



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO**

**Evaluación del desempeño térmico y energético de mejoras pasivas
aplicadas a vivienda existente en contexto de cambio climático en
Montevideo (Uruguay)**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

AUTOR: Lucía Pereira Ruchansky

**PROFESOR GUÍA: Alexis Pérez Fargallo (Chile)
CO-PROFESOR GUÍA: Daniel Sosa Ibarra (Uruguay)**

CONCEPCIÓN, 9 de Marzo de 2019

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi profesor guía, el Dr. Arq. Alexis Pérez Fargallo por la generosidad en la transmisión de sus conocimientos, la dedicación y aportes brindados en el desarrollo de la tesis. Al co-profesor guía Mg. Arq. Daniel Sosa Ibarra, por la orientación y apoyo brindados.

Un agradecimiento especial a quienes, de diferentes formas, me facilitaron información para poder realizar el trabajo: a la familia González, Dr. Rodrigo Figueroa, Arq. Alicia Picción y la oficina de “Tierras y Viviendas” de la Intendencia de Montevideo.

Finalmente agradecer a mi familia y amigos por la compañía, el apoyo y la paciencia, en el día a día durante esta etapa.

Resumen

Implementar mejoras energéticas en viviendas existentes permite mejorar el confort de los habitantes y/o disminuir su consumo de energía; la perspectiva de cambio climático (CC) y extensa vida útil de viviendas en nuestro medio evidencia la necesidad de considerar condiciones climáticas actuales y futuras.

Esta investigación evalúa el impacto de estrategias de mejoramiento sobre el desempeño térmico y energético de viviendas existentes, mediante simulación en *DesignBuilder*, considerando escenarios de CC A2 y B1 para 2050 en Montevideo-Uruguay, generados desde *Meteonorm*.

Se considera una vivienda social característica del parque habitacional calibrada en base al *AshraeGuideline14*. Se aplican estrategias pasivas considerado niveles de referencia de normativas en clima similar. Se evalúan los resultados bajo el modelo de confort adaptativo aplicado a cada escenario climático (ASHRAE 55:2017) y la demanda de energía para climatización (EN 16798).

Los resultados demuestran que considerando el desempeño durante el periodo 2020-2050, es posible mediante las estrategias pasivas constructivas evaluadas, aumentar el tiempo en confort hasta 16% y, reducir la demanda de energía hasta 68%, y que incorporando adicionalmente ventilación se incrementan dichos niveles.

La metodología presentada permite evaluar casos comparativamente entre ambos indicadores y considerar la variación en el desempeño por CC, para orientar en niveles de desempeño alcanzables mediante mejoras energéticas aplicadas a viviendas existentes.

Palabras claves: mejoramiento energético de viviendas, confort adaptativo, desempeño térmico, desempeño energético, cambio climático

Abstract

Energy improvements measures applied to existing dwellings allows increase inhabitant's comfort and/or reduce energy consumption. Projected climate change (CC) and long useful life of the buildings in our environment, highlights the need to consider current and future climatic conditions.

The aim of this research is to evaluate the impact of retrofit strategies on thermal and energy performance in existing dwellings, through simulation with DesignBuilder, considering CC IPCC scenarios, A2 and B1 for 2050 in Montevideo-Uruguay, generated by Meteonorm.

A representative social housing of the building stock was evaluated, calibrated based on AshraeGuideline14. Passive strategies were applied considering reference levels of regulations in similar climate. Results were evaluated under the adaptive comfort model applied to each climatic scenario (ASHRAE 55:2017) and the energy demand for conditioning (EN 16798).

Results shows that it is possible to increase the comfort time up to 16%, and to reduce the energy demand up to 68%, through passive strategies considering the dwelling in use between 2020-2050. Moreover, incorporating additional ventilation, these levels can be improved.

Methodology presented allows to evaluate the cases studies comparing both indicators, considering performance variability by CC, in order to guide performance levels achievable through energy improvements applied to existing dwellings.

Keywords: dwelling retrofit, adaptive thermal comfort, thermal performance, energy performance, climate change

