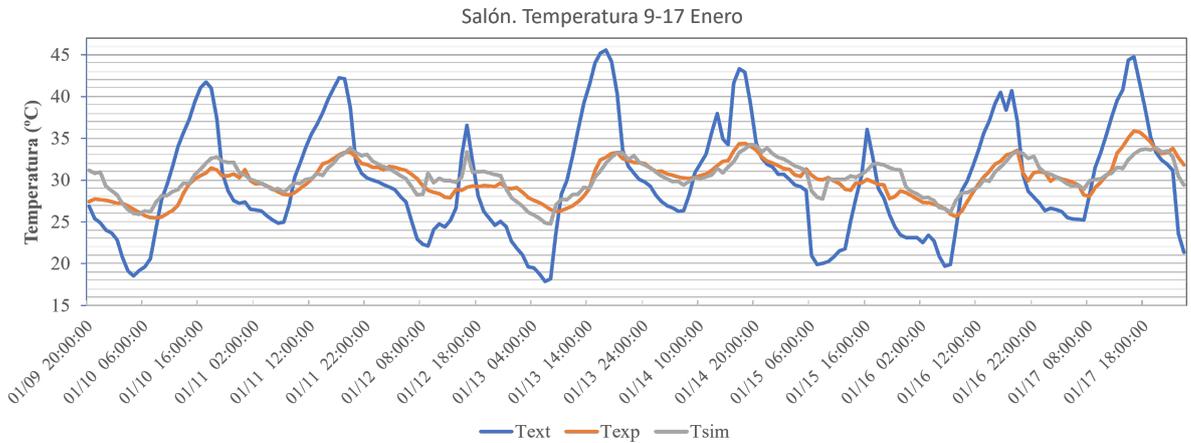


Figura 5.3: Cocina-comedor (zona 2): comparativa entre temperaturas experimentales y simuladas, en temporada de refrigeración [Elaboración propia].

A pesar de que el modelo de simulación no es capaz de reproducir fielmente las temperaturas de las zonas, la aproximación se considera aceptable. El error absoluto promedio es de 0.75°C en enero y de 0.9°C en junio.

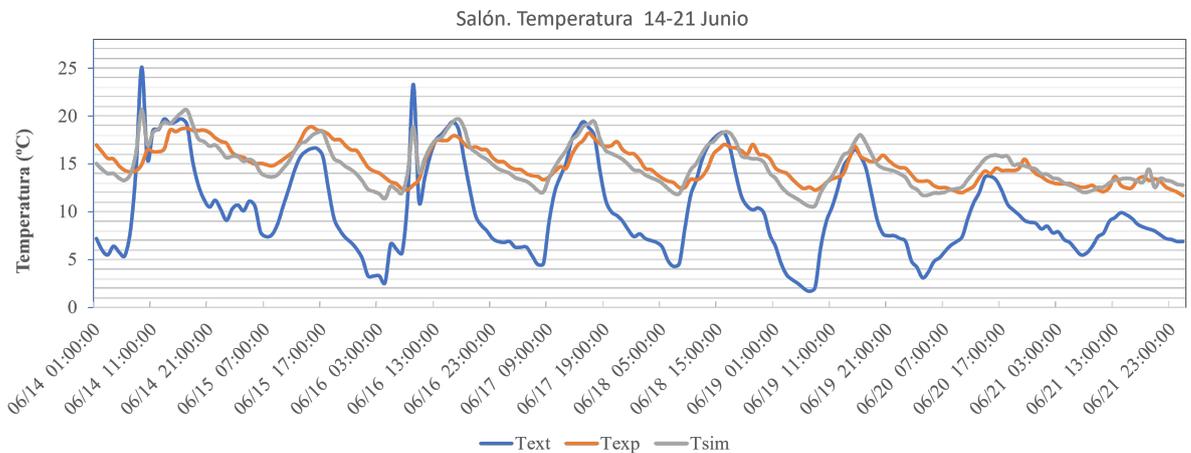


Figura 5.4: Cocina-comedor (zona 2): comparativa entre temperaturas experimentales y simuladas, en temporada de calefacción [Elaboración propia].

Tabla 5.3. Índices MBE y CV RMSE.

Parámetro.	Temperatura de la cocina-comedor		Temperatura del dormitorio norte	
	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración	Calefacción
MBE (%)	2.7	8.3	4.6	2.5
CV RMSE (%)	6.0	12.1	7.5	8.7

Los índices obtenidos para el mes más caluroso (enero) y más frío (junio) del año se muestran en la tabla 5.3 [5].

Los resultados indican que el modelo reproduce bastante bien el comportamiento real de la vivienda. Las infiltraciones y las ganancias internas se han modificado para ajustar el modelo. En este caso, el nivel de infiltración se ha establecido inicialmente en un valor fijo de 2 renovaciones de aire por hora en cada zona. Sin embargo, debido a las discrepancias de los resultados, se ha introducido un perfil semanal de infiltración detallado. El nivel de infiltración aumenta en verano por aperturas de ventanas y en invierno disminuye debido al cerramiento de ventanas.

5.2.2. Análisis del confort térmico.

Una vez validado el MTE de la VSC, estudiamos las condiciones de confort térmico alcanzadas por medio del cálculo del PPD y el PMV, de acuerdo a la norma ISO 7730 [6][7].

En las figuras 5.5 y 5.6, se representan las temperaturas y PMV para los días de diseño de verano e invierno. Las líneas continuas representan las temperaturas (eje izquierdo): temperatura exterior (Text), temperatura del dormitorio norte (T_Dom) y temperatura de la sala de estar (T_Sal) y, mientras que las líneas discontinuas el PMV (eje derecho).

Durante el verano, no se aceptan las condiciones de confort en el dormitorio norte y la sala de estar porque el PMV es mayor a 0.7 (PMV entre -0.7 y 0.7) durante el periodo de ocupación (DN: 24-06 horas y SE: 06-24 horas). En invierno, solo se aceptan las condiciones en la sala de estar porque el PMV es menor a 0.7 (PMV entre -0.7 y 0.7) la mayor parte del periodo de ocupación, pero no así en el dormitorio norte donde el PMV está por debajo de -2. La escasa inercia térmica de las paredes lo explica.

Acorde a las figuras 5.5 y 5.6, se observa que el desconfort se produce en la mayor parte de las horas de ocupación debido la escasa inercia térmica de las envolventes para amortiguar las variaciones de temperatura y radiación solar en invierno y verano. En invierno, el dormitorio norte queda totalmente en zona de desconfort. Para alcanzar las condiciones de confort, se requiere un sistema de climatización.

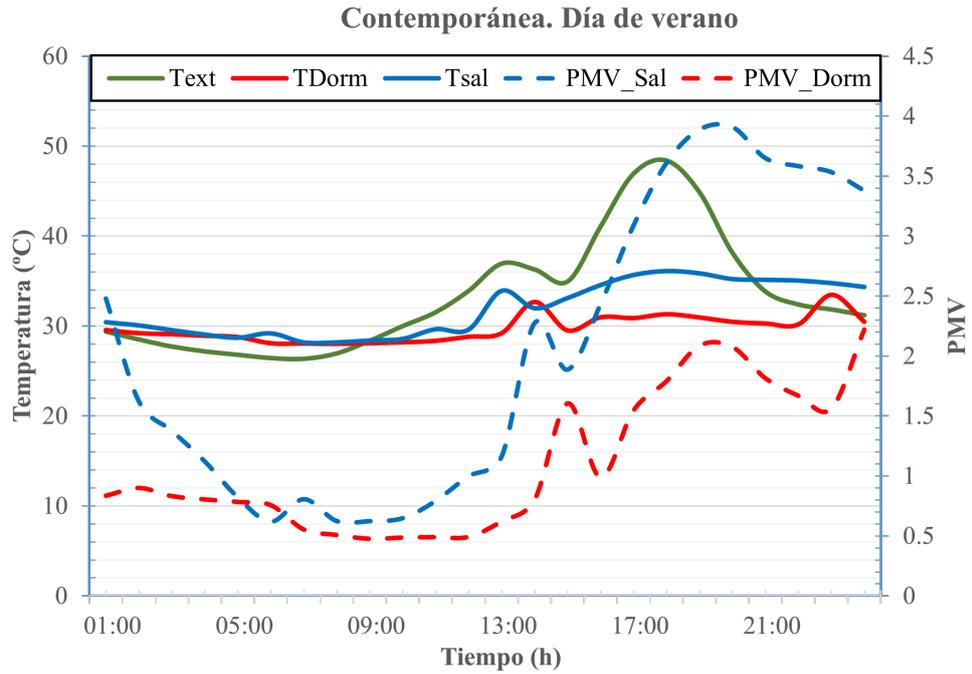


Figura 5.5: Análisis de confort térmico para el día de diseño de verano [Elaboración propia].

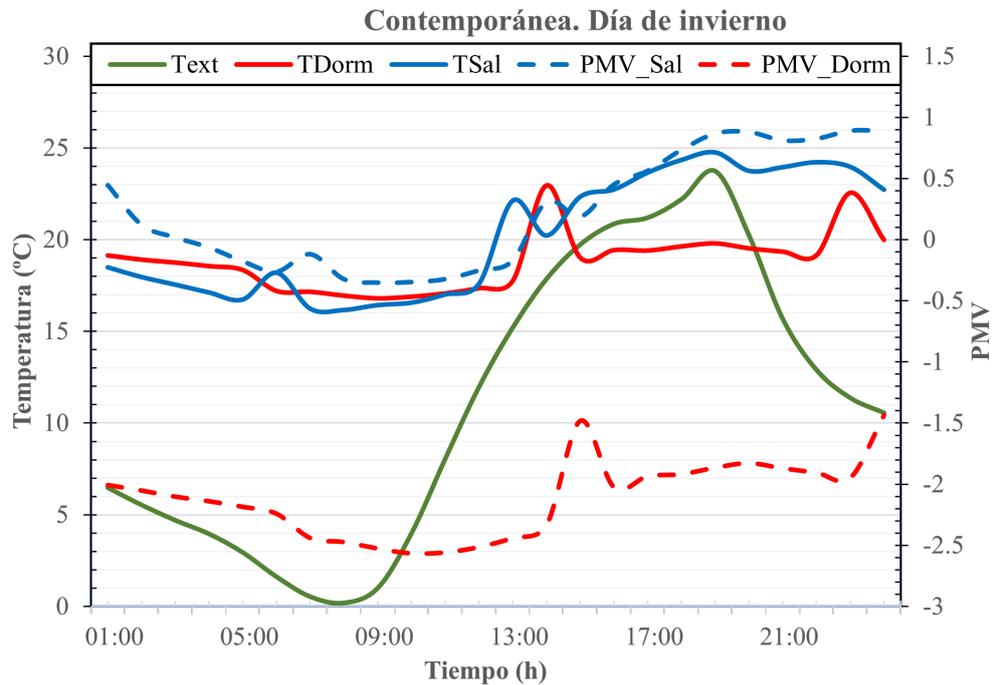


Figura 5.6: Análisis de confort térmico para el día de diseño de invierno [Elaboración propia].

5.2.3. Cálculo de energía primaria y emisiones de CO₂.

A continuación, se describen los supuestos considerados en cada proceso unitario, para el cálculo de los flujos de referencia de energía primaria (MJ/m²) y de emisiones de CO₂ (tCO₂/m²), según los procedimientos explicados en el capítulo N°3 (apartado 3.2.2.4).

5.2.3.1. Energía incorporada y operativa.

En la producción y pérdida de materiales, se utilizó la base de datos BEDEC [8], para realizar el cálculo de los elementos constructivos.

En el transporte de materiales, se evaluó la distancia promedio desde la fábrica a la construcción y el consumo de diésel requerido. Se consideraron dos distancias y medios de transporte: a) Urbano: camión mediano (tipo IVECO) de 10 toneladas, con un consumo medio de 15 litros de diésel cada 100 km, con un volumen de 6 m³, que recorre una distancia máxima de 15 km y b) Interurbano: camión pesado (tipo IVECO) de 16 toneladas, con un consumo medio de 25 litros de diésel cada 100 km, con un volumen de 15 m³, recorriendo distancias superiores a los 15 km.

Se consideró el transporte de un oficial y un ayudante para los trabajos de la construcción, desde la residencia a la obra y desde la obra a la residencia (ida y vuelta), en días hábiles, en vehículos independientes. El vehículo es una motocicleta de 125 cc. La distancia media es de 10 km por día y el consumo de combustible de 3.5 litros de gasolina cada 100 km. El tiempo previsto para la construcción es de 6 meses.

Las herramientas eléctricas utilizadas para la construcción son: hormigonera (550W), vibrador de concreto (1500W), cortadora de mosaico (1200W), soldadora (5500W), amoladora (2000W) y taladro (1500W). Por otro lado, se utilizó maquinaria con motor de combustión (diésel), para movimientos de suelo y manejo de diferentes cargas en la construcción: áridos, tosca, tierra, grava, escombros. El modelo utilizado es la multicargadora CAT 216B3, con una potencia neta 51 HP 38 kW y un consumo de 4.8 litros de diésel por hora.

Los trabajos de mantenimiento corresponden a los habituales en viviendas sociales.

Como se explicó en el capítulo N°4, para la energía operativa se ha seleccionado un sistema de climatización, con un COP (coeficiente de rendimiento) de 2.5 para calefacción y 2.2 para refrigeración.

5.2.3.2. Energía de demolición.

No se consideró la maquinaria utilizada para demoler el edificio, al final de su ciclo de vida, porque en la mayoría de los casos se realiza de forma manual.

La distancia desde la obra hasta el vertedero (planta de tratamiento de residuos), se estimó en 26 km por viaje. Se cubre con un camión urbano (tipo IVECO) de 10 toneladas, con un consumo medio de 15 litros diésel cada 100 km y un volumen 6 m³.

La planta de tratamiento de residuos sólidos, se encuentra actualmente en el municipio de SFDVDC. Si bien, realiza clasificación y venta (cartones y plásticos), los residuos de construcción son depositados en un relleno sanitario sin ningún tipo de clasificación o tratamiento, para reciclarlos e introducirlos nuevamente en el ciclo de vida de la edificación. Por este motivo, no se tuvo en cuenta el consumo de los procesos unitarios dentro de la planta.

5.2.4. Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.

Para determinar la medida de los flujos de referencia de la función confort térmico, con las entradas de energía primaria (MJ/m²) y las salidas de emisiones CO₂ (tCO₂/m²), se dividen los resultados de la energía primaria (MJ) y emisiones de CO₂ (tCO₂), de cada proceso unitario incluido en el MTE de la VSC, en la superficie total climatizada (32.24 m²). La tabla 5.4, resume la energía primaria (MJ/m²) y emisiones CO₂ (tCO₂/m²), asociada a cada proceso unitario, en 100 años de ciclo de vida.

Tabla 5.4. Energía primaria y emisiones de CO₂, asociadas a cada proceso unitario en 100 años.

Proceso unitario.	Energía primaria. (MJ/m ²)	Emisiones de CO ₂ . (tCO ₂ /m ²)
Producción de materiales.	3540	0.36
Pérdida de materiales.	90.5	0
Maquinarias.	311.2	0.03
Total incorporada.	3941.7	0.39
Calefacción y refrigeración.	48665	3.24
Total operativa.	48665	3.24
Total ciclo de vida.	52606.70	3.63

Energía primaria (MJ/m²) en 100 años.

Calefacción y refrigeración 93%

Producción de materiales 6%

Maquinarias 1%

La VSC, en un periodo de 100 años, tiene un consumo de energía primaria de 52606.70 MJ/m² y 3.63 tCO₂/m² de emisiones de CO₂ asociadas. La energía operativa, representa del total el 92.51% y el 89.26% de las emisiones de CO₂ asociadas. La energía incorporada, impacta solo el 7.49% y el 10.74% de emisiones de CO₂ asociadas. Podemos resumir, que la energía operativa y emisiones asociadas representan el mayor impacto del ciclo de vida. En el caso de la energía incorporada, el proceso de producción de materiales representa el 89.81%.

5.3. Evaluación de impacto del ACV.

Al igual que la VSV, la energía operativa es mucho más alta que la energía incorporada. La energía operativa representa el 92.51% de la energía del ciclo de vida. Las diferencias son tan altas que incluso en caso de reducir la vida útil prevista, los resultados serían similares. Los resultados son coherentes con la bibliografía estudiada en el capítulo N°3 (apartado 3.1). Por otro lado, las horas de incomodidad son del 49.4%, valor que justifica la instalación de un sistema de climatización.

En cuanto a la energía incorporada, el mayor consumo de energía primaria, se produce en el proceso unitario de producción de materiales. La figura 5.7, muestra la descomposición de energía primaria consumida en los diferentes componentes constructivos de la VSC. La envolvente superior y vertical, representan el 40.64 % y 31.59% (72.23% en total) de la energía incorporada total respectivamente.

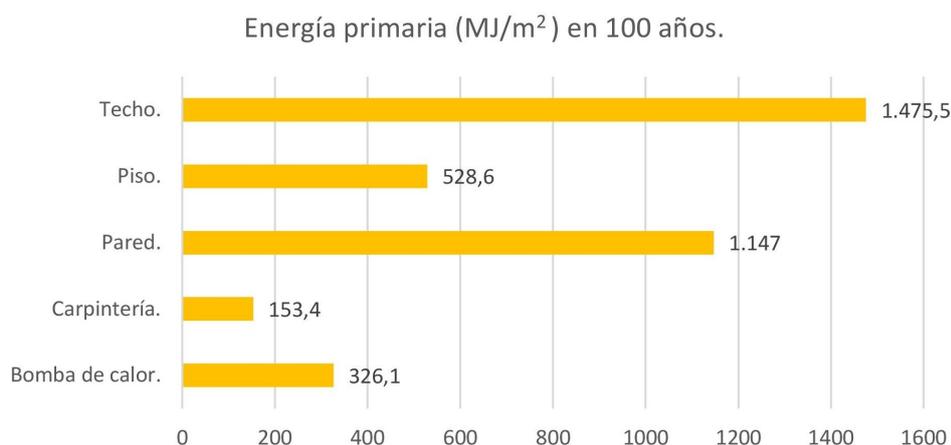


Figura 5.7: Energía incorporada de cada componente constructivo (MJ/m²) [Elaboración propia].

Capítulo N°5.

Centrándonos en los elementos constructivos, la figura 5.8, presenta la energía primaria de todos ellos. Los materiales cerámicos representan el mayor consumo de la energía incorporada (24%).



Figura 5.8: Energía incorporada de cada elemento constructivo (MJ/m²) [Elaboración propia].

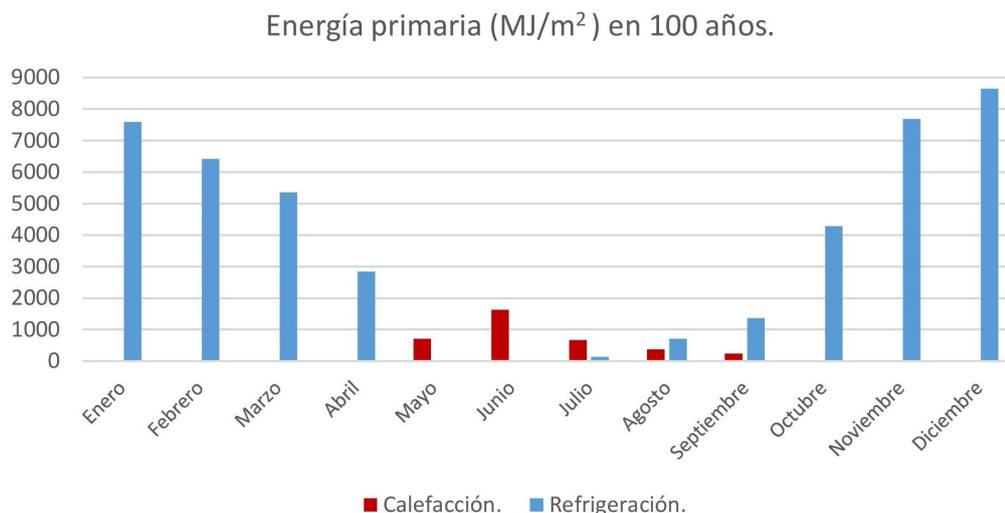


Figura 5.9: Energía operativa requerida para refrigerar y calefactar (MJ/m²) [Elaboración propia].

El análisis de la energía operativa durante el año nos brinda datos concluyentes. A tal efecto, la figura 5.9, muestra la energía primaria necesaria para refrigerar y calefaccionar cada mes del año. De mayo a septiembre la mayor parte de la energía es para calefacción y el resto de los meses se dedica casi exclusivamente a la refrigeración. Durante el año, se utiliza un total de 45052.85 MJ/m² y 3612,35 MJ/m², para enfriar y calentar la VSC. La demanda de refrigeración representa el principal impacto con el

Capítulo N°5.

92.58 % de la energía operativa total. La escasa inercia térmica de las envolventes, favorece la demanda térmica.

Con respecto a la refrigeración, el mayor consumo de energía primaria se produce en los meses de noviembre a febrero. En la calefacción, el mayor consumo está en el mes de junio.