Índice

Capítulo 1. Introducción	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Hipótesis	16
1.3 Objetivo general.....	16
1.4 Objetivos específicos.....	16
Capítulo 2. Marco Teórico	17
2.1 Características del contexto local	17
2.1.1 Clima de Montevideo	17
2.1.2 Características del parque habitacional existente	19
2.1.3 Reglamentación térmica	23
2.2 Cambio Climático	25
2.2.1 Escenarios proyectados de CC	27
2.2.2 Proyecciones de cambio climático para el clima local	29
2.2.3 Cambio Climático y edificación	30
2.3 Mejoramiento energético de viviendas existentes.....	32
2.3.1 Tipos de mejoramiento energético.....	33
2.4 Indicadores de desempeño	38
2.4.1 Modelos de confort térmico.....	39
2.4.2 Incidencia del modelo de confort en la evaluación energética	43
Capítulo 3. Metodología	45
3.1 Selección y caracterización del caso de estudio	47
3.1.1 Determinación del caso de estudio.....	47
3.1.2 Condiciones de operación y uso	50
3.1.3 Características constructivas y térmicas	52
3.2 Definición de variables a evaluar	59
3.2.1 Escenarios climáticos y generación de archivos climáticos.....	59
3.2.2 Criterios de selección de mejoras a estudiar.....	64
3.3 Modelo de confort adaptativo.....	66
3.4 Simulación	68
3.4.1 Modelo de estudio	68
3.4.2 Indicadores de evaluación.....	68
3.4.3 Evaluación multivariable	69

Capítulo 4. Resultados.....	70
4.1 Aplicación del confort adaptativo para el clima de Montevideo.....	70
4.2 Caracterización de un caso representativo	73
4.2.1 Validación del modelo.....	73
4.2.2 Desempeño térmico y energético del caso base	76
4.3 Mejoras térmicas y energéticas a evaluar	79
4.4 Evaluación de desempeño térmico y energético de mejoras.....	83
4.4.1 Estudio multivariable de mejoras	83
4.4.2 Análisis de casos por demanda de energía para acondicionamiento térmico	89
4.4.3 Análisis de casos por confort térmico	94
4.4.4 Estudio demanda de energía y tiempo en confort en 30 años.....	100
4.4.5 Proyecciones en la demanda y el confort en escenarios futuros	104
Capítulo 5. Conclusiones.....	110
Líneas futuras de investigación	114
Referencias bibliográficas	115
Anexos.....	122

Índice de tablas

Tabla 2-1. Valores máximos de transmitancia para cerramientos exteriores. Según (DINAVI / MVOTMA 2011)	23
Tabla 2-2. Requerimientos para cerramientos vidriados. Según Digesto Municipal (IM 2009)	24
Tabla 2-3. Características de escenarios SRES. Adaptado de Quante y Bjørnæs (2016)	28
Tabla 2-4. Características de escenarios RCP. Adaptado de Quante y Bjørnæs (2016)	28
Tabla 2-5. Características de escenarios SSP. Elaborado en base a (O'Neill et al. 2016)	28
Tabla 2-6. Clasificación de medidas de renovación energética de viviendas. Adaptado de Andrić, Koc y Al-Ghamdi (2019)	34
Tabla 3-1. Porcentaje de huecos por fachada	49
Tabla 3-2. Cargas y período de ocupación lunes a viernes. Adaptado de Picción et al. (2009)	50
Tabla 3-3. Cargas y período de ocupación sábado y domingo. Adaptado de Picción et al. (2009)	51
Tabla 3-4. Características materiales y térmicas de la envolvente	54
Tabla 3-5. Características materiales, térmicas y lumínicas de las ventanas y puertas	55
Tabla 3-6. Cargas y período de ocupación lunes a viernes	55
Tabla 3-7. Cargas y período de ocupación sábado y domingo	56
Tabla 3-8. Calendario de ventilación diaria	56
Tabla 3-9. Calendario uso de protecciones solares	57
Tabla 3-10. Configuración de suelo	58
Tabla 3-11. Características climáticas de normativas de referencia	64
Tabla 4-1. Porcentaje de tiempo por fuera de los límites de aplicación del modelo adaptativo ASHRAE 55 ..	70
Tabla 4-2. Temperaturas límite por rango de confort por escenarios climáticos base, B1 2050 y A2 2050	72
Tabla 4-3. Resultados de calibración	74
Tabla 4-4. Análisis de tiempo en confort y temperaturas - Caso base- Clima actual	76
Tabla 4-5. Análisis de demanda anual de energía - Caso base - Clima actual	76
Tabla 4-6. Análisis de tiempo en confort- Caso base - Escenario B1 2050	77
Tabla 4-7. Análisis de demanda anual de energía - Caso base - Escenario B1 2050	77
Tabla 4-8. Análisis de tiempo en confort- Caso base - Escenario A2 2050	78
Tabla 4-9. Análisis de demanda anual de energía - Caso base - Escenario A2 2050	78
Tabla 4-10. Normativa Rosario-Argentina. En base a Municipalidad de Rosario (2011)	80
Tabla 4-11. Estándar Chileno Código de Construcción Sustentable . En base a MINVU (2016)	81
Tabla 4-12. Normativa Española. En base a Código Técnico de la Edificación (CTE) (2017)	81
Tabla 4-13. Rangos de mejoras a implementar sobre la envolvente del caso base	82
Tabla 4-14. Mejoras constructivas y operacionales a evaluar	82