A continuación, se han estudiado las condiciones de confort durante todo el año. La tabla 5.5, resume el porcentaje de horas ocupadas de cada zona, según las categorías de confort térmico, definidas en el capítulo N°3 (ver apartado 3.2.2.2).

Tabla 5.5. Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort.

ZONA.	COMEDOR (%).	DO1 (%).	DO2 (%).	PROMEDIO (%).
CATEGORÍA A.	12.1	21.6	15.1	16.3
CATEGORÍA B.	13.7	22.4	20.3	18.8
CATEGORÍA C.	14.1	13.8	18.6	15.5
DISCONFORT.	60.0	42.2	46.0	49.4

En la VSC, las horas de incomodidad son del 49%. Este valor justifica la instalación de un sistema de climatización para mejorar las condiciones de confort. Sin embargo, durante la etapa operativa, se comprobó que el uso de los sistemas de climatización está restringido por la situación de vulnerabilidad económica del grupo familiar, que condiciona la compra del equipo y el consumo eléctrico.

5.3.1. Comparación de los MTE.

En esta sección, se realizará la comparación de los MTE de las VSC y VSV, en el marco del método de ACV propuesto. Para la evaluación del impacto ambiental, se seleccionaron las siguientes variables: 1) Sistemas constructivos, 2) Consumo de energía incorporada de los procesos unitarios, componentes y elementos constructivos, 3) Consumo de energía operativa en refrigeración y 4) Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort y disconfort térmico.

La figura 5.10, muestra la comparación de los detalles de los sistemas constructivos de las VSC y VSV, donde se destaca la cantidad de materiales industrializados que determinan el valor final de la energía incorporada. Es interesante observar, que la relación de productos industriales utilizados en las envolventes verticales y horizontales, de las VSC y VSV, es de 10 a 5 respectivamente. Esto se debe (principalmente en el

Capítulo N°5.

caso de la VSC), a la dependencia comercial de un sistema constructivo preestablecido, donde cada material es fundamental para el éxito del funcionamiento en conjunto. Esta práctica constructiva, sustituyo de a poco los materiales tradicionales, haciendo desaparecer por completo a la vivienda vernácula en la actualidad. Actualmente, el costo por metro cuadrado de construcción de la VSC es elevado para Catamarca (USD 447 al 04/05/2023), algo contradictorio al tratarse de una vivienda social, destinada a sectores con economías precarias. Para mayor información ver descripción en el Anexo A y B.

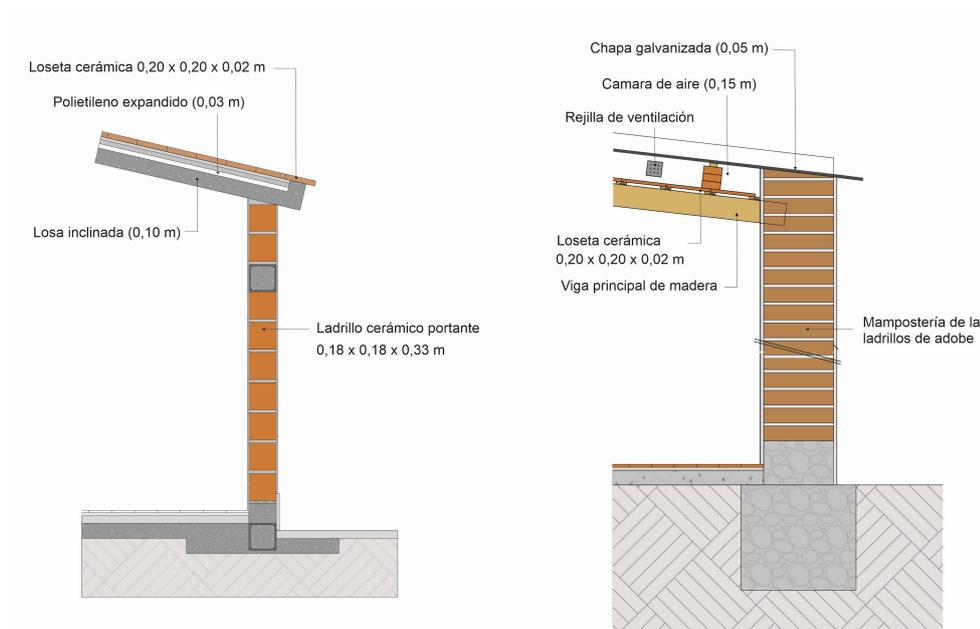


Figura 5.10: Comparación de sistemas constructivos: VSC (izquierda) y VSV (derecha) [Elaboración propia].

El primer y más evidente resultado, es que la energía operativa (y las emisiones), es mucho más alta que la energía incorporada, en ambas tipologías. La VSV es mejor cuando se compara la energía incorporada y operativa con la VSC. La energía incorporada de la vernácula es de 35.1% de la contemporánea (1383 MJ – 3941.7 MJ). La energía operativa de la vernácula es del 62.9% de la contemporánea (30622.6 MJ - 48665 MJ). Es indudable que el diseño de la vivienda vernácula es mejor por las estrategias pasivas utilizadas: mayor inercia térmica y doble cubierta ventilada. La figura 5.11, compara la energía incorporada y operativa en la VSV y VSC.

Capítulo N°5.

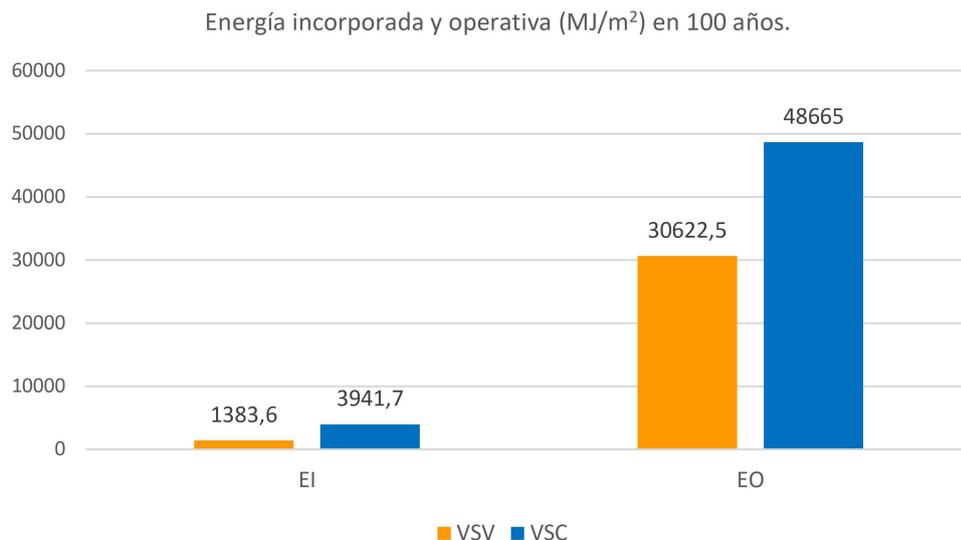


Figura 5.11: Evaluación de energía incorporada y operativa (MJ/m²) [Elaboración propia].

La figura 5.12, sintetiza la energía primaria de todos los procesos unitarios de las VSV y VSC en 100 años, con 32006.3 MJ/m² y 52606.7 MJ/m², respectivamente. En el caso de la VSV, la energía operativa representa el 95.7% del ciclo de vida. Este porcentaje es muy similar para la VSC con el 92.5%. Esto se debe al diseño deficiente de las envolventes para evitar el ingreso de ganancias térmicas externas (no deseadas) durante el año. En cuanto a la energía incorporada, la mayor contribución al consumo de energía primaria y las emisiones son los procesos de producción de los diferentes elementos constructivos (VSV:4.22% y VSC:6.73%) y el segundo, aproximadamente un 10% del primero, se debe al uso de maquinaria in situ (0.59%), obviamente en la VSC.

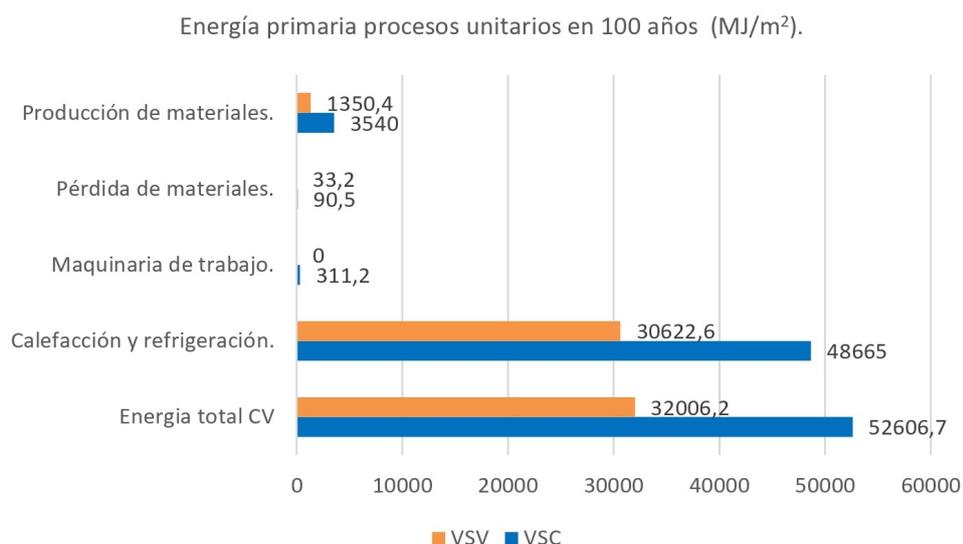


Figura 5.12: Evaluación de energía primaria de los procesos unitarios (MJ/m²) [Elaboración propia].

Capítulo N°5.

La figura 5.13, muestra la descomposición de energía incorporada consumida de los diferentes componentes constructivos, con un consumo total de 1383.6 y 3941.7 MJ/m², en las VSV y VSC, respectivamente. El techo representa en ambas tipologías el mayor impacto con el 67.15% y 40.64% de la energía incorporada total. En cuanto a la bomba de calor (7.80-8.98%), el consumo de energía es mayor en la casa contemporánea porque la energía operativa es mayor que la vivienda vernácula.

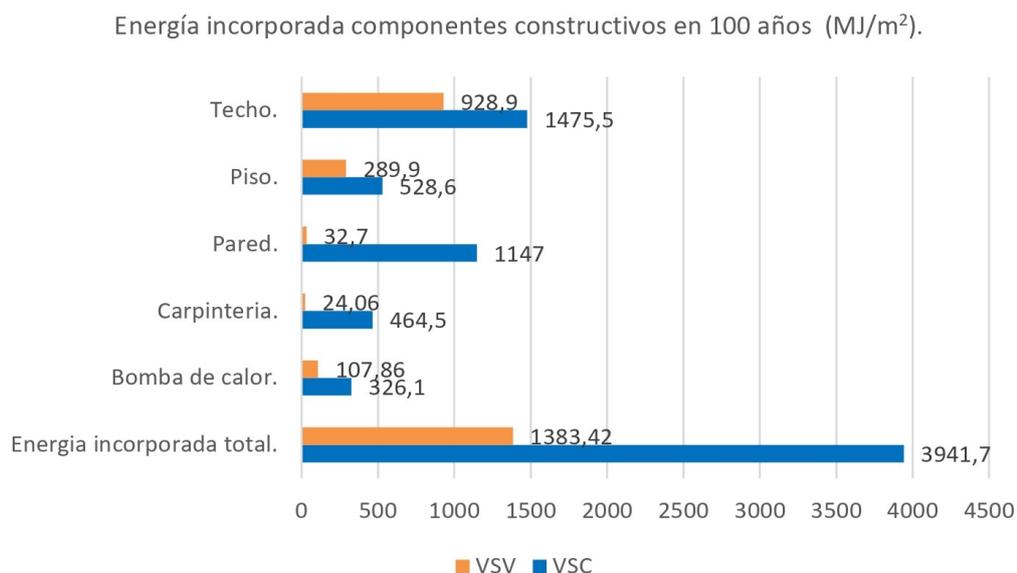


Figura 5.13: Evaluación de energía incorporada de los componentes constructivos (MJ/m²) [Elaboración propia].

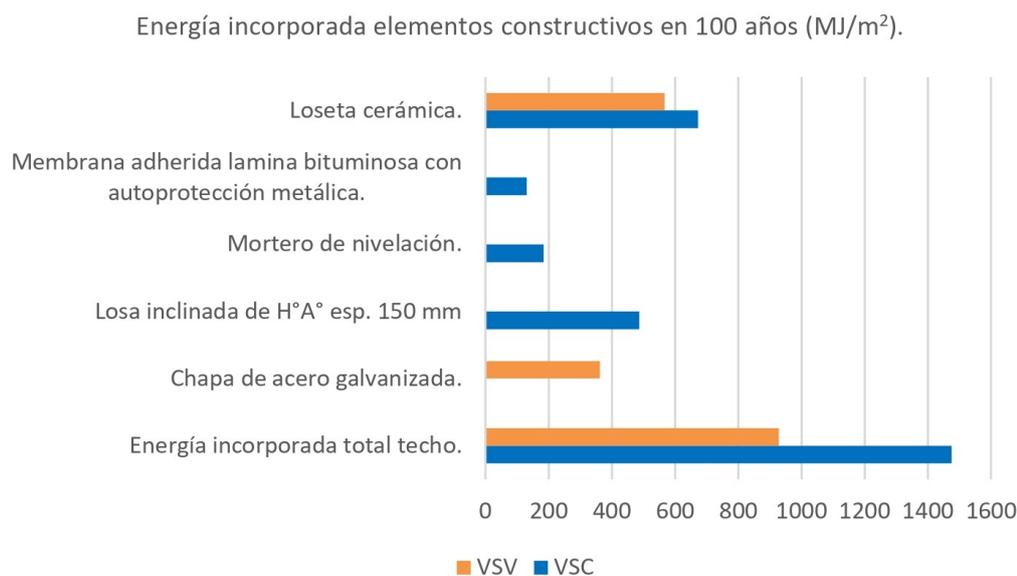


Figura 5.14: Evaluación de energía incorporada de los elementos constructivos del techo (MJ/m²) [Elaboración propia].

Capítulo N°5.

Centrándonos en el componente constructivos del techo, con un consumo total de 928.9 MJ/m² y 1475.5 MJ/m², en las VSV y VSC respectivamente, la figura 5.14, presenta la energía primaria de todos los elementos constructivos. Se puede destacar que los materiales cerámicos constituyen la mayor parte de la energía incorporada (61.03% – 45.65%).

La figura 5.15, muestra la evaluación de la energía operativa necesaria para la refrigeración (mayor impacto en la demanda térmica), con un consumo total anual en 100 años de 45052.85 MJ/m² y 24341.32 MJ/m² para las VSC y VSV, respectivamente. El primer resultado es que la energía para refrigerar la vernácula es de 54.03% de la contemporánea. El segundo aspecto a destacar es que la contemporánea tiene consumo en el 75% de los meses del año (sin consumo de mayo – julio). En el caso de la vernácula solo el 50% de los meses del año (sin consumo de mayo – septiembre). La casa vernácula es claramente mejor por la mayor masa térmica y el efecto del techo ventilado que extrae el calor de la vivienda por convección natural.

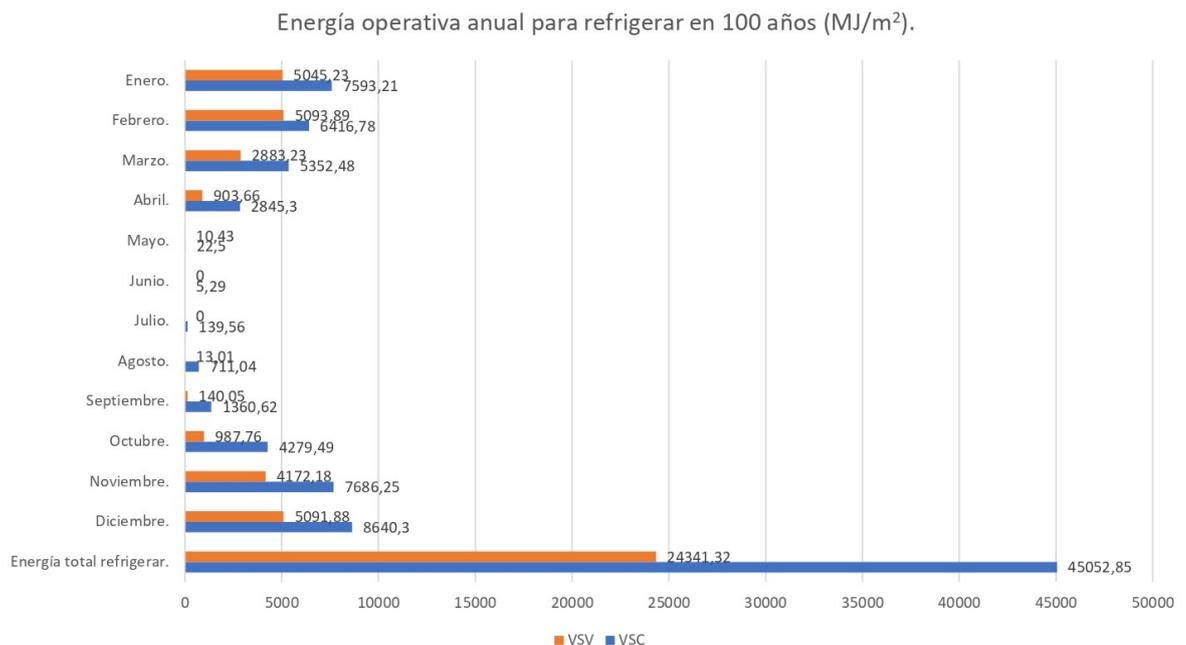


Figura 5.15: Evaluación de energía operativa para refrigerar (MJ/m²) [Elaboración propia].

Se han estudiado las condiciones de confort durante todo el año en ambas viviendas. La figura 5.16, resume el porcentaje de horas ocupadas de cada zona para las categorías A, B y C. Comparando ambos diseños se observa que las horas de incomodidad son muy similares en las 3 zonas: comedor (60-59.7%), dormitorio 1 (42.2-39.9) y dormitorio 2 (46-44.1). Esto se debe al deficiente comportamiento de las envolventes para

amortiguar las variables climáticas exteriores (principalmente en verano), durante el uso de estos espacios. Para alcanzar el nivel de confort, se requiere un sistema de climatización, donde su adquisición y uso está condicionado por la vulnerable situación socio-económica de los usuarios de las viviendas sociales.

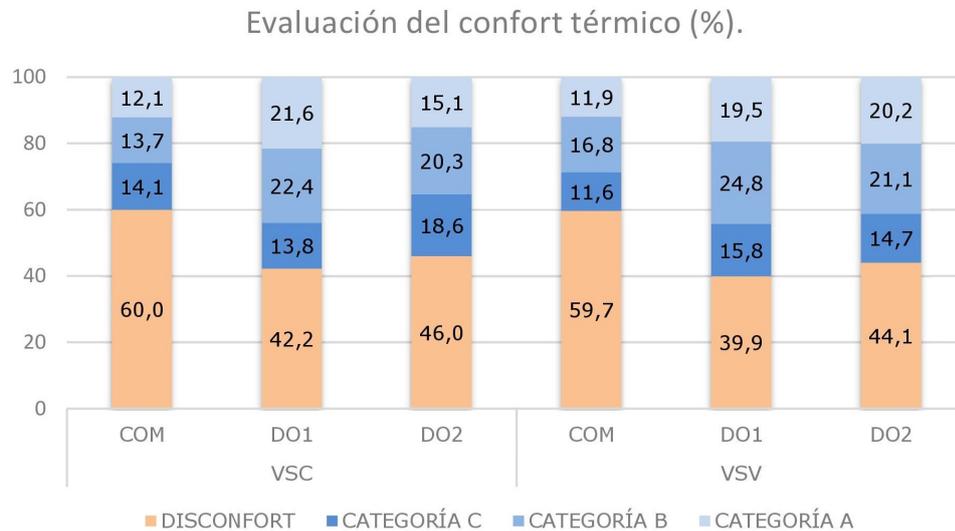


Figura 5.16: Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort [Elaboración propia].

Por último, es interesante comparar los resultados del presente trabajo con otros estudios. La tabla 5.6, muestra la comparación, utilizando como parámetro de evaluación del impacto ambiental el Potencial de Calentamiento Global (PCG) (kg CO₂/m²/año).

Entre los trabajos revisados, ninguno presenta un estudio experimental del edificio o una evaluación del confort térmico. Cabe destacar que cada estudio tiene sus propias características: tipo de clima, construcción, base de datos para el cálculo de la energía incorporada, programas de simulación para el cálculo de la energía operativa, años de ciclo de vida, etc. Por lo tanto, la comparación de los resultados debe hacerse con cautela. Como puede verse, las diferencias en el PCG son muy altas, desde los 2.2 kg CO₂/m²/año de la casa tradicional palestina, hasta 103 kg CO₂/m²/año de la típica vivienda adosada británica. Esto indica que el ACV para un caso de estudio en una región en particular es importante para obtener conclusiones satisfactorias.

Tabla 5.6. Comparación de la relación del PCG (kg CO₂/m²/año) en diferentes casos de estudios.

Autores.	Tipología.	Localización.	Área (m ²).	Años.	kgCO ₂ /m ² /año.
Molas et al.	Vivienda social vernácula.	Catamarca (Argentina).	47.44	100	21.4
	Vivienda social contemporánea.		32.24	100	36.3
Oyarzo [14]	Vivienda unifamiliar chilena.	Santiago.	62	100	38.0
		Puerto Montt.	23	100	45.0
		Punta-Arenas.	32	100	102.0
Pakdel et al [15]	Edificio piloto tradicional.	Yazd (Iran).	-	35	8.2
	Edificio piloto convencional.		-	35	22.4
Piroozfar et al [16]	Vivienda tradicional.	Gaza (Palestina).	-	100	2.2
	Vivienda contemporánea.		-	100	10.6
Cuellar Franca et al [17]	Vivienda adosada típica.	Reino Unido.	60	50	103.0
	Vivienda semi-adosada típica.		90	50	83.1
	Vivienda unifamiliar típica.		130	50	70.0
Monteiro et al [18]	Vivienda unifamiliar.	Coimbra (Portugal).	132	50	7.6
Morales et al [19]	Vivienda unifamiliar pública.	Porto Alegre (Brazil)	40.29	100	10.0
	Vivienda multifamiliar pública.		40.1	100	7.5
Verdaguer et al [20]	Vivienda convencional uruguaya.	Sauce (Montevideo).	57	60	4.3

5.4. Interpretación del ACV.

Luego de realizar el análisis de inventario y la evaluación de impacto ambiental; primero de la VSC y después de la comparación de los resultados con la VSV, podemos afirmar que el consumo de energía operativa, las emisiones de CO₂ asociadas y el discomfort térmico, durante el funcionamiento de ambos modelos, representa el mayor impacto ambiental del ciclo de vida. Para reducirlo, se pueden realizar las siguientes acciones:

- a Reducir la demanda energética con un mejor diseño de la vivienda: protección solar en verano, aprovechamiento de las ganancias solares en invierno, reducción de coeficientes de transferencia del calor, etc.
- b Utilizar sistemas HVAC más eficientes, en nuestro caso la bomba de calor.

- c Mejorar el mix eléctrico hacia una mayor aportación de las energías renovables.

La primera acción (a), mejora del diseño de la VSC, será objeto en el capítulo N°6.

5.5. Resumen y conclusiones.

Las exigencias de los recursos habitacionales en la provincia de Catamarca, obligan a prestar atención a la forma en que se está construyendo las viviendas. Se necesita una gran cantidad de viviendas sociales para dar respuesta al déficit habitacional. Este hecho ofrece la oportunidad de estudiar la mejor solución desde el punto del coste energético y en particular, al consumo de energía primaria no-renovable, las emisiones de CO₂ y confort térmico, asociados a la construcción y principalmente al uso de las viviendas.

En el capítulo N°5, se analiza la VSC en modo de evolución libre y se cuantifica el confort térmico. Se calcula la energía incorporada, operativa y emisiones de CO₂ y determina el mayor impacto ambiental potencial (la demanda térmica en el proceso unitario de climatización) y las recomendaciones necesarias para reducirlo. También se evalúa el confort térmico y se determina el porcentaje de horas ocupadas en zonas, para cada categoría de confort y el disconfort térmico. Por último, se compara y evalúa el desempeño térmico de ambas tipologías (contemporánea y vernácula). Las conclusiones son:

- 1 La energía operativa (92.5%) es muy superior a la energía incorporada (7.5%) y emisiones de CO₂ asociadas (89.3% - 10.7%). Incluso en el escenario donde la contribución de las energías renovables aumente en el mix eléctrico, no se podrá revertir este balance. Comparando las VSC y VSV, se observa que el impacto ambiental es menor en la VSV. La VSV utiliza el 35.1% de la energía incorporada de la VSC. En el caso de la energía operacional, la diferencia es del 62.9%. Esto se debe al uso de estrategias pasivas en el diseño de la VSV: pocos materiales industrializados, inercia térmica y doble cubierta ventilada.
- 2 En la energía operativa, la demanda de refrigeración representa el principal impacto con el 92.6 % con respecto a la calefacción. Las medidas de mejora para reducir la demanda de refrigeración tienen prioridad. Comparando las VSC y VSV, se observa que la energía para refrigerar en la VSV es el 54% de la VSC. La VSC tiene consumo el 75% y la VSV solo el 50%, de los meses del año. La VSV es claramente mejor por la mayor inercia térmica y la doble cubierta ventilada.

Capítulo N°5.

- 3 El componente constructivo con mayor consumo de energía incorporada, es el techo (40.6%) y el elemento constructivo, es el material cerámico (24%). Comparando las VSC y VSV, se observa que el componente constructivo, es el techo (67.2% y 40.7%) y el elemento constructivo, es el material cerámico (61% y 45.7%). En los sistemas constructivo, la VSC utiliza un 50% de materiales industriales por encima de la VSV.
- 4 Los niveles de confort de la VSC, no son adecuados en modo de evolución libre, con 49.4% de horas por zona en disconfort térmico. Comparando las VSC y VSV, se observa que las horas de incomodidad son muy similares en las 3 zonas (49.4 % – 47.90 %). Se requiere un sistema de climatización para alcanzar el confort térmico.
- 5 Si se mejora el diseño con estrategias pasivas y activas, se podría reducir la demanda energética.

Referencias del capítulo N°5.

- [1] Programa SketchUp, 2023. Disponible en: <<https://www.sketchup.com/>>, acceso diciembre 2023.
- [2] Programa EnergyPlus, 2023. Departamento de Energía de los Estado Unidos. Disponible en: <<https://energyplus.net/>>, acceso diciembre 2023.
- [3] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2004. "*Norma 11659-1. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración*".
- [4] Programa Meteonorm. Disponible en: <<https://meteonorm.com/en/>>, acceso diciembre 2023.
- [5] ASHRAE. Measurement of Energy, Demand and Water Savings. ASHRAE Guidelines 14-2014, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2014.
- [6] ISO 7730, 2005. "*Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort, International Standardization Organization, Geneva*".

Capítulo N°5.

- [7] M., Gallardo Salazar, 2015. "*Confort y bienestar térmico*". Ingho, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad de Málaga.
- [8] BEDEC BANCO DE CONSTRUCCIÓN 2022, Instituto de Tecnología de la Construcción (ITeC). Disponible en: <<https://metabase.itec.es/vide/es/bedec>>, acceso diciembre 2023.

TERCERA PARTE.

Propuesta de mejora.

Capítulo N°6.

Evaluación energética de propuesta de mejora de vivienda social contemporánea.

6.1. Introducción.

La tercera parte de la tesis, esta referida a la evaluación de energía primaria, emisiones de CO₂ y confort térmico de las propuestas de mejora de la vivienda social contemporánea (PMVSC), con el objetivo de incrementar lo menos posible la energía incorporada, reducir la energía operativa y mejorar el confort térmico, en el marco del método del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), propuesto. También se realizará la evaluación comparativa del impacto ambiental de la vivienda social contemporánea (VSC), con las PMVSC y la vivienda social vernácula (VSV), para valorar la eficiencia energética y el confort térmico.

En el capítulo N°5, se realizó la evaluación energética, de emisiones de CO₂ y confort térmico del ciclo de vida de la VSC y se determinó que el principal impacto ambiental lo asume la energía operativa con el 92.51% de la energía primaria y el 89.26%, de las emisiones totales de CO₂, del ciclo de vida. La demanda energética para refrigerar la vivienda, representa el 92.58% (45052 MJ/m²) del total de la energía operativa. Con respecto al análisis de confort térmico, los valores no son adecuados (49% de horas ocupadas de incomodidad) y justifican la instalación de un sistema de climatización. La escasa inercia térmica y aislación de la envolvente, favorecen las cargas térmicas en las zonas.

Con respecto a la comparación del balance de los modelos térmicos equivalentes de las VSC y VSV se observa que: 1) La VSV utiliza el 35.1% y 62.9% de la energía incorporada y operativa respectivamente de la VSC (esta ventaja de la vernácula se debe a la inercia térmica de las envolventes y el techo ventilado) y 2) Las horas de incomodidad son muy similares y se requiere un sistema de climatización para alcanzar el confort en ambas viviendas.

Capítulo N°6.

Debido a la importancia de la energía operativa en el análisis energético del ciclo de vida y al hecho de que la VSV es mejor en este aspecto que la VSC, es obligatorio explorar como se puede mejorar el diseño de la VSC. En este sentido, se proponen y evalúan diferentes soluciones tecnológicas para reducir la energía operativa: 1) Aislamiento de paredes y techos, 2) Protecciones de la radiación solar, 3) Aumento de la masa térmica de las paredes y 4) Ventilación mecánica nocturna.

Sin embargo, cabe señalar que la incorporación de nuevos materiales también aumenta la energía incorporada. El objetivo planteado en este trabajo, es reducir el consumo de energía para la refrigeración y calefacción, pero manteniendo controlada la energía incorporada. Los resultados de la evaluación del impacto ambiental y el confort térmico, obtenidos de la aplicación de las medidas, de manera combinada o individualmente, serán analizadas y comparadas con los resultados de la VSV.

Por último, con los indicadores ambientales, se evaluarán y establecerán las recomendaciones para 100 años, utilizando las siguientes variables: 1) Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort, 2) Evaluación energética de las PMVSC con respecto al caso base.

En el capítulo N°6, se aplicará el método de ACV propuesto para cuantificar y evaluar la energía primaria, las emisiones de CO₂ y el confort térmico del ciclo de vida de las PMVSC en modo de evolución libre y comparar los resultados con la VSC y VSV. A continuación, se describe el orden del presente capítulo:

- 6.2 Objetivo y alcance del ACV.
- 6.3 Análisis de inventario del ACV.
 - 6.3.1 Descripción arquitectónica de PMVSC.
 - 6.3.2 Modelización térmica equivalente.
 - 6.3.3 Análisis de confort térmico.
 - 6.3.4 Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.
- 6.4 Evaluación del impacto del ACV.
- 6.5 Interpretación del ACV.
- 6.6 Resumen y conclusiones.

6.2. Objetivo y alcance del ACV.

El objetivo de las propuestas de mejora, es la evaluación comparativa de la energética primaria, emisiones de CO₂ y el confort térmico del ciclo de vida de las PMVSC, VSC

(caso base) y VSV. La razón principal de la evaluación del impacto ambiental, es encontrar la mejor PMVSC para reducirlo. Los resultados servirán para direccionar las políticas habitacionales hacia la eficiencia energética.

El límite del sistema de las PMVSC, se enfocará al cálculo y evaluación de la energía incorporada, operativa, emisiones de CO₂ y confort térmico de todos los procesos unitarios. El criterio de corte, dejará fuera del modelo a los procesos unitarios pocos representativos. La extensión temporal del ciclo de vida, será de 100 años.

La función elegida es el confort térmico para estudiar y comparar los MTE de las PMVSC, VSC y VSV. La unidad funcional, es 1 m² de superficie climatizada mantenida con un rango de confort normativo. Los flujos de referencia son: 1) Entrada: cantidad de energía primaria consumida, durante el ciclo de vida (MJ/m²) y 2) Salida: cantidad de emisiones de CO₂, durante el ciclo de vida (tCO₂/m²). Con respecto al confort térmico, el flujo de referencia serán el porcentaje de horas ocupadas por zona, según categorías de confort y el discomfort.

6.3. Análisis de inventario del ACV.

El análisis de inventario tiene por objetivo determinar la energía primaria, emisiones de CO₂ y las condiciones de confort térmico alcanzadas en el ciclo de vida de las PMVSC. En este sentido, seguiremos el siguiente procedimiento: 1) Descripción arquitectónica de las PMVSC, 2) Modelización térmica equivalente, 3) Análisis de confort térmico y 4) Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.

6.3.1. Descripción arquitectónica de las PMVSC.

En el capítulo N°2, se realizó la descripción arquitectónica de la VSC, con la localización en el tejido urbano, el origen en un contexto sociocultural determinado y el análisis de los componentes funcional, morfológico y tecnológico.

En la bibliografía podemos encontrar la evaluación de diferentes propuestas de mejora para reducir la demanda energética en viviendas. El aislamiento de paredes o techos es una de las medidas de mejoramiento más habituales. Al respecto Rodríguez et al [1], evaluó los beneficios en la fase de uso del ACV de la remodelación del techo de una casa, cuando se agrega aislamiento adicional y brinda recomendaciones para niveles óptimos de aislamientos para climas mediterráneos. Por otro lado, Ahmed et al [2], analizaron el uso de sistemas de pisos compuestos ligeros prefabricados con una

reducción del consumo de energía, las emisiones de CO₂ y el costo. Otra medida común es aumentar la masa térmica de la envolvente del edificio, para filtrar las ganancias solares a través de las paredes y techos. Como tendencia general, Verbeke et al [3], concluyó que, para la generalidad de los edificios y climas, mayores cantidades de masa térmica en el lado interior del aislamiento térmico parecen ser beneficiosas, para mejorar el confort térmico y reducir la demanda de energía.

A continuación, se proponen algunas PMVSC, en función de su viabilidad constructiva. Estas mejoras, están diseñadas para reducir la demanda térmica e incrementar el confort térmico de los ocupantes. Las medidas de mejora son:

6.3.1.1. M1: aislamiento térmico en envolventes.



Figura 6.1: M1: aislamiento térmico. Ubicación en planta de las envolventes verticales y horizontal (izquierda) [Elaboración propia] y la construcción (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].

La mejora N°1, propone la adición de 5 y 10 cm de capa aislante de poliestireno en las paredes y techo, respectivamente. En el capítulo N°2 (ver sección 2.3.4), se demostró la viabilidad constructiva de esta solución tecnológica en el marco del proyecto de investigación de la VSC. La figura 6.1, se muestra la mejora N°1, con la ubicación del

aislamiento térmico en las envolventes y la viabilidad constructiva. Para mayor información ver descripción en el Anexo C.

6.3.1.2. M2: sombreado de fachada norte.

La mejora N°2, plantea la construcción de una pérgola para soportar una trepadora perenne denominada santa rita (*bougainvillea glabra*) en el lado norte de la VSC, para proteger la fachada de la radiación solar. Además, la pérgola permite a los usuarios utilizar el espacio exterior, una costumbre sociocultural que tiene orígenes en épocas prehispánicas. En el capítulo N°2 (ver sección 2.3.4), se demostró la viabilidad constructiva. La figura 6.2, se muestra la mejora N°2, con el sombreado fachada norte. Para mayor información ver descripción en el Anexo C.

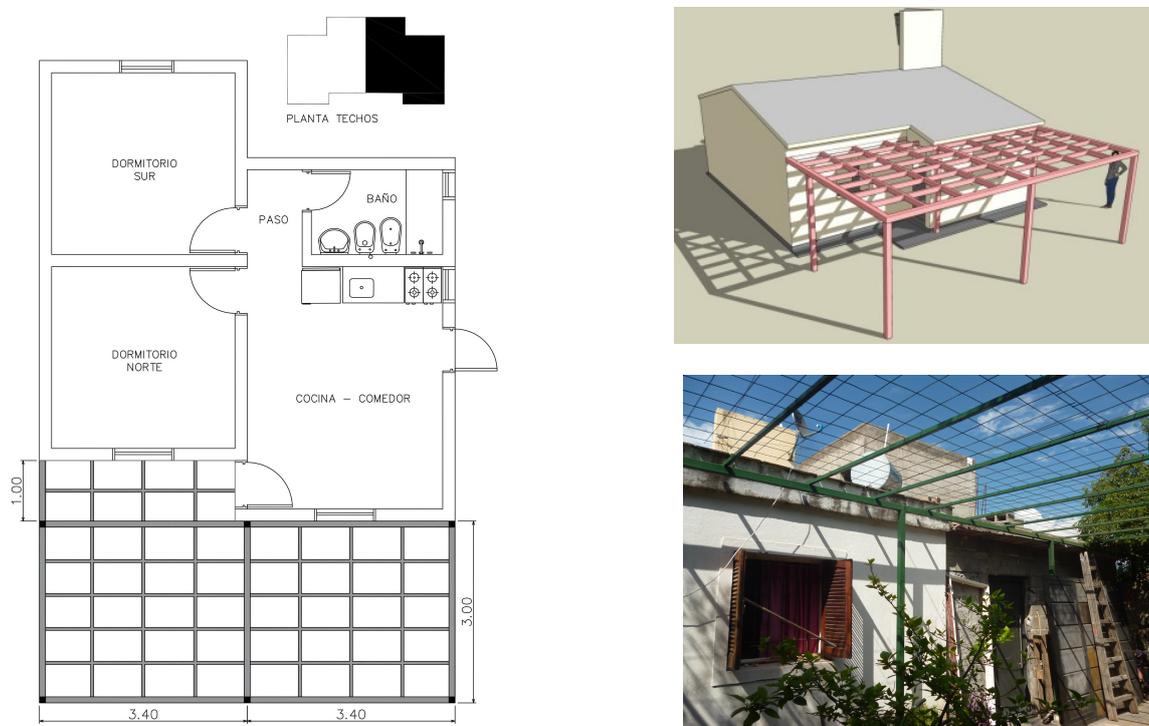


Figura 6.2: M2: sombreado de fachada norte. Ubicación en planta de la pérgola (izquierda) [Elaboración propia] y la construcción (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].

6.3.1.3. M3: incremento de masa térmica en envolventes.

La mejora N°3, propone el incremento de la masa térmica de muros con la adición de una capa de hormigón de 30 cm. En la figura 6.3, se muestra la mejora N°3, con el incremento de masa térmica en envolventes. Para mayor información ver descripción en el Anexo C.

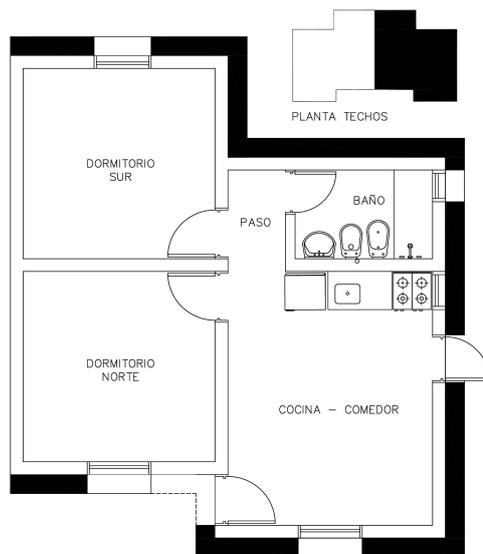


Figura 6.3: M3: incremento de masa térmica en envolventes. Ubicación en planta (izquierda) y su visualización tridimensional (derecha). [Elaboración propia].

6.3.1.4. M4: ventilación mecánica nocturna.

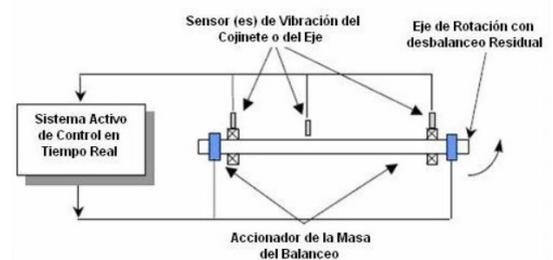
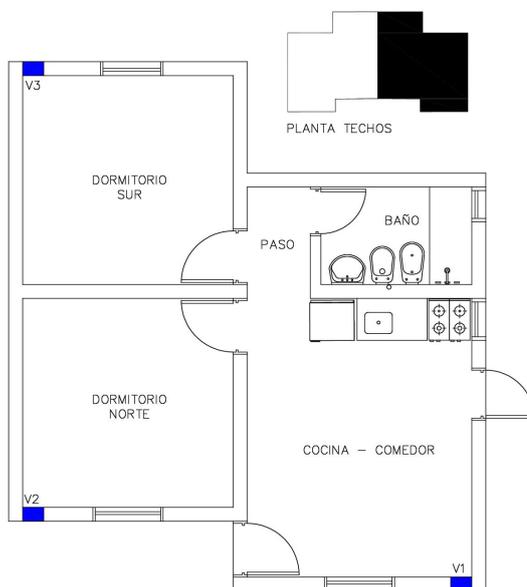


Figura 6.4: M4: ventilación mecánica nocturna y su ubicación en planta (azul), a la izquierda y sistema de balanceo [Winzenz], a la derecha. [Elaboración propia].

La mejora N°4, plantea la ventilación mecánica nocturna de 24:00 a 6:30 am, durante la temporada de enfriamiento (de enero a abril y de octubre a diciembre). Para la calidad del aire interior será necesario 5 renovaciones de aire por hora, en todos los espacios

ocupados. La potencia nominal del ventilador es de 40 W y funciona 242 días, 6.5 horas al día (1573 horas durante todo el año). Los ventiladores se colocaron en la parte superior de la envolvente vertical, con orientaciones sur y norte, de cada zona. El nivel de ruido es de 50 db (en la escala corresponde a una oficina tranquila en estado de reposo). En la figura 6.4, se muestra la mejora N°4, con la ventilación mecánica nocturna. Para mayor información ver descripción en el Anexo C.

6.3.2. Modelización térmica equivalente.

En esta sección, las PMVSC, se han graficado y modelado con los programas GoogleSketchup [4] y EnergyPlus [5], para determinar las cargas térmicas del MTE. Los datos de la geometría y las propiedades térmicas de los materiales que integran los cerramientos, son particulares para las PMVSC. La zonificación, las cargas internas, el perfil de uso y el fichero climático, son comunes con VSC.

Por último, se estudia las condiciones de confort térmico alcanzadas para los días diseño de verano e invierno, por medio del Voto Medio Estimado (PMV: Predicted Mean Vote) y el Porcentaje Estimado de Insatisfechos (PPD: Predicted Percentage Dissatisfied).

En esta sección, se describen los datos de la geometría y propiedades térmicas de los elementos constructivos de las envolventes de la PMVSC.

Tabla 6.1. Propiedades térmicas de los materiales de las PMVSC: M1 y M3.

Elementos constructivos.	Espesor.	Conductividad térmica.	Densidad.	Calor específico.
	(m)	(W/mK)	(Kg/m ³)	(J/kgK)
M1.				
Envolvente vertical.				
Poliestireno expandido.	0.05	0.029	30	1000
Techo.				
Poliestireno expandido.	0.10	0.029	30	1000
M3				
Envolvente vertical.				
Concreto pesado.	0.30	0.5	2300	920

En el capítulo N°5, se realizó el modelo geométrico de la VSC (caso base) con el detalle de las propiedades térmicas de los materiales que integran los cerramientos. En la tabla 6.1, se describen las propiedades térmicas de los materiales utilizados en las PMVSC: M1 y M3. Las propiedades térmicas de los materiales se consiguieron en la bibliografía.

En esta sección, el MTE de la VSC se ha modelado con las PMVSC, para el cálculo de las demandas de climatización. En la mejora M4, se ha modelado un tipo de ventilación denominado Balanced, de forma que el ventilador puede introducir aire exterior o extraer aire del interior, según la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. Esta diferencia es de 1° C, con un máximo exterior de 28° C, por ejemplo, si en el exterior hacen 28°C y en el interior 29°C, se activa la ventilación.

Concluida la simulación con el programa EnergyPlus, se han obtenido como resultados las demandas de frío y calor del MTE de las PMVSC, por horas y durante todo el año.

6.3.3. Análisis del confort térmico.

Con los resultados de la simulación térmica del MTE con las PMVSC, estudiamos las condiciones de confort térmico alcanzadas. En las figuras 6.5 y 6.6 se analizan y comparan para un día típico de verano e invierno, la evolución de la temperatura y el valor del PMV, para la sala de estar del caso base y con la PMVSC - M1+M4. Las líneas continuas representan las temperaturas (eje izquierdo): temperatura exterior (Text), temperatura de la sala de estar (T_Sal) del caso base VSC y temperatura de la sala de estar (T_Sal) con PMVSC M1+M4 y, mientras que las líneas discontinuas el PMV (eje derecho).

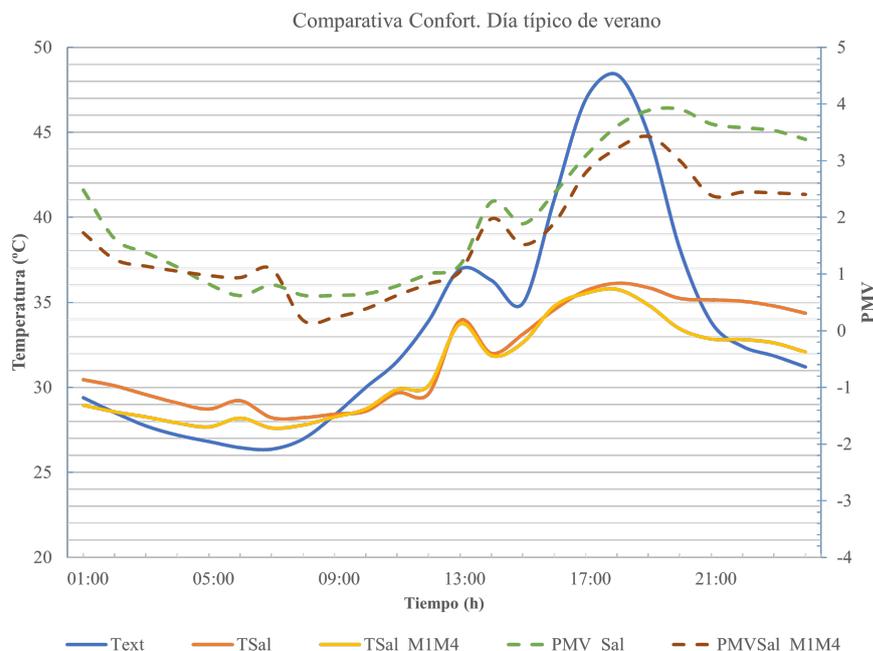


Figura 6.5: Comparativa de confort térmico para el día de diseño de verano [Elaboración propia].

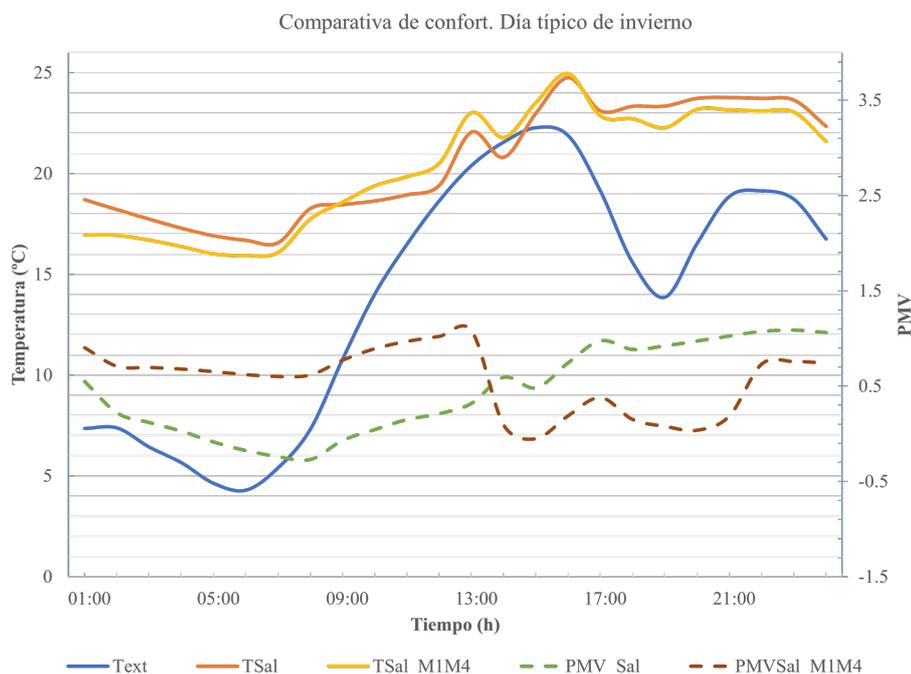


Figura 6.6: Comparativa de confort térmico para el día de diseño de invierno [Elaboración propia].

Durante el verano, no se aceptan las condiciones de confort en la sala de estar del caso base y la PMVSC M1+M4, porque el PMV es mayor a 0.7 (PMV entre -0.7 y 0.7) durante el periodo de ocupación (DN: 24-06 horas y SE: 06-24 horas). En invierno, se aceptan las condiciones de confort en la sala de estar del caso base y la PMVSC M1+M4, porque el PMV es menor a 0.7 (PMV entre -0.7 y 0.7) la mayor parte del periodo de ocupación. La PMVSC M1+M4, no mejora las condiciones de disconfort del caso base, caracterizado por la escasa inercia térmica en las envolventes.

6.3.4. Resultados de energía primaria y emisiones de CO₂.

Los supuestos considerados en cada proceso unitario para el cálculo de la energía primaria (MJ) y emisiones de CO₂ (tCO₂), fueron explicados en el capítulo N°5 (apartado 5.2.3).

Para determinar la medida de los flujos de referencia de la función confort térmico, con las entradas de energía primaria (MJ/m²) y las salidas de emisiones CO₂ (tCO₂/m²), se dividen los resultados de la energía primaria (MJ) y emisiones de CO₂ (tCO₂), de cada proceso unitario incluido en el MTE de la VSC, en la superficie total climatizada (32.24 m²). La tabla 5.4, resume la energía primaria (MJ/m²) y emisiones CO₂ (tCO₂/m²), asociada a cada proceso unitario, en 100 años.

En la tabla 6.2, la energía incorporada (MJ/m²), la operativa (MJ/m²) y las emisiones CO₂ (tCO₂/m²) asociadas a esta última de las PMVSC; se comparan con el caso base de la VSC (evaluada en el capítulo N°5), en 100 años de ciclo de vida.

Tabla 6.2. Evaluación de las PMVSC con respecto al caso base en 100 años.

Caso.	Energía incorporada.	Energía operativa.	Emisiones de CO ₂ .
	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(tCO ₂ /m ²)
Caso base.	3941.70	48665	3.24
M1.	4126.13	34529.86	2.30
M2.	4310.78	46570.54	3.10
M3.	4352.07	41803.13	2.78
M4	3981.09	45561.83	3.03
M1+M2.	4494.61	33123.97	2.21
M3+M4.	4390.86	38695.24	2.58
M1+M4.	4164.92	32197.92	2.14

El caso base tiene un consumo de 3941.70 MJ/m² de energía incorporada y de 48665 MJ/m² de energía operativa con 3.24 tCO₂/m² de emisiones de CO₂ asociadas a esta última, en 100 años de ciclo de vida. Con estos resultados podemos sacar las primeras conclusiones, tendiendo a reducir el impacto del consumo y emisiones del ciclo de vida del caso base: 1) Todas las medidas implican un aumento energía incorporada y una reducción de la energía operativa, 2) M1+M4: mayor reducción energía operativa (33.84%) y de emisiones de CO₂ (33.95%), 3) M4: menor incremento de energía incorporada (1%), 4) M2: menor reducción de energía operativa (4.30%) y de emisiones de CO₂ (4.32%) y 5) M1+M2: mayor incremento de energía incorporada (14.03%).

6.4. Evaluación de impacto del ACV.

La figura 6.7, muestra la evaluación energética de las PMVSC en 100 años, tomando como referencia el caso base. Evidentemente, todas las medidas implican una mayor energía incorporada. Lo mejor en este sentido, es la adición de un ventilador para refrescar durante la noche en la temporada de enfriamiento (M4: 1% de aumento de energía incorporada) y lo peor, es la combinación de aislación en las envolventes y la pérgola (M1 + M2: 14.03%). En cualquier caso, este aspecto no es relevante porque la energía de operación sigue siendo mucho mayor que la energía incorporada.

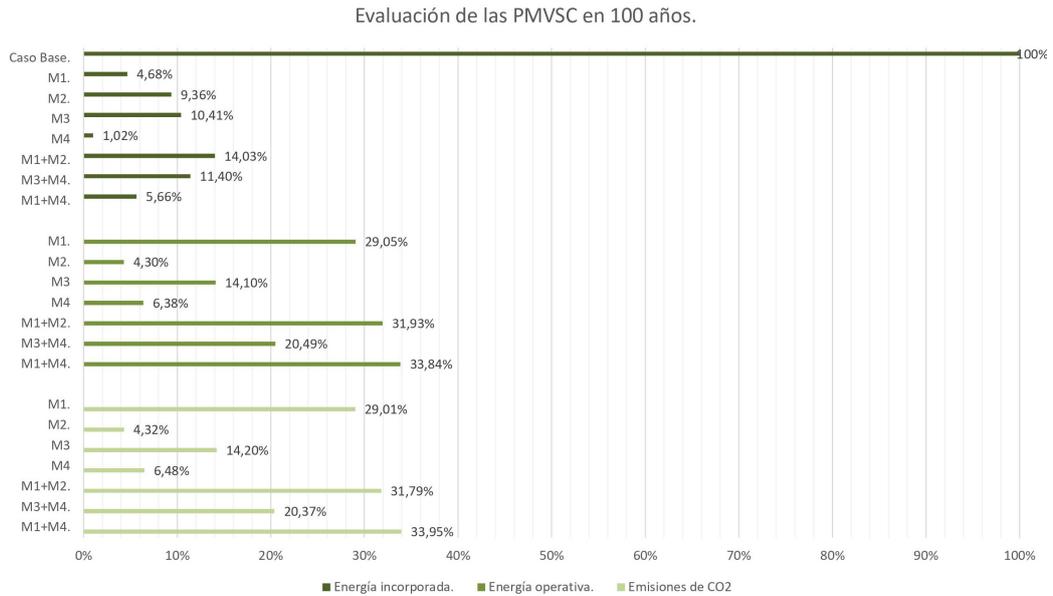


Figura 6.7: Evaluación energética de las PMVSC con respecto al caso base [Elaboración propia].

Todas las medidas producen una disminución relevante de la energía operativa utilizada para alcanzar el confort térmico. Incluso la pérgola en el norte de la VSC (M2), que es la peor, reduce un 4.30% la energía de operación. En este aspecto, la mejor medida, es la mejora del nivel de aislamiento en paredes y techo (M1), con una reducción del 29% de la energía de operación. La ventilación nocturna se ve penalizada por el consumo del ventilador que es de 2557 MJ/m², durante toda la vida de la vivienda.

Como era de esperar, una combinación de medidas, no equivale a la suma de los efectos individuales. Esto podría anticiparse y debe evitar que los diseñadores simplemente agreguen el efecto, aplicando el principio de superposición. La simulación térmica es obligatoria al analizar la combinación de medidas.

La energía del ciclo de vida (incorporada + operativa) y las emisiones de CO₂ de la VSC, siguen el mismo patrón que la energía operativa. Las mejores medidas (a excepción de la M4), tanto individuales como combinadas con otras, incluyen el aumento del nivel de aislamiento en paredes y techo. Las combinaciones con pérgola o con ventilación nocturna reducen aún más la energía operativa y las emisiones de CO₂. El impacto en la energía primaria y las emisiones de CO₂, se puede reducir en un 30% cuando se mejora el aislamiento.

Una vez mejorada la VSC, por ejemplo, con las medidas M1 + M4, las emisiones de CO₂ son equivalentes a las de la VSV (2.14 tCO₂/m²). Tanto la energía incorporada como operativa son diferentes y como la superficie también, al final coincide por casualidad las

Capítulo N°6.

tCO₂/m². Sin embargo, la energía del ciclo de vida, es de un 11.98% más alta, para la VSC. La figura 6.8, muestra la comparación de las energías incorporada, operativa y emisiones de CO₂, asociadas a esta última, de las VSV, M1+M4 y VSC (unidad de referencia).

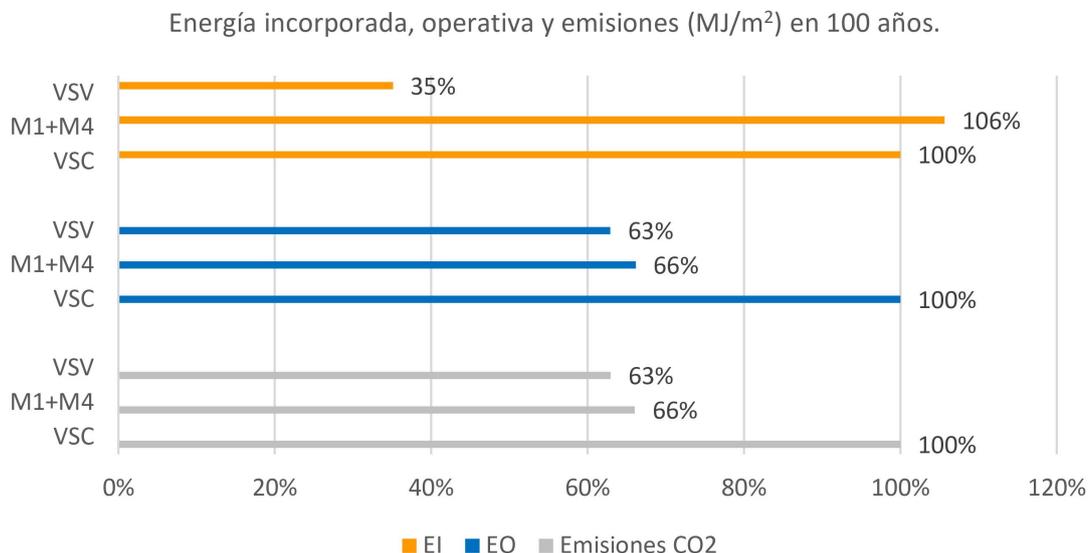


Figura 6.8: Evaluación de la energía incorporada, energía operativa y emisiones de CO₂, asociadas a EO, de las VSV, M1+M4 y VSC (unidad de referencia) [Elaboración propia].

A continuación, se han estudiado las condiciones de confort durante todo el año. La tabla 6.3, resume el porcentaje de horas ocupadas de cada zona, según las categorías de confort térmico, de acuerdo a la norma ISO 7730 [6].

Tabla 6.3. Porcentaje de horas ocupadas en cada categoría de confort.

PMVSC	VSV	VSC	M1	M2	M1+M2	M3	M4	M3+M4	M1+M4
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
CATEGORÍA A	17.2	16.3	19.3	17.2	21.2	22.2	17.9	18.5	21.6
CATEGORÍA B	20.9	18.8	25.7	21.0	25.0	22.8	20.4	23.3	25.8
CATEGORÍA C	14.1	15.5	16.2	17.3	17.6	14.3	15.8	17.5	16.4
CONFORT	52.1	50.6	61.2	55.5	63.7	59.3	54.2	59.4	63.8
DISCONFORT	47.9	49.4	38.8	44.5	36.3	40.7	45.8	40.7	36.2

Las VSV y VSC con el 47.9 % y 49.4 % de disconfort respectivamente, permiten la comparación con las PMVSC. La mejor medida propuesta con menos horas de incomodidad es la M1 + M4 (36.2%) y la peor es la M4 (45.8%).

La figura 6.9, muestra el porcentaje de horas ocupadas para cada categoría de confort, una vez implementadas las medidas de mejoramiento. Aunque se reduce el número de horas de incomodidad, los resultados indican que se requiere algún sistema de

climatización, para alcanzar el confort térmico. El mejor caso es M1+M4, pero, incluso en este caso el 36.2% de las horas ocupadas están en disconfort térmico.

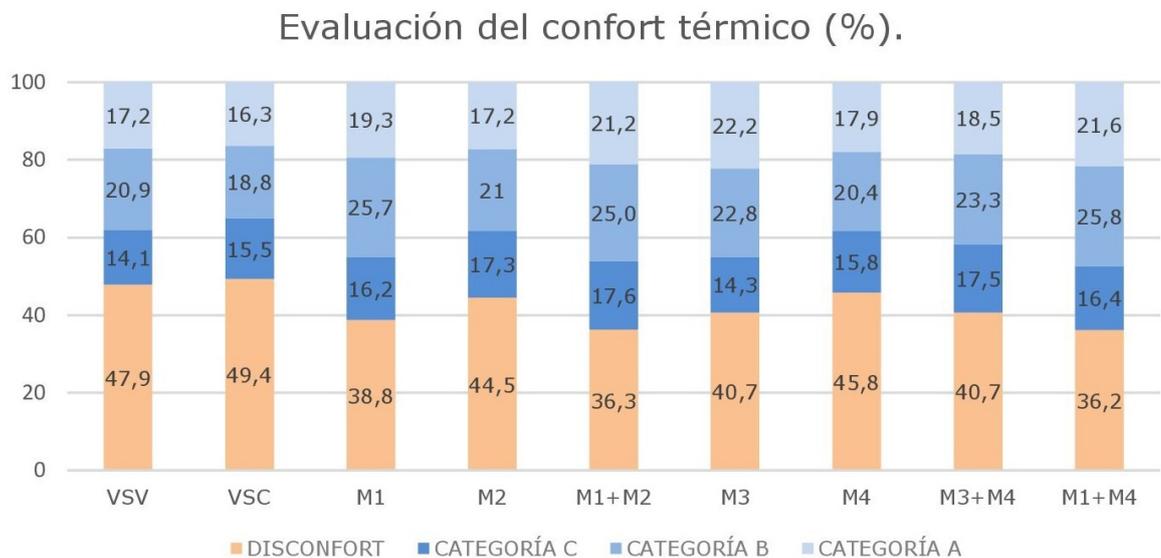


Figura 6.9: Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort [Elaboración propia].

6.5. Interpretación del ACV.

Habiendo realizado el análisis de inventario y la evaluación comparativa del impacto ambiental de las PMVSC respecto al caso base; el consumo de energía operativa y emisiones de CO₂ asociadas, se logró reducir en la PMVC M1+M4 un máximo de 33.84% (16467.08 MJ/m²). Para continuar reduciendo el consumo de energía operativa, es necesario intervenir directamente en la etapa del diseño de la VSC, antes de su construcción. Esto implica el modelado del proyecto mediante la simulación térmica y la discusión de los resultados, antes de su ejecución. Esta instancia también abre la posibilidad de incorporar los sistemas constructivos y materiales identificados en la VSV, para favorecer la eficiencia energética; y mejorar el mix eléctrico.

Para direccionar las políticas habitacionales en SFDVDC, resulta fundamental hacer un estudio comparativo en el tiempo del impacto ambiental y la eficiencia energética de la VSV, VSV y M1+M4. Según estadísticas, la construcción de VSC por parte del IPV está alejada del crecimiento demográfico generando un permanente déficit. Según las estadísticas, por año se edifican 317 unidades de VSC en SFDVDC, que consumen anualmente 166.761 MJ/m², con un impacto ambiental de 3.335.220 MJ/m² en 20 años. Si comparamos el impacto ambiental de la VSC con respecto a la VSV y M1+M4, observamos un importante ahorro energético de 39.15% y 30.88% respectivamente. La

tabla 6.4, muestra la comparación del ahorro de energía primaria de las VSC, VSV y M1+M4 en SFDVDC.

Tabla 6.4. Comparación del impacto ambiental y el ahorro de energía primaria de las VSC, VSV y M1+M4 en SFDVDC.

Tipologías viviendas social.	Energía primaria, por 100 años.	Energía primaria, por año.	SFDVDC: energía primaria por 317 viviendas, por año.	SFDVDC: ahorro energía por 317 viviendas, por año.
	(MJ/m ²).	(MJ/m ²).	(MJ/m ²).	(MJ/m ²).
VSC	52606.70	526.06	166761,02	0%
VSV	32006.3	320.06	101459,02	39.15%
M1+M4	36362.84	363.62	115267.54	30.88%

En el capítulo N°2 (apartado 2.2.1), se comentó que la provincia de Catamarca tiene seis zonas bioambientales, desde la muy cálida hasta la muy fría, debido al gradiente topográfico. En este sentido, para dimensionar el impacto de la VSC, se debería aplicar el método de ACV propuesto considerando el clima de cada zona.

Para reducir el consumo de energía primaria, las emisiones de CO₂ y el discomfort térmico de las VSC, en el corto, mediano y largo plazo, se sugieren las siguientes recomendaciones sobre posibles políticas y acciones:

- a. Concientizar a las autoridades gubernamentales sobre los beneficios de la implementación de la PMVSC: M1+M4, en los aspectos ambientales, económicos y sociales. Esto incluye la capacitación en eficiencia energética a los profesionales vinculados en el diseño y los usuarios de las VSC.
- b. Educar a los futuros profesionales, en las Universidades y Centros de Formación, sobre la importancia de incorporar en el diseño arquitectónico, el clima del lugar para reducir el impacto ambiental del consumo energético en el ciclo de vida, principalmente en la etapa operativa. Esto incluye el estudio de la arquitectura vernácula.
- c. Participar en la construcción de políticas que apunten a la eficiencia térmica de los edificios. Es importante generar un marco legal que regule (de manera obligatoria) el consumo de energía de los edificios en las tres etapas: fabricación, uso y demolición.

6.6. Resumen y conclusiones.

En el capítulo N°6, se analizan las PMVSC, en modo de evolución libre. Se calcula, compara y evalúa la energía incorporada, operativa, las emisiones de CO₂ (asociadas a la operativa) y el nivel del confort térmico de las mejoras de diseño, con respecto al caso base y la VSV, con el objetivo de determinar la mejor solución desde el punto de vista del coste del ciclo de vida. Las conclusiones son:

- 1 El caso base, tiene un consumo de energía incorporada de 3941.7 MJ/m² (7.49%) y de operativa 48665 MJ/m² (92.51%) con 3.24 tCO₂/m² (89.26%), de emisiones de CO₂ asociada a esta última.
- 2 La M4, tiene el menor incremento de la energía incorporada (1%), pero tiene un consumo del ventilador de 2557 MJ/m². Si se utiliza ventilación natural en lugar de mecánica, la energía operativa se reduce en un 8.1%. La peor es la M1+M2 (14%). Para evaluar la energía operativa, es obligatorio utilizar un programa de simulación, porque el principio de superposición no es aplicable cuando se combinan diferentes medidas.
- 3 La combinada M1+M4, tiene la reducción más alta de energía operativa (34%) y emisiones de CO₂ (33.8%). En este caso, las emisiones son equivalentes a la VSV (2.14 tCO₂/m²), lo que prueba que, con las PMVSC, podemos igualar el impacto ambiental de la VSC. La peor reducción de la operativa es la M2 (4.3%).
- 4 Tomando como referencia el disconfort de la VSV (47.9%) y VSC (49.4%), se observa que los niveles de confort alcanzados con las PMVSC, no son adecuados en modo de evolución libre y se requiere un sistema de climatización para alcanzar el confort térmico. La combinada M1+M4, es la mejor con una reducción del 36.2% y la peor es M4 con 45.8%.
- 5 Para direccionar las políticas habitacionales en SFDVDC, resulta fundamental hacer un estudio comparativo en el tiempo, del ahorro de energía primaria de la VSV y PMVSC: M1+M4, con respecto a la VSC. Se puede reducir el impacto ambiental de la VSC en 1 año, incorporando las soluciones tecnológicas de M1+M4 o promoviendo la construcción de la VSV, con ahorros del 30.88% y 39.15% respectivamente.
- 6 Para continuar reduciendo el consumo de energía operativa, es necesario intervenir directamente en la etapa del diseño de la VSC, antes de su construcción. Esta

instancia abre la posibilidad de incorporar los sistemas constructivos y materiales identificados en la VSV, para favorecer la eficiencia energética; y mejorar el mix eléctrico.

Referencias del capítulo N°6.

- [1] Rodríguez, C., Freire, F. "*Integrated life-cycle assessment and thermal dynamic simulation of alternative scenarios for the roof retrofit of a house*". Building and Environment 81 (2014) 204-215.
- [2] Mahmood Ahmed, I, Tsavdaridis, K. "*Life cycle assessment (LCA) and cost (LCC) studies of lightweight composite flooring systems*". Journal of Building Engineering 20 (2018) 624-633.
- [3] Verbeke, S., Audenaert, A. "*Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use.*" Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2300-2318.
- [4] Programa SketchUp. Disponible en: <<https://www.sketchup.com/>>, acceso diciembre 2023.
- [5] Programa EnergyPlus. Departamento de Energía de los Estado Unidos. Disponible en: <<https://energyplus.net/>>, acceso diciembre 2023.
- [6] ISO 7730, 2005. "*Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort, International Standardization Organization, Geneva*".

CUARTA PARTE.

Conclusiones.

Capítulo N°7.

Conclusiones y trabajo futuro.

7.1. Introducción.

La cuarta parte de la tesis, está dedicada a las conclusiones y el trabajo futuro. En los objetivos del capítulo N°1 (aparatado 1.5), se plantearon algunas preguntas que al final del trabajo podemos responder:

¿En comparación con la vivienda social contemporánea (VSC), la energía incorporada y operativa es menor en la vivienda social vernácula (VSV) por su mejor adaptación al clima?. La VSV utiliza el 35.1% de energía incorporada, el 62.9% de operativa y el 59% de emisiones de CO₂ de la VSC.

¿La disminución del impacto ambiental está asociada al confort térmico de los habitantes?. El disconfort de la VSC (49.4% de horas ocupadas), con las propuestas de mejoras en la VSC (PMVSC) se pudo reducir hasta 36.2% de horas ocupadas. La VSV tiene un disconfort de 47.9% de horas ocupadas.

Si bien, son medidas paliativas en una vivienda social ya construida, ahora se abre una nueva pregunta, que se deberá responder en otro trabajo: ¿Se podría realizar un nuevo diseño de VSC, que tenga el consumo de energía primaria y emisiones de la VSV y el porcentaje de horas ocupadas en disconfort de la PMVSC: M1+M4 (36.2%)?.

En el capítulo N°7, se describen los resultados alcanzados y las líneas de investigación trazadas, para seguir desarrollando futuros trabajos. A continuación, se describe el orden del presente capítulo:

- 7.2 Resumen y conclusiones.
- 7.3 Líneas de trabajo futuras.

7.2. Resumen y conclusiones.

Las motivaciones principales para realizar este trabajo fueron las siguientes:

- Las viviendas sociales, que actualmente construye el gobierno para dar respuesta al creciente déficit habitacional en la provincia de Catamarca, son diseñadas sin considerar el clima en su diseño, lo que genera un importante impacto ambiental, debido al elevado consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y discomfort térmico, durante el ciclo de vida.
- Evaluar y comparar el impacto ambiental del ciclo de vida de la VSV y la VSC, permitirá, por un lado, identificar las causas que lo originan y por otro, descubrir estrategias pasivas y activas que ayudan a la eficiencia energética y el confort térmico.
- Es necesario encontrar y evaluar PMVSC para la VSC, con el objetivo de reducir el impacto ambiental, sin modificar de manera sustancial su diseño.

Para reducir el impacto ambiental de las viviendas sociales, se han dado los siguientes pasos:

- Se ha aplicado el método de ACV de manera muy completa por las simulaciones, los datos experimentales y la evaluación del confort, en un contexto determinado de Argentina, condicionado por diversos factores.
- En el análisis de inventario del CV, por medio de la modelización térmica equivalente y la validación con datos experimentales, se determinó las condiciones de confort térmico, la energía primaria y emisiones de CO₂, con factores de conversión exclusivos del NOA. En esta etapa conocemos los datos relevantes del MTE: la energía operativa en el CV en la VSV y VSC es del 96% y 93% respectivamente. Las estrategias pasivas contribuyen a la eficiencia energética en la VSV.

Capítulo N°7.

- En la evaluación de impacto del CV, con la aplicación de indicadores ambientales, se definieron las variables que producen un mayor impacto por consumo de energía primaria, emisiones de CO₂ y discomfort térmico. Se demostró que la VSC no es lo más adecuado para el contexto socio cultural. La energía incorporada de la VSV es de 35% respecto a la VSC y la operativa es de 63%.
- En la interpretación del CV, se propuso medidas de mejora para reducir los principales impactos ambientales en la VSC. La mejor es la combinación de la aislación térmica en envolventes y la ventilación mecánica nocturna (M1+M4). También se demostró que la eficiencia energética es fundamental para direccionar políticas habitacionales.
- Resulta importante continuar con el estudio y aplicar los resultados a un proyecto de VSC nuevo, que integre lo mejor de la VSV y las innovaciones tecnológicas actuales, para conseguir la eficiencia energética y el confort térmico.
- El interés de los resultados en la región, permite tomar conciencia sobre el impacto en el cambio climático, un problema de escala mundial.

La conclusión general de esta tesis es:

- El método ACV propuesto, permite identificar de manera integral, los principales impactos ambientales del ciclo de vida de las viviendas sociales y evaluar las mejores soluciones tecnológicas para reducirlo.

Las conclusiones particulares de cada caso de estudio y las medidas de mejora son:

- Se evaluaron y compararon los impactos ambientales del ciclo de vida de las VSV y VSC. Esto permitió identificar (y establecer medidas de reducción), por un lado, de los procesos unitarios con mayor consumo de energía incorporada, operativa y emisiones de CO₂ y por otro, el discomfort térmico. Por último, se estudiaron los sistemas constructivos que favorecían a la eficiencia energética en la VSV: doble techo ventilado y la inercia térmica de los muros de adobe.

- En la propuesta de mejora, se determinaron las soluciones tecnológicas, orientadas a reducir los impactos ambientales de la VSC: el consumo de energía primaria y emisiones de CO₂ para refrigeración y; el desconfort térmico. Se propuso: capa aislante y masa térmica en envolventes, pérgola al norte y ventilación mecánica nocturna. También se combinaron estas mejoras. Los resultados fueron comparados con las VSC y VSV con las siguientes conclusiones: 1) Si se mejora el diseño de la VSC, el impacto ambiental puede ser equivalente a la VSV, 2) La mejor PMVSC es el aislamiento de las envolventes, 3) Es necesario un sistema de climatización para reducir las horas de incomodidad y 4) Se puede seguir reduciendo el consumo de energía operativa (principal impacto ambiental) con un diseño de VSC más eficiente.

7.3. Líneas de trabajo futuras.

Los caminos abiertos en este trabajo:

- Lo más importante sería continuar con este estudio y aplicar los resultados conseguidos a un proyecto de VSC totalmente nuevo, que integre lo mejor de la VSV y las innovaciones tecnológicas, para conseguir la eficiencia energética y el confort térmico. Existe mucha literatura al respecto (e.g.[1,2,3,4]). Resulta fundamental aplicar el método planteado de ACV y, comparar los resultados con los casos de estudios y propuesta de mejora.
- Por la fuerte dependencia de Catamarca a la importación de la electricidad, que además es producida de manera contaminante, resulta necesario que el proyecto integre en el diseño, la tecnología para la producción de energía solar fotovoltaica, eólica y térmica.
- El trabajo puso en evidencia la ausencia de una base de datos local para el cálculo de la energía incorporada y emisiones de CO₂. Para resolver este inconveniente se tuvo que adaptar una base de datos europea, ajena a la realidad local. Esto abre el camino en la construcción de una base de datos para la Argentina y en particular la provincia de Catamarca.
- Para simplificar los futuros trabajos, queda abierta la posibilidad de crear un programa informático con entorno gráfico, que se estructure con el método de ACV propuesto en este trabajo, para evaluar los impactos ambientales

principalmente en la etapa de diseño. Esto facilitaría el trabajo de los profesionales con poca experiencia en simulación térmica de edificios.

- Quedaron sin desarrollar en este trabajo el confort visual y acústico durante el ciclo de vida de la VSV, VSC y PMVSC. Esto abre un interesante camino para acoplar al ACV propuesto, un confort integral más amplio de características sociales.

7.4. Reflexiones finales:

Las Escuelas de Arquitectura en Argentina y el mundo, a partir de la segunda mitad del siglo XX y hasta el día de hoy, basaron sus enseñanzas en los principios del Movimiento Moderno, dejando de lado los conocimientos heredados con la arquitectura vernácula. En este marco, los arquitectos egresados de estas instituciones, construyeron las VSC con diseños divorciados del ambiente, dependientes de materiales industriales "globales" y fuertemente contaminantes en materia energética, principalmente durante su funcionamiento. En la figura 7.1, se observa el vertiginoso avance de la frontera urbana con la construcción masiva de VSC (diseñada por arquitectos), haciendo desaparecer literalmente el ecosistema natural en nombre del "progreso" de San Fernando del Valle de Catamarca (SFDVDC).



Figura 7.1: Imagen del avance de la urbanización con VSC, en el límite sur de SFDVDC [Diario El Ancasti – Catamarca].

Para revertir este problema es necesario intervenir en los programas de estudios con un cambio de paradigma y, comenzar a comprender de manera integral los impactos

ambientales que producen las VSC durante el ciclo de vida. Esto ayudara a direccionar las políticas habitacionales hacia la eficiencia energética al contar con profesionales formados con esta visión.

Por último, viene al caso citar a Rudofsky [5], cuando dice "parte de nuestros problemas, resulta de atribuir a los arquitectos (en general a todos los especialistas) una excepcional perspicacia en los problemas del vivir, cuando en verdad la mayoría de ellos se hallan esencialmente dedicados a sus negocios y al logro de prestigios. Al enfatizar los papeles desempeñados por los arquitectos y sus modelos, el historiador ha oscurecido los talentos y realizaciones de los constructores anónimos, hombres cuyos conceptos pueden rayar alguna vez en la utopía, pero cuyas estéticas se acercan a lo sublime".

Ojalá este trabajo ayude a los decisores de políticas a revertir este flagelo y encontrar la arquitectura sustentable que deseamos heredar.

Referencias del capítulo N°7.

- [1] Terrados, F., Moreno, D., "Patio and Botijo. Energy strategies architectural integration in Patio 2.12 prototype", *Energy and Buildings* 83 (2014), 70-88.
- [2] Gonzalo, G., Ledesma, S., Nota, V., Martínez, C., "Diseño bioclimático de viviendas de interés social en San Pedro de Colalao, Tucumán". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 12 (2008), 41-48.
- [3] T. Dollard, 2020 "Como proyectar viviendas energéticamente eficientes. Una guía ilustrada". Editorial GG. ISBN: 978-84-252-3107-0.
- [4] J. Pallasmaa, 2022. "Animales arquitectos". Editorial GG. ISBN: 978-84-252-3288-6.
- [5] B., Rudofsky, 1976. "Arquitectura sin arquitectos". Editorial Universitaria de Buenos Aires.

ANEXOS.

Anexo A.

Descripción gráfica de la VSC.

A.1 Introducción.

Este anexo es una extensión del capítulo N°2 y contiene una descripción gráfica de la vivienda social contemporánea (VSC) y las diferentes etapas de evolución del proyecto de investigación.

A.2. Componente funcional.

En las figuras A.1 y A.2, se muestra la planta y la sección de la VSC, con la organización funcional.

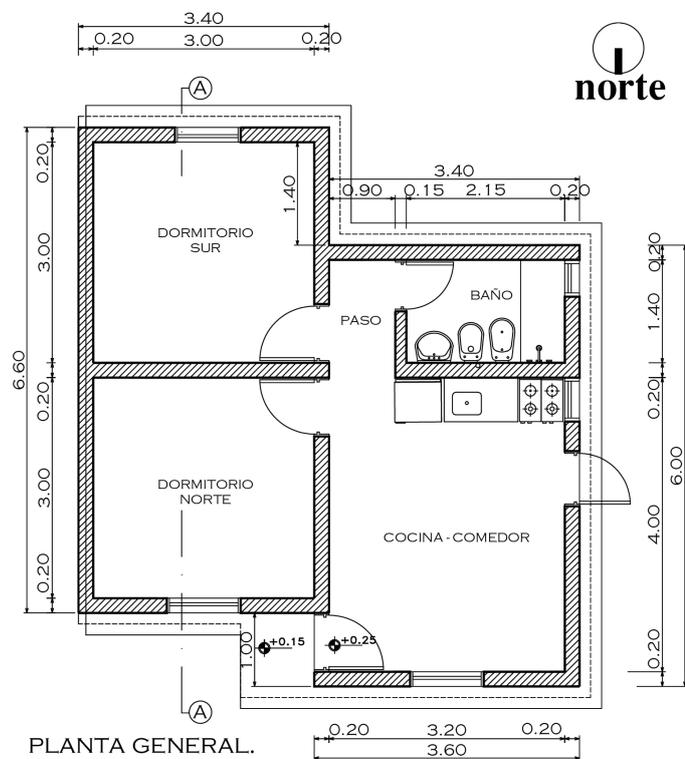


Figura A.1: Planta general de la VSC [Elaboración propia].

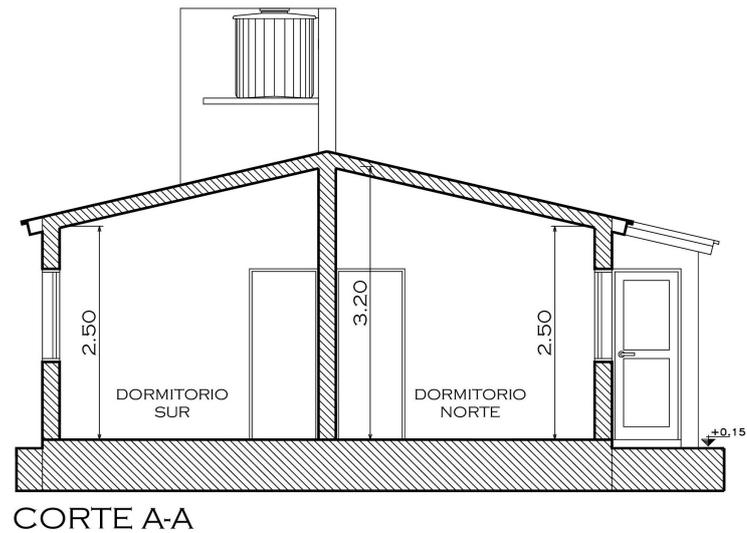


Figura A.2: Sección de la VSC [Elaboración propia].

A.3. Componente formal.

En la figura A.3, se muestra la morfología, con las imágenes frontal y posterior, de la VSC.



Figura A.3: Imagen frontal y posterior de la VSC [Fotos Lucio A. Molas].

A.4. Componente tecnológico.

En la figura A.4, se muestra el detalle constructivo de la fachada norte, con los sistemas constructivos que limitan el espacio interior.

Anexo A.

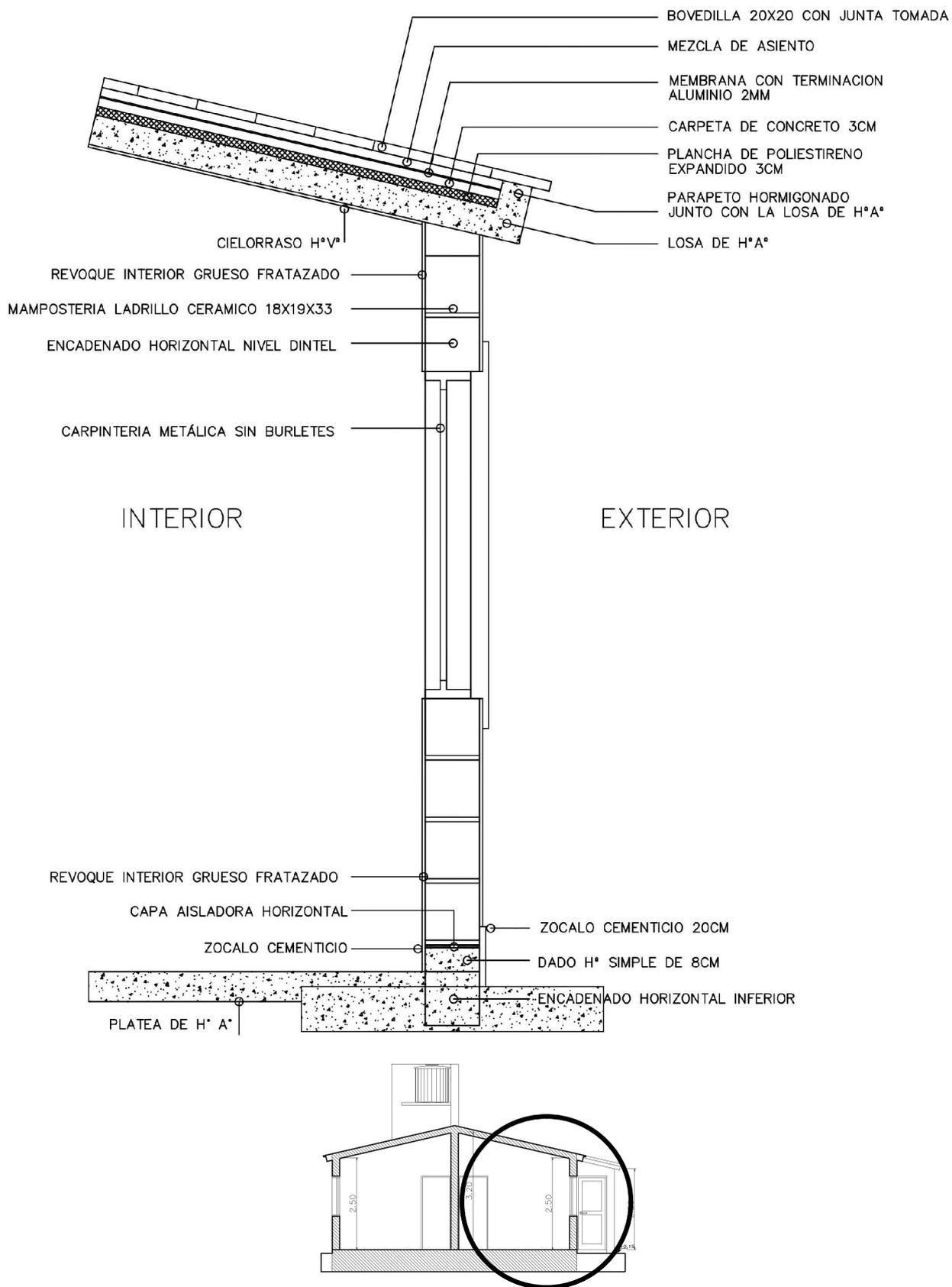


Figura A.4: Detalle de los sistemas constructivos de la VSC [Elaboración propia].

A.5. Descripción energética.

Las ganancias internas diarias debidas a ocupantes, equipos eléctricos y luces corresponden a la VSC tipo construida por el Instituto Provincial de la Vivienda (IPV). En las figuras A.5 y A.6, se muestran imágenes de los principales electrodomésticos utilizados y la cocina con gas butano.



Figura A.5: Principales electrodomesticos. De izquierda a derecha: bomba de calor, televisor y heladera [Fotos Lucio A. Molas].

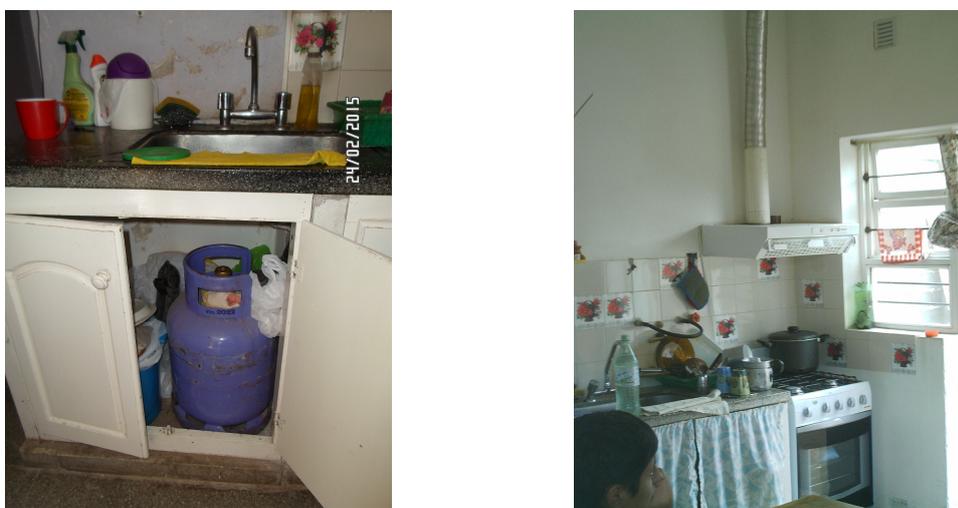


Figura A.6: Gas butano envasado en cilindros de 10kg (izquierda) y cocina para preparación de alimentos (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].

A.6. Relevamiento de datos experimentales y patrón de uso.

El monitoreo térmico de la VSC, se realizó desde el 01 de mayo de 2008 hasta el 01 de mayo de 2009, con sensores tipo HOBO. En total se ubicaron 6 sensores en todas las dependencias de la vivienda, protegidos con dispositivos aislantes. Durante cada mes se bajaron los datos de los sensores por intermedio de una computadora portátil. En las pag. 202

Anexo A.

figuras A.7, A.8 y A.9, se muestran las imágenes de los dispositivos aislantes, el sensor instalado y la descarga de datos con la computadora portátil.

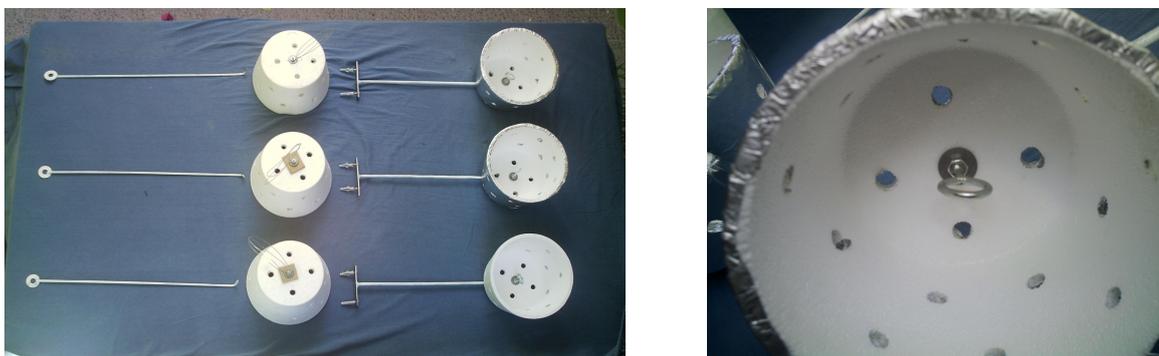


Figura A.7: Dispositivos diseñados para alojar a los sensores exteriores e interiores. Izquierda: soportes y protectores térmicos. Derecha: anillo para colgar el sensor. [Fotos Lucio A. Molas].



Figura A.8: Dispositivo y sensor funcionando en porch norte y cocina- comedor [Fotos Lucio A. Molas].

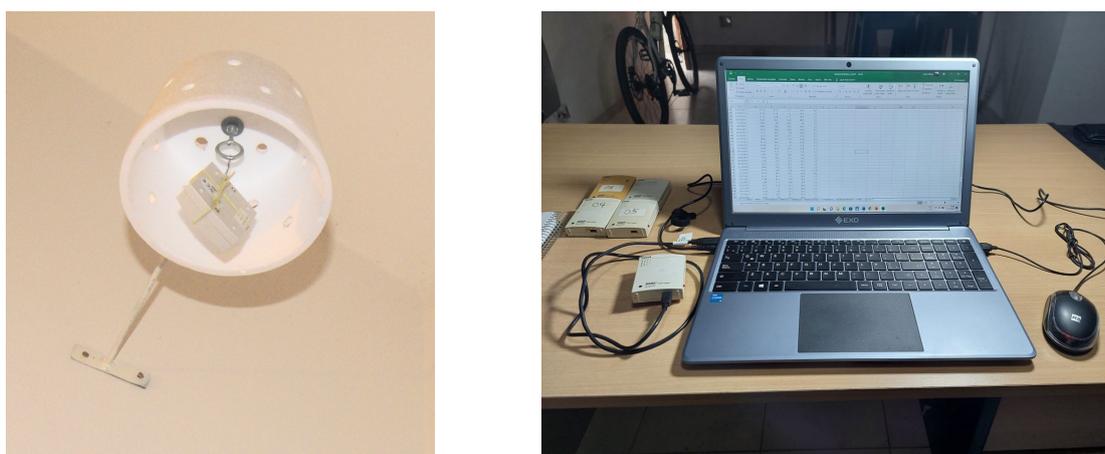


Figura A.9: Descarga de datos de sensores. Izquierda: sensor interior tipo HOBO en funcionamiento. Derecha: bajada de datos a computadora portátil [Fotos Lucio A. Molas].

A.7. Modelización térmica: modelo inicial.

Periodo del 19 al 24 de enero de 2009.

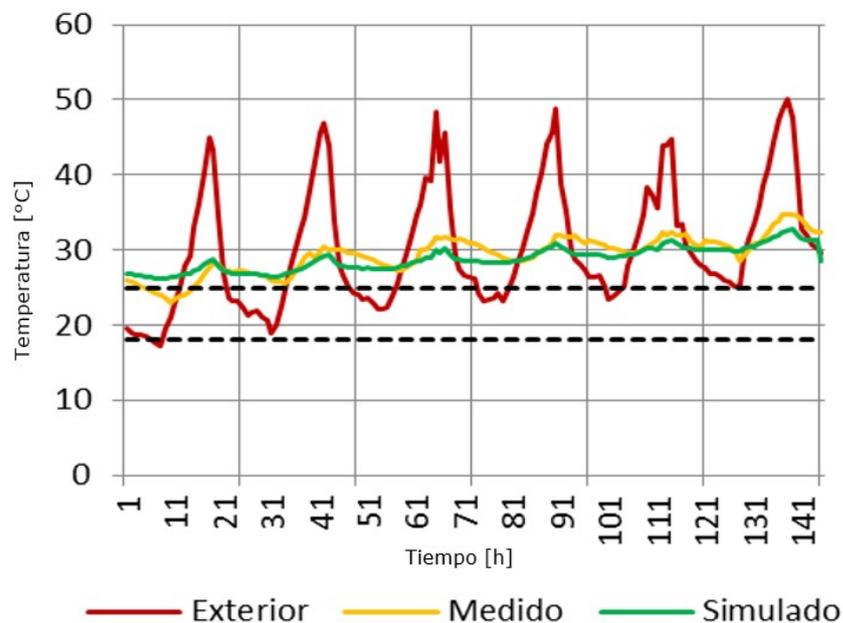


Figura A.10: Comportamiento térmico del dormitorio sur, del 19 al 24 de enero de 2009 [Elaboración propia].

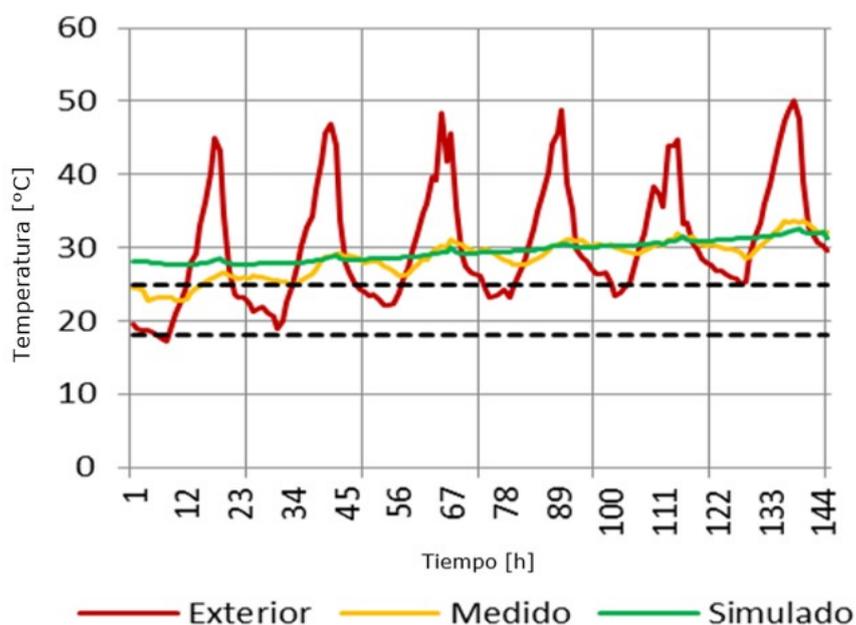


Figura A.11: Comportamiento térmico del baño, del 19 al 24 de enero de 2009 [Elaboración propia].

Las figuras A.10 y A.11, representan el comportamiento térmico del dormitorio sur y el baño de la VSC, durante el período de verano del 19 al 24 de enero de 2009. Casi la

totalidad de las mediciones registradas de temperatura media diaria del aire en las zonas, están claramente fuera del parámetro de confort para verano (25°C), debido a las ganancias de calor externas e internas, que se convirtieron en cargas térmicas. Las cargas térmicas internas se originaron por: 1) La escasa inercia térmica de las envolventes debida a las propiedades térmicas de los materiales que la integran, 2) El aire caliente que ingresó por la manipulación y rendijas de aberturas y 3) El calor interno producido por los usuarios, iluminación y electrodomésticos.

Periodo del 15 al 20 de junio de 2008.

Las figuras A.12 y A.13, representan el comportamiento térmico del dormitorio sur y el baño de la VSC, durante el período de invierno del 15 al 20 de junio de 2008. Casi la totalidad de las mediciones registradas de temperatura media diaria del aire en las zonas, están claramente fuera del parámetro de confort para invierno (18°C), debido a las pérdidas de calor por las envolventes. Las perdidas calor se produjeron por: 1) La escasa inercia térmica de las envolventes debida a las propiedades térmicas de los materiales que la integran, 2) Ingreso de aire frío por la manipulación y rendijas de aberturas y 3) Las ganancias internas resultan insuficientes para alcanzar el rango de confort.

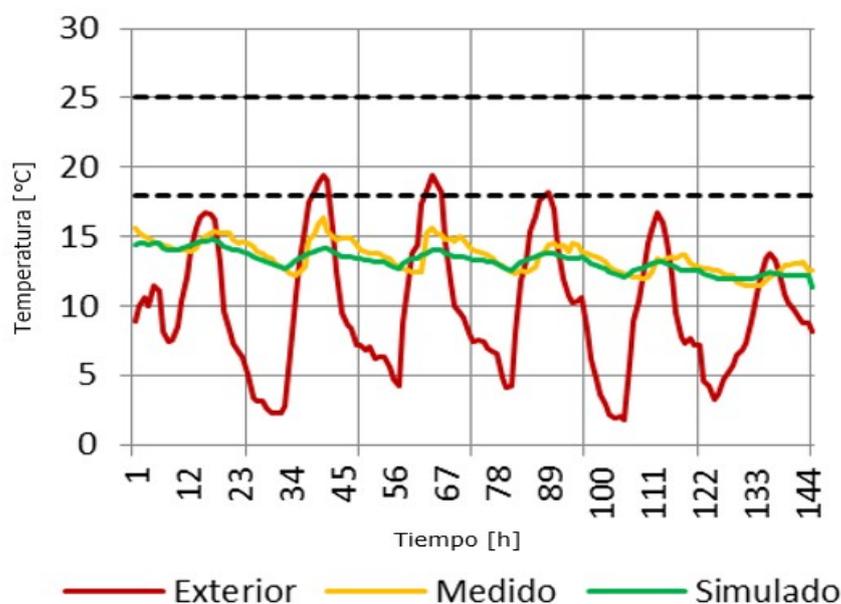


Figura A.12: Comportamiento térmico del dormitorio sur, del 15 al 20 de junio de 2008 [Elaboración propia].

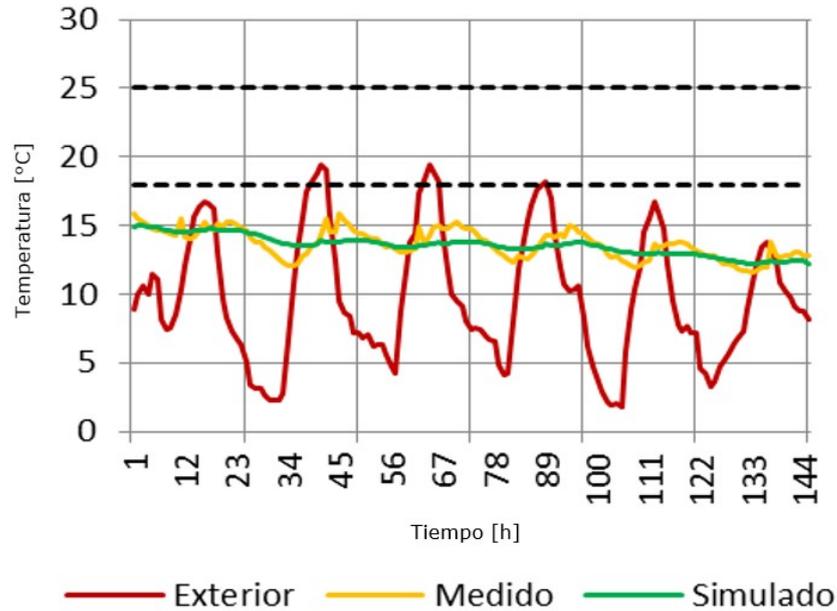


Figura A.13: Comportamiento térmico del baño, del 15 al 20 de junio de 2008 [Elaboración propia].

A.8. Construcción de medidas de mejora.

Las mejoras propuestas para reducir las demandas de refrigeración en la VSC, necesarias para llegar a los rangos de confort preestablecidos son: 1) Pintura en techo de color blanca, 2) Aislación de 0.10 m de poliestireno en techo y 3) Aislación de 0.05 m de poliestireno en paredes. En la figura A.14, se describe el detalle constructivo con las mejoras tecnológicas en las envolventes vertical y superior.

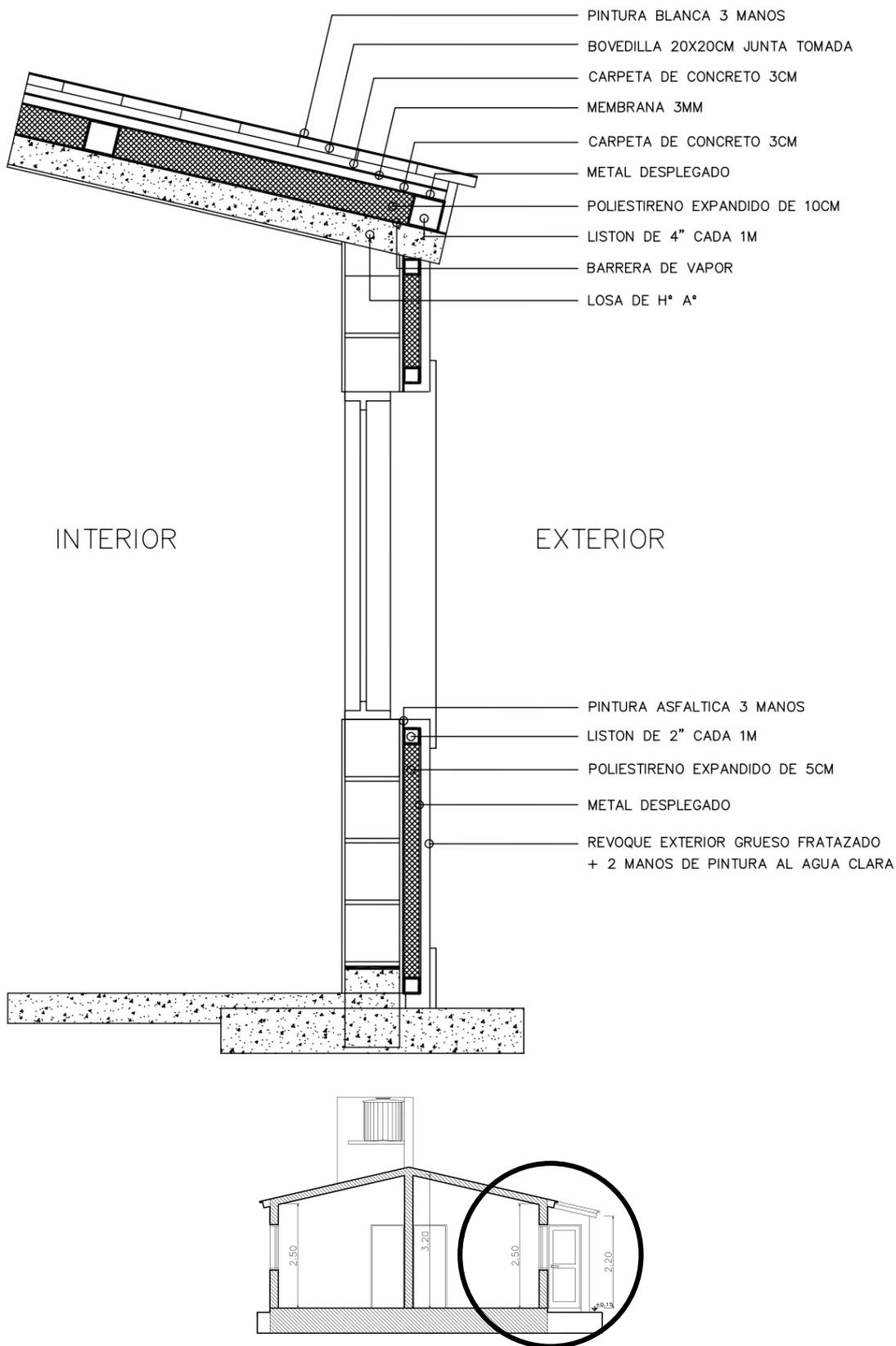


Figura A.14: Detalle constructivo con mejoras tecnológicas [Elaboración propia].

Mejoramiento envolvente superior y verticales externas.

Las mejoras tecnológicas en el techo fueron principalmente: 1) Colocación de planchas de poliestireno de 0.10 m de espesor y 2) Aplicación de 3 manos de pintura reflectiva color blanco. Las mejoras tecnológicas en las envolventes verticales se basaron principalmente en la colocación de planchas de poliestireno de 0.05 m de espesor. En la figura A.15, se muestra la construcción de las mejoras tecnológicas en el techo y la mampostería externa.



Figura A.15: Construcción de las mejoras tecnológicas en el techo y mamposterías [Fotos Lucio A. Molas].

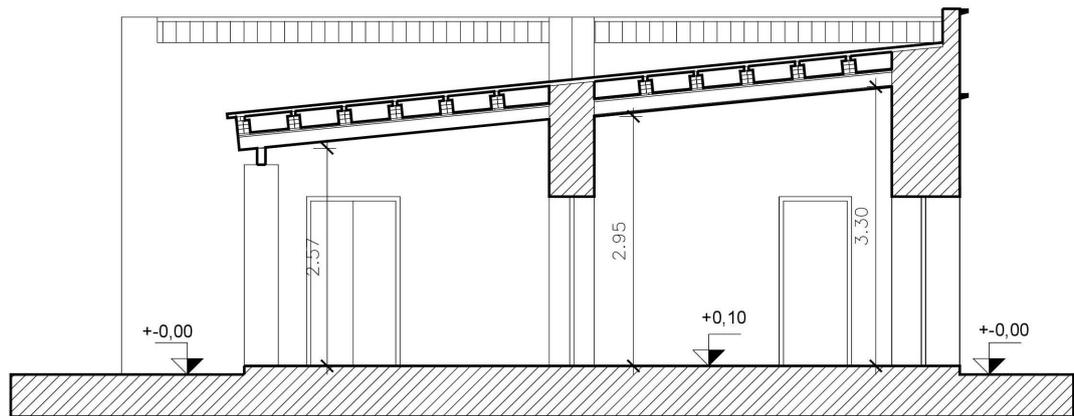


Figura B.2: Corte A-A de la VSV [Elaboración propia].

B.3. Componente formal.

En la figura B.3, se muestra la morfología, con las orientaciones norte y oeste, de la VSV.



Figura B.3: Imagen exterior del comedor (izquierda) y galería (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].

B.4. Componente tecnológico.

En las figuras B.4 y B.5, se muestra el detalle constructivo de la fachada urbana italianizante con los sistemas constructivos que limitan el espacio interior.

Anexo B.

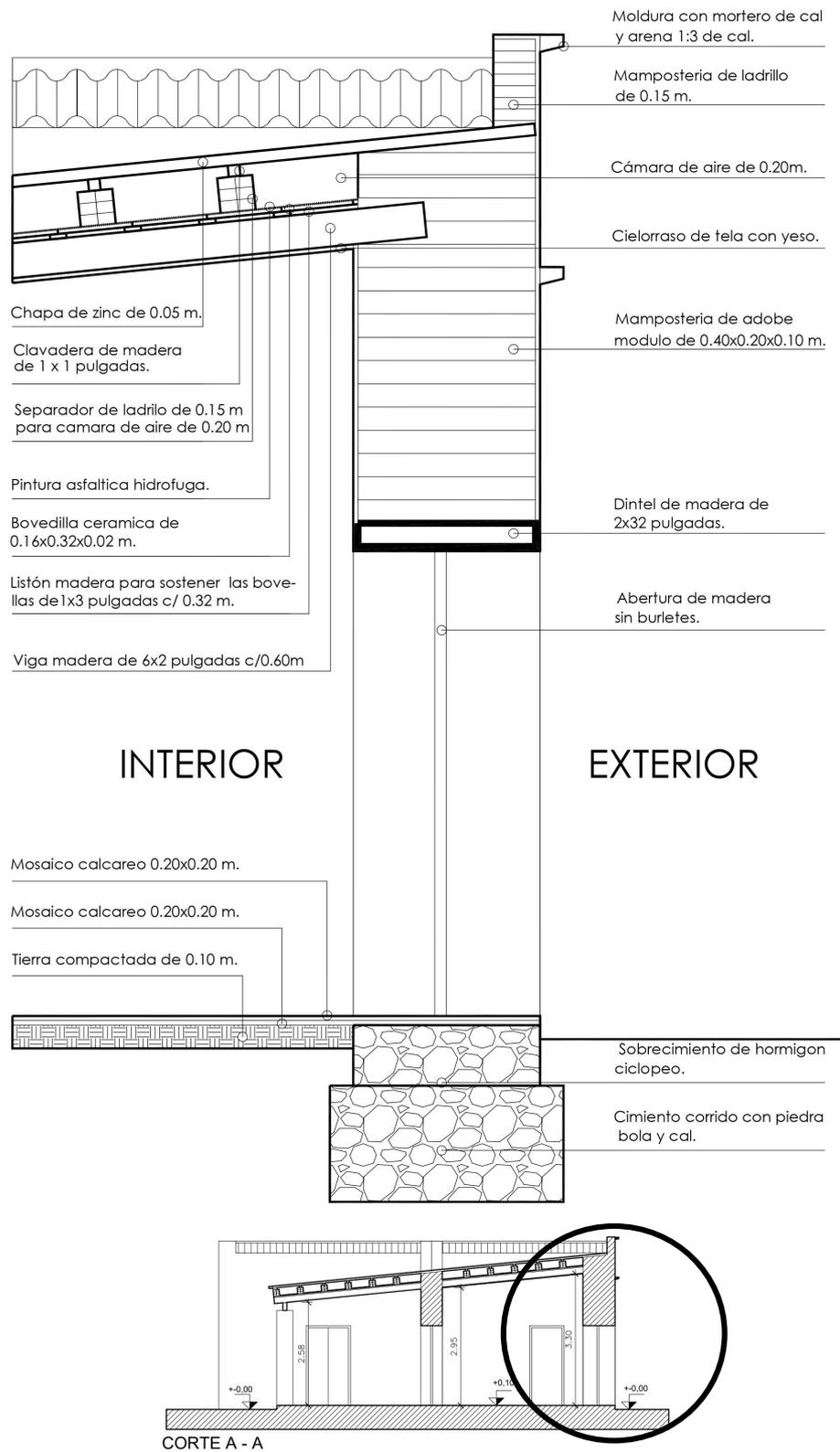


Figura B.4: Detalle constructivo de la fachada urbana italianizante [Elaboración propia].



Figura B.5: Imagen de una vivienda vernácula italianizante, parcialmente demolida, donde se observan los tres sistemas constructivos [Elaboración propia].

La figura B.6, muestra el blindaje y la rejilla de ventilación del sistema de doble cubierta ventilada de la VSV.



Figura B.6: Blindaje y rejilla de ventilación del sistema constructivo de doble cubierta ventilada [Elaboración propia].

Anexo B.

La figura B.7, muestra una vista de la parte inferior de la doble cubierta ventilada conformado por vigas, listón y bovedilla cerámica. Faltaría el cielorraso, que generalmente era una lona embebida en yeso y fijada a las vigas con clavos.



Figura B.7: Vista de la parte inferior del dormitorio norte de la VSV [Elaboración propia].

Anexo C

Descripción gráfica de las PMVSC.

C.1 Introducción.

Este anexo es una extensión del apartado 6.3.1 del capítulo N°6 y contiene una descripción gráfica de las propuestas de mejora de la vivienda social contemporánea (PMVSC).

C.2. Componente tecnológico.

Las PMVSC están definidas por cuatro sistemas constructivos: 1) Mejora N°1: aislación térmica de envolventes, 2) Mejora N°2: sombreado fachada norte, 3) Mejora N°3: incremento de la masa térmica en envolvente y 4) Mejora N°4: ventilación mecánica nocturna. Estas medidas fueron diseñadas teniendo en cuenta la viabilidad constructiva en una vivienda edificada. En las figuras C.1, C.2, C.3 y C.4, se muestran los detalles constructivos de medidas de mejoras propuestas.

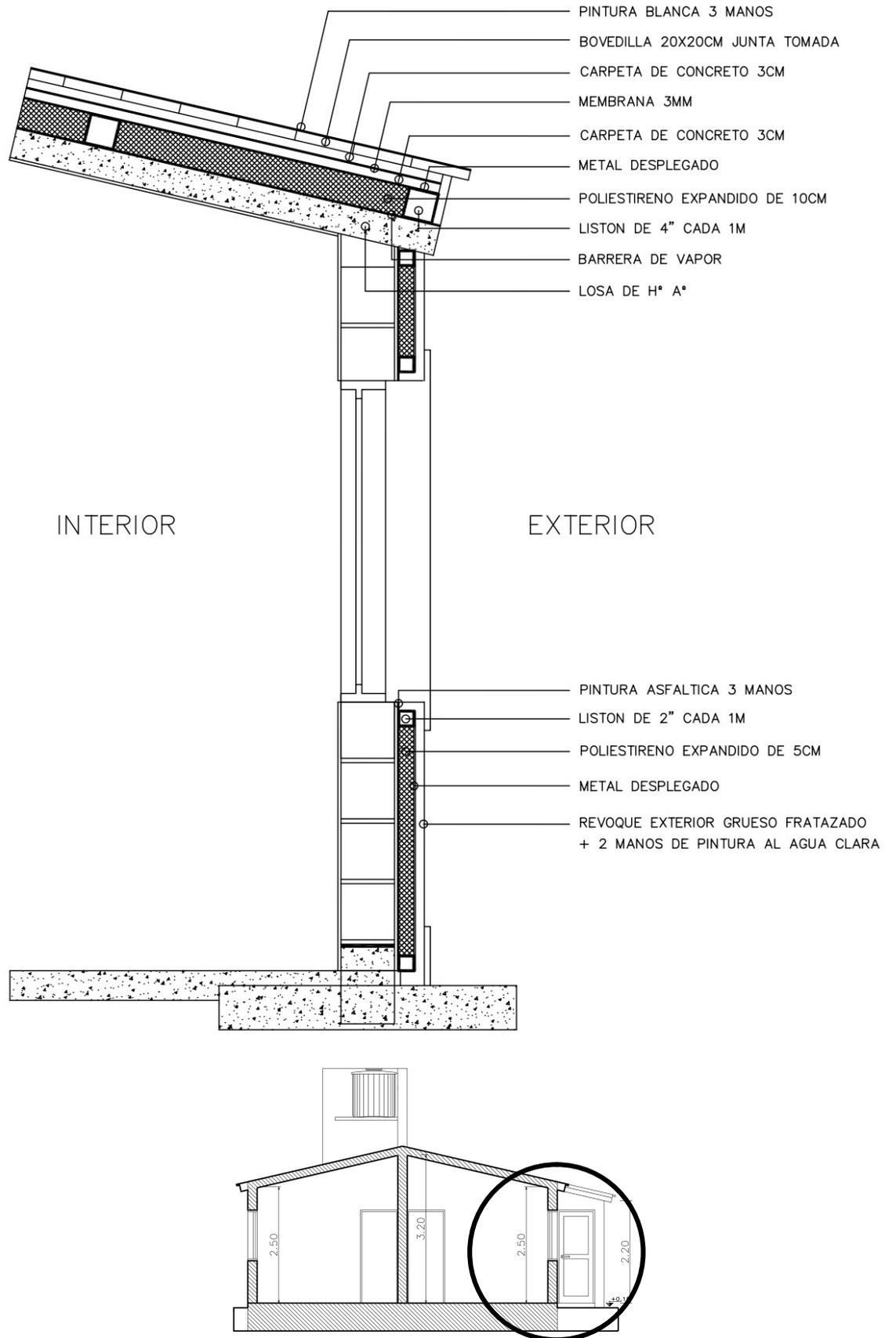


Figura C.1: Detalle constructivo de PMVSC N°1: aislación térmica en envolventes [Elaboración propia].

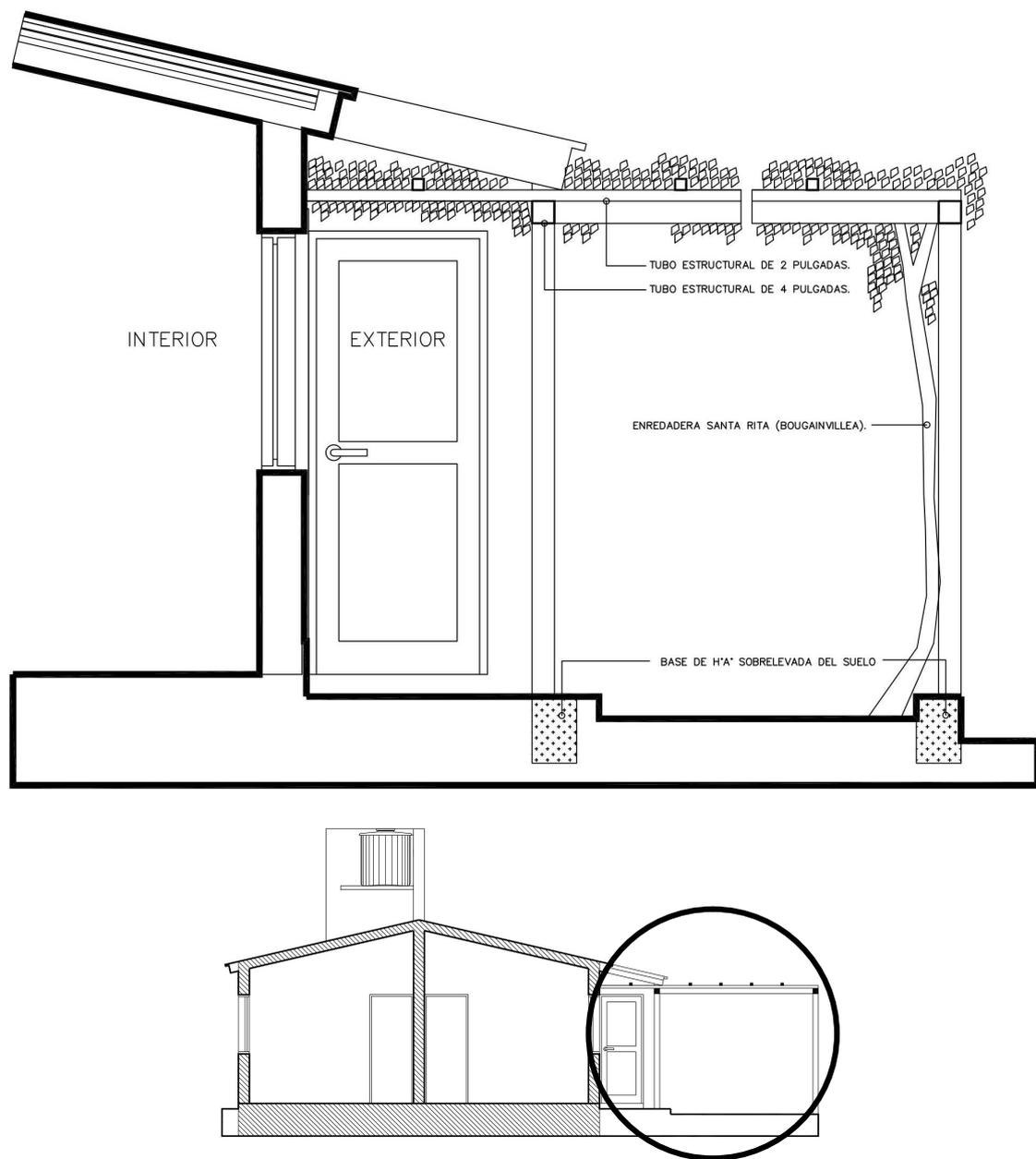


Figura C.2. Detalle constructivo de PMVSC N°2: sombreado de fachada norte con la pérgola [Elaboración propia].

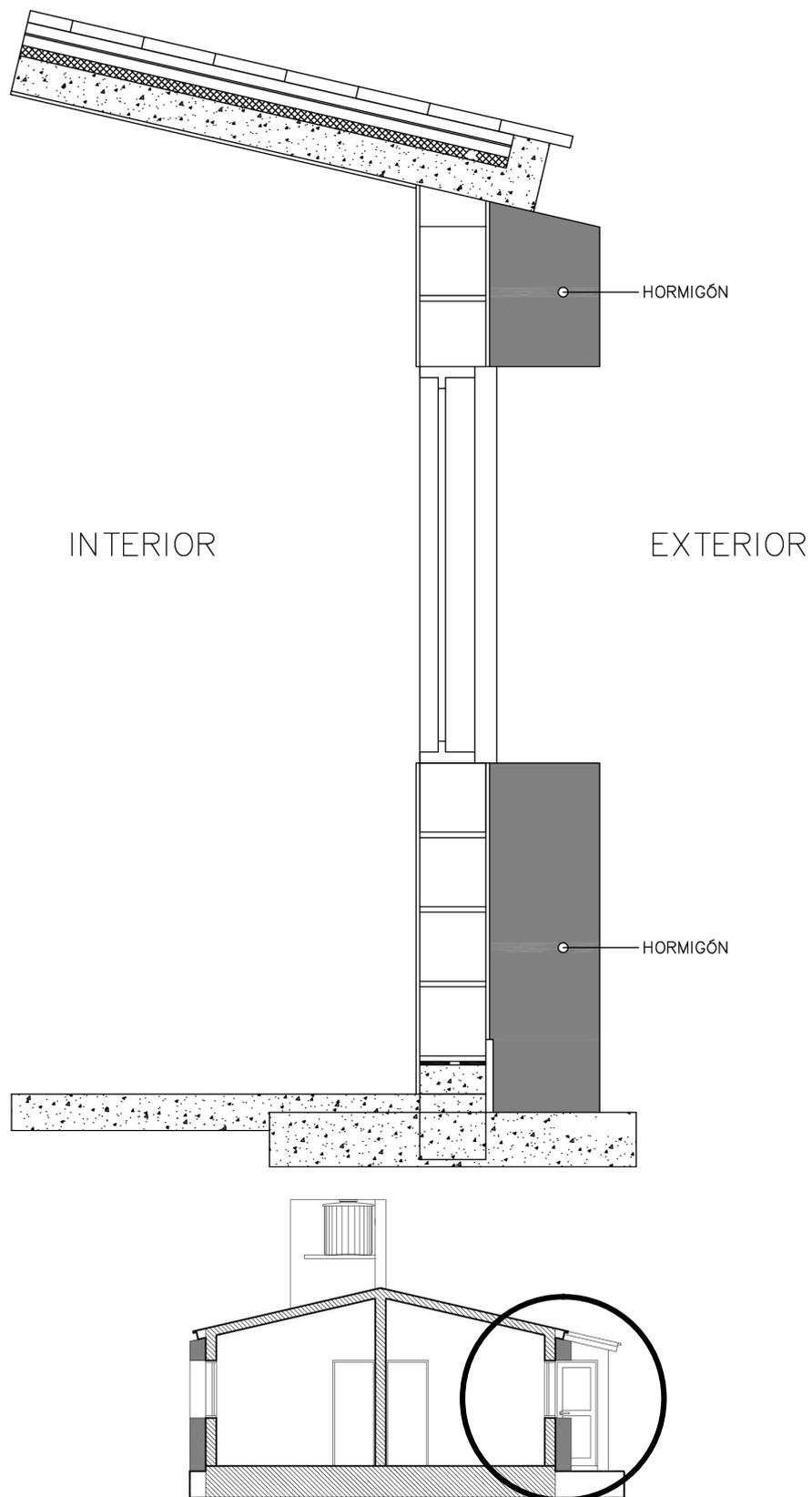


Figura C.3. Detalle constructivo de PMVSC N°3: incremento de masa térmica en envolventes [Elaboración propia].

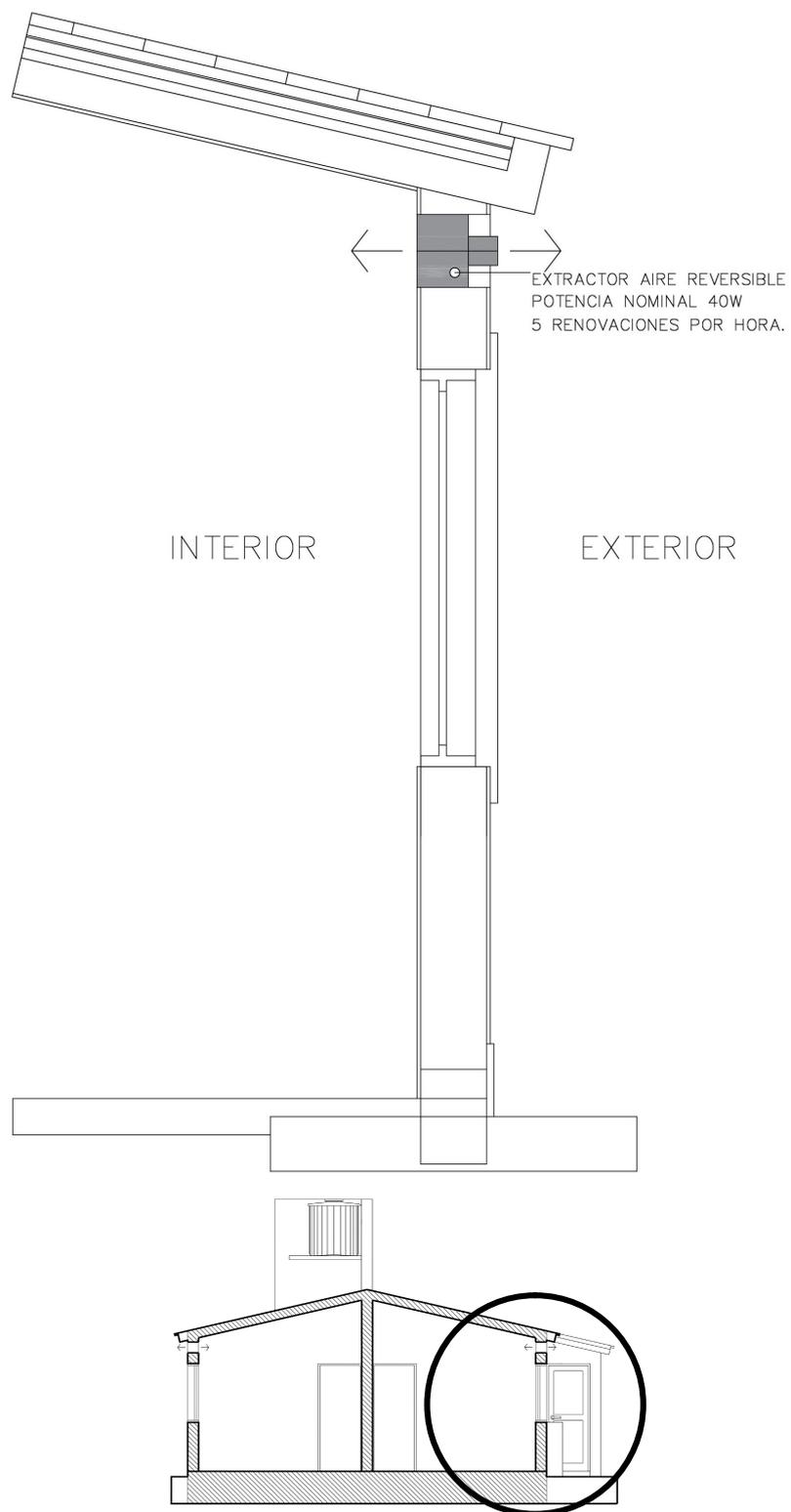


Figura C.4. Detalle constructivo de PMVSC N°4: ventilación mecánica nocturna [Elaboración propia].

Índice y referencias de elementos gráficos.

Listado de tablas.

CAPÍTULO N°2.

Tabla 2.1.	Principales variables climáticas de la ciudad de SFDVDC. Periodos calculados: temperatura y radiación 2010-2020.....	37
Tabla 2.2.	Características térmicas de muros y techos.....	43
Tabla 2.3.	Potencias máximas de las ganancias internas diarias por local.	48
Tabla 2.4.	Perfil de uso de las zonas.....	48
Tabla 2.5.	Temperaturas medias registradas para los periodos representativos de invierno y verano.....	49

CAPÍTULO N°3.

Tabla 3.1.	Valores recomendados de temperatura en consigna para locales habitables de viviendas.....	78
Tabla 3.2.	Cantidad de aire recomendada para ventilación de locales tipo según intensidad de actividad en verano e invierno.....	78
Tabla 3.3.	Parámetros seleccionados para el cálculo de PPD y PMV.....	83
Tabla 3.4.	Factores de conversión para el NOA.....	83
Tabla 3.5.	Variable e indicadores ambientales para un periodo de 100 años.....	95
Tabla 3.6.	Descripción de las herramientas más conocidas.....	98
Tabla 3.7.	Bases de datos para estudios de AECV.....	100
Tabla 3.8.	Programas de simulación térmica para un ACV.....	102

CAPÍTULO N°4.

Tabla 4.1.	Propiedades térmicas de los materiales de la VSV.....	127
Tabla 4.2.	Dimensiones de las zonas térmicas.....	129

Tabla 4.3.	Energía primaria y emisiones de CO ₂ , asociadas a cada proceso unitario en 100 años.....	134
Tabla 4.4.	Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort.....	138

CAPÍTULO N°5.

Tabla 5.1.	Propiedades térmicas de los materiales de la VSC.....	148
Tabla 5.2.	Dimensiones de las zonas.....	149
Tabla 5.3.	Índices MBE y CV RMSE.....	151
Tabla 5.4.	Energía primaria y emisiones de CO ₂ , asociadas a cada proceso unitario en 100 años.....	155
Tabla 5.5.	Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort.....	158
Tabla 5.6.	Comparación de la relación del PCG (kg CO ₂ /m ² /año) en diferentes casos de estudios.....	164

CAPÍTULO N°6.

Tabla 6.1.	Propiedades térmicas de los materiales de las PMVSC: M1 y M3.....	177
Tabla 6.2.	Evaluación de las PMVSC con respecto al caso base en 100 años.....	180
Tabla 6.3.	Porcentaje de horas ocupadas en cada categoría de confort....	182
Tabla 6.4.	Comparación del impacto ambiental y el ahorro de energía primaria de las VSC, VSV y M1+M4 en SFDVDC.....	184

Listado de figuras.

CAPÍTULO N°1.

Figura 1.1.	Impacto global del consumo de energía final (izquierda) y emisiones de CO ₂ (derecha) de los edificios en 2021 [4].....	6
Figura 1.2.	Distribución de la generación eléctrica (izquierda) y el consumo eléctrico (derecha) en la Argentina 2019 [7].....	8
Figura 1.3.	Consumo eléctrico residencial de CABA y GBA [7].....	8

Figura 1.4.	Emisiones de GEI de Argentina, por año, en millones de toneladas de CO ₂ equivalente y porcentaje del uso residencial sobre el total, 1990-2016 [10].....	9
Figura 1.5.	Comparación de dos barrios IPV con características arquitectónicas similares localizados en climas distintos: izquierda, SFDVDC (550 msnm) y derecha, Villa de Antofagasta de la Sierra (3320 msnm) [Fotos Lucio A. Molas].....	12
Figura 1.6.	Comparación de dos viviendas con características arquitectónicas y climas distintos: izquierda, SFDVDC (550 msnm) y derecha, Villa de Antofagasta de la Sierra (3320 msnm) [Fotos Lucio A. Molas].....	12
Figura 1.7.	Organización de la memoria [Elaboración propia].....	24

CAPÍTULO N°2.

Figura 2.1.	Izquierda: zonas bioambientales de la Argentina y localización de Catamarca. Centro: zonas bioambientales en Catamarca y Capital [Elaboración propia]. Derecha: imagen de la ciudad de SFDVDC [Foto Lucio A. Molas].....	36
Figura 2.2.	Evolución de la VSV y VSC en el NOA [Elaboración propia].....	38
Figura 2.3.	Ubicación actual de la vivienda social contemporánea. A la izquierda se señala la localización en el tejido regular planificado [Google Earth] y a la derecha la morfología urbana [Foto Lucio A. Molas].....	41
Figura 2.4.	Planta general de la VSC [Elaboración propia].....	42
Figura 2.5.	Morfología de la VSC. A: volumetría racionalista y B: techo a dos aguas [Elaboración propia]. Fachada principal (izquierda) [Foto Lucio A. Molas].....	42
Figura 2.6.	Sección de la VSC con la identificación de los sistemas constructivos [Elaboración propia].....	43
Figura 2.7.	Flujo de calor a través de los sistemas constructivos en verano [Elaboración propia].....	44
Figura 2.8.	Crecimiento de la VSC en un periodo de 10 años. Tipología original año 2008 (izquierda) y modificada en año 2018 (derecha) [Elaboración propia].....	45
Figura 2.9.	Imágenes de las ampliaciones de la VSC en un periodo de 10 años. Año 2008 (izquierda) y año 2018 (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].....	45

Figura 2.10.	Planta de la vivienda con la ubicación de los sensores (señalados con círculo rojo) [Elaboración propia] y dos imágenes (referenciadas a la planta) del porch sur (arriba) y la cocina- comedor (abajo) [Fotos Lucio A. Molas].....	47
Figura 2.11.	Comportamiento térmico la cocina – comedor, del 19 al 24 de enero de 2009 [Elaboración propia].....	51
Figura 2.12.	Comportamiento térmico del dormitorio norte, del 19 al 24 de enero de 2009 [Elaboración propia].....	51
Figura 2.13.	Comportamiento térmico de la cocina-comedor, del 15 al 20 de junio de 2008 [Elaboración propia].....	53
Figura 2.14.	Comportamiento térmico del dormitorio norte, del 15 al 20 de junio de 2008 [Elaboración propia].....	53
Figura 2.15.	Mejoras propuestas para reducir la demanda de refrigeración [Elaboración propia].....	55
Figura 2.16.	Ejecución de las mejoras tecnológicas en el techo. Izquierda: remoción de las bovedillas. Derecha: colocación de la aislación térmica [Fotos Lucio A. Molas].....	55
Figura 2.17.	Ejecución de las mejoras tecnológicas en la mampostería. Izquierda: colocación de la aislación térmica. Derecha: terminación con revoque fino [Fotos Lucio A. Molas].....	56
Figura 2.18.	Soluciones constructivas para reducir el consumo de energía: construcción de pérgola en fachada norte (izquierda) e instalación de calefón solar (derecha) [Fotos Lucio A. Molas]....	57

CAPÍTULO N°3.

Figura 3.1.	Propuesta del método de ACV, con las nuevas incorporaciones [Elaboración propia].....	68
Figura 3.2.	Sistema del producto o modelo para un producto [Elaboración propia].....	70
Figura 3.3.	Sistema del producto o modelo para un edificio [Elaboración propia].....	70
Figura 3.4.	VSC, construidas en 1973 (izquierda) y 2006 (derecha), fuera del casco histórico de SFDVDC. [Fotos Lucio A. Molas].....	71
Figura 3.5.	VSV, existente con más de 100 años (izquierda) y otra demolida por el mercado inmobiliario (derecha) dentro del casco histórico de SFDVDC. [Fotos Lucio A. Molas].....	72
Figura 3.6.	Método simplificado de ACV de Zabalza Bribián con las nuevas	

	incorporaciones (en rojo) [Elaboración propia].....	73
Figura 3.7.	Entradas y salidas de los procesos unitarios. En rojo se propone incorporar el nivel de confort térmico [Elaboración propia].....	75
Figura 3.8.	Procesos unitarios del ciclo de vida del MTE [Elaboración propia].....	87

CAPÍTULO N°4.

Figura 4.1.	Ubicación de la VSV. A la izquierda se señala la localización en el tejido irregular semirrural no planificado [Google Earth] y a la derecha la morfología urbana [Fotos Lucio A. Molas].....	116
Figura 4.2.	Planta general de la VSV [Elaboración propia].....	119
Figura 4.3.	Morfología de la VSV. Se destaca la fachada de estilo italianizante y el techo a una sola agua. [Fotos Lucio A. Molas].	119
Figura 4.4.	Sección con la ubicación de los sistemas constructivos [Elaboración propia].....	120
Figura 4.5.	Amortiguación y desfase de la onda térmica [10].....	122
Figura 4.6.	Comparación de temperaturas interiores y exteriores de una construcción con bóvedas de adobe (izquierda) en relación a una construida con elementos prefabricados de hormigón (derecha) [9].....	122
Figura 4.7.	Mecanismos de transferencia de calor en la doble cubierta ventilada [21].....	124
Figura 4.8.	Transferencia de calor a través de los sistemas constructivos, durante el día (izquierda) y la noche (derecha) [Elaboración propia].....	126
Figura 4.9.	Modelo geométrico de la VSV: vista este (izquierda) y vista oeste (derecha) [Elaboración propia].....	127
Figura 4.10.	Zonas térmicas de la VSV [Elaboración propia].....	128
Figura 4.11.	Análisis de confort térmico para el día de diseño de verano [Elaboración propia].....	130
Figura 4.12.	Análisis de confort térmico para el día de diseño de invierno [Elaboración propia].....	130
Figura 4.13.	Comparación de la inercia térmica en cerramientos de 20 y 70 cm, para un día típico de verano [Elaboración propia].....	132
Figura 4.14.	Comparación de la inercia térmica en cerramientos de 20 y 70 cm, para un día típico de invierno [Elaboración propia].....	132
Figura 4.15.	Energía incorporada de cada componente constructivo (MJ/m ²)	

	[Elaboración propia].....	136
Figura 4.16.	Energía incorporada de cada elemento constructivo (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	136
Figura 4.17.	Energía operativa requerida para refrigerar y calefactar (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	137
Figura 4.18.	Comparación de la inercia térmica y la energía operativa para refrigerar y calefactar (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	137

CAPÍTULO N°5.

Figura 5.1.	Modelo geométrico de la VSC: vista frontal (izquierda) y vista posterior (derecha) [Elaboración propia].....	147
Figura 5.2.	Zonas térmicas de la VSC [Elaboración propia].....	149
Figura 5.3.	Cocina-comedor (zona 2): comparativa entre temperaturas experimentales y simuladas, en temporada de refrigeración [Elaboración propia].....	151
Figura 5.4.	Cocina-comedor (zona 2): comparativa entre temperaturas experimentales y simuladas, en temporada de calefacción [Elaboración propia].....	151
Figura 5.5.	Análisis de confort térmico para el día de diseño de verano [Elaboración propia].....	153
Figura 5.6.	Análisis de confort térmico para el día de diseño de invierno [Elaboración propia].....	153
Figura 5.7.	Energía incorporada de cada componente constructivo (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	156
Figura 5.8.	Energía incorporada de cada elemento constructivo (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	157
Figura 5.9.	Energía operativa requerida para refrigerar y calefactar (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	157
Figura 5.10.	Comparación de sistemas constructivos: VSC (izquierda) y VSV (derecha) [Elaboración propia].....	159
Figura 5.11.	Evaluación de energía incorporada y operativa (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	160
Figura 5.12.	Evaluación de energía primaria de los procesos unitarios (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	160
Figura 5.13.	Evaluación de energía incorporada de los componentes constructivos (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	161

Figura 5.14.	Evaluación energía incorporada de los elementos constructivos del techo (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	161
Figura 5.15.	Evaluación de energía operativa para refrigerar (MJ/m ²) [Elaboración propia].....	162
Figura 5.16.	Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort [Elaboración propia].....	163

CAPÍTULO N°6.

Figura 6.1.	M1: aislamiento térmico. Ubicación en planta de las envolventes verticales y horizontal (izquierda) [Elaboración propia] y la construcción (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].....	174
Figura 6.2.	M2: sombreado de fachada norte. Ubicación en planta de la pérgola (izquierda) [Elaboración propia] y la construcción (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].....	175
Figura 6.3.	M3: incremento de masa térmica en envolventes. Ubicación en planta (izquierda) y su visualización tridimensional (derecha). [Elaboración propia].....	176
Figura 6.4.	M4: ventilación mecánica nocturna y su ubicación en planta (azul), a la izquierda y sistema de balanced, a la derecha [Elaboración propia].....	176
Figura 6.5.	Comparativa de confort térmico para el día de diseño de verano [Elaboración propia].....	178
Figura 6.6.	Comparativa de confort térmico para el día de diseño de invierno [Elaboración propia].....	179
Figura 6.7.	Evaluación energética de las PMVSC con respecto al caso base [Elaboración propia].....	181
Figura 6.8.	Evaluación de la energía incorporada, energía operativa y emisiones de CO ₂ , asociadas a EO, de las VSV, M1+M4 y VSC (unidad de referencia) [Elaboración propia].....	182
Figura 6.9.	Porcentaje de horas ocupadas en zonas para cada categoría de confort [Elaboración propia].....	183

CAPÍTULO N°7.

Figura 7.1.	Imagen del avance de la urbanización con VSC, en el límite sur de SFDVDC [Diario El Ancasti – Catamarca].....	194
-------------	---	-----

ANEXO A.

Figura A.1.	Planta general de la VSC [Elaboración propia].....	199
Figura A.2.	Seccion de la VSC [Elaboración propia].....	200
Figura A.3.	Imagen frontal y posterior de la VSC [Fotos Lucio A. Molas].....	200
Figura A.4.	Detalle de los sistemas constructivos de la VSC [Elaboración propia].....	201
Figura A.5.	Principales electrodomésticos. De izquierda a derecha: bomba de calor, televisor y heladera [Fotos Lucio A. Molas].....	202
Figura A.6.	Gas butano envasado en cilindros de 10kg (izquierda) y cocina para preparación de alimentos (derecha) [Fotos Lucio A. Molas].....	202
Figura A.7.	Dispositivos diseñados para alojar a los sensores exteriores e interiores. Izquierda: soportes y protectores térmicos. Derecha: anillo para colgar el sensor. [Fotos Lucio A. Molas].....	203
Figura A.8.	Dispositivo y sensor funcionando en porch norte y cocina-comedor [Fotos Lucio A. Molas].....	203
Figura A.9.	Descarga de datos de sensores. Izquierda: sensor interior tipo HOBO en funcionamiento. Derecha: bajada de datos a computadora portátil [Fotos Lucio A. Molas].....	203
Figura A.10.	Comportamiento térmico del dormitorio sur, del 19 al 24 de enero de 2009 [Elaboración propia].....	204
Figura A.11.	Comportamiento térmico del baño, del 19 al 24 de enero de 2009 [Elaboración propia].....	204
Figura A.12.	Comportamiento térmico del dormitorio sur, del 15 al 20 de junio de 2008 [Elaboración propia].....	205
Figura A.13.	Comportamiento térmico del baño, del 15 al 20 de junio de 2008 [Elaboración propia].....	206
Figura A.14.	Detalle constructivo con mejoras tecnológicas [Elaboración propia].....	207
Figura A.15.	Construcción de las mejoras tecnológicas en el techo y mamposterías [Fotos Lucio A. Molas].....	208

ANEXO B.

Figura B.1.	Planta general de la VSV [Elaboración propia].....	210
Figura B.2.	Corte A-A de la VSV [Elaboración propia].....	211
Figura B.3.	Imagen exterior del comedor (izquierda) y galería (derecha)	

	[Fotos Lucio A. Molas].....	211
Figura B.4.	Detalle constructivo de la fachada urbana italianizante [Elaboración propia].....	212
Figura B.5.	Imagen de una vivienda vernácula italianizante, parcialmente demolida, donde se observan los tres sistemas constructivos [Elaboración propia].....	213
Figura B.6.	Blidaje y rejilla de ventilación del sistema constructivo de doble cubierta ventilada [Elaboración propia].....	213
Figura B.7.	Vista de la parte inferior del dormitorio norte de la VSV [Elaboración propia].....	214

ANEXO C.

Figura C.1.	Detalle constructivo de PMVSC N°1: aislación térmica en envolventes [Elaboración propia].....	217
Figura C.2.	Detalle constructivo de PMVSC N°2 sombreado de fachada norte con la pérgola [Elaboración propia].....	218
Figura C.3.	Detalle constructivo de PMVSC N°3: incremento de masa térmica en envolventes [Elaboración propia].....	219
Figura C.4.	Detalle constructivo de PMVSC N°4: ventilación mecánica nocturna [Elaboración propia].....	220