Tabla 4-15. Rangos de demanda anual de energía para acondicionamiento térmico por tramos y escenarios climáticos.	86
Tabla 4-16. Variación de la demanda anual de energía para acondicionamiento térmico respecto al caso base por tramos y escenarios climáticos.	87
Tabla 4-17. Identificación de casos de estudio.....	88
Tabla 4-18: Variación del tiempo en confort respecto al caso base, por tramo y escenario climático,.....	99

Índice de Figuras

Figura 2-1. Mapa de zonificación climática de Uruguay, según norma UNIT 1026:99.....	17
Figura 2-2. Temperatura y humedad mensuales para Montevideo.	18
Figura 2-3. Distribución de viviendas por departamentos.	19
Figura 2-4. Tipología de vivienda en Montevideo	20
Figura 2-5. Superficie de viviendas en Montevideo.....	20
Figura 2-6. Antigüedad del parque habitacional de Montevideo	21
Figura 2-7. Material predominante en viviendas en viviendas de Montevideo.	22
Figura 2-8. Cambios observados de la temperatura superficial a escala mundial, comparados con los resultados simulados mediante modelos del clima que contemplan forzamientos naturales o forzamientos naturales y antropógenos. Fuente: IPCC (2007).....	26
Figura 2-9. Comparación entre concentraciones de CO ₂ proyectadas en los escenarios RCP y SRES. Fuente: (IPCC, 2010).....	29
Figura 2-10. Rangos de confort modelo ASHRAE 55 Fuente: ASHRAE:2017	40
Figura 2-11. Rangos de temperatura operativa aceptable para espacios naturalmente ventilados.	42
Figura 3-1. Esquema metodológico de la investigación.....	46
Figura 3-2. Fachadas características de “viviendas populares”	47
Figura 3-3. Caso de estudio: Planta	49
Figura 3-4. Caso de estudio: Fachada principal	49
Figura 3-5. Fachada principal y posterior	53
Figura 3-6. Fachadas laterales.....	53
Figura 3-7. Plano de la vivienda con indicación de las habitaciones monitorizadas.	54
Figura 3-8. Temperatura media (T _m), Temperatura máxima media (T _x), Temperatura mínima media (T _n) en escenarios B1 y A2. TMY(1961-1990) y 2050. Variación de temperatura entre el 2050 y período base para cada caso. Elaborado en base a archivos obtenidos de Meteonorm.	61
Figura 3-9. Temperatura media (T _m), Temperatura máxima media (T _x), Temperatura mínima media (T _n) en escenario A2. TMY(1961-1990) y 2050. Variación de temperatura entre el 2050 y período base para cada caso. Elaborado en base a archivos obtenidos de CCWorldWeatherGen.....	62
Figura 3-10. Relación entre datos obtenidos de Meteonorm y CCWorldWeatherGen	63
Figura 3-11. Sistemas de aislación por el exterior (a) sistema para cubiertas (b) sistema para muros	65
Figura 3-12. Rangos de temperatura operativa para espacios naturalmente.....	67
Figura 4-1. Rangos de confort adaptativo para clima actual basado en modelo ASHRAE 55.....	71
Figura 4-2. Rangos de confort adaptativo para escenario climático B1 2050 basado en ASHRAE55.....	71
Figura 4-3. Rangos de confort adaptativo para escenario climático A2 2050 basado en ASHRAE 55.....	71
Figura 4-4. Dormitorio 1 - Gráfica de calibración	75

Figura 4-5. Distribuidor - Gráfica de calibración.....	75
Figura 4-6. Dormitorio 2 - Gráfica de calibración	75
Figura 4-7. Demanda de refrigeración, calefacción y total para casos de mejoras. Clima actual	84
Figura 4-8. Demanda de refrigeración, calefacción y total para casos de mejoras. Escenario clima B1-2050	84
Figura 4-9. Demanda de refrigeración, calefacción y total para casos de mejoras. Escenario clima A2-2050	85
Figura 4-10. Demanda por caso de estudio en relación al caso base, Clima actual: (a) Demanda total (b) Demanda de refrigeración (c) Demanda de calefacción.....	90
Figura 4-11. Demanda por caso de estudio en relación al caso base, Escenario B1: (a) Demanda total (b) Demanda de refrigeración (c) Demanda de calefacción, Escenario A2: (d) Demanda total (e) Demanda de refrigeración (f) Demanda de calefacción.....	91
Figura 4-12. Porcentaje de tiempo en confort o desconfort por caso de estudio en relación al caso base, Escenario clima actual, Estar: (a) Tiempo total en confort (b) Tiempo en desconfort por calor (c) Tiempo en desconfort por frío, Dormitorio 2: (d) Tiempo total en confort (e) Tiempo en desconfort por calor (f) Tiempo en desconfort por frío.....	95
Figura 4-13. Porcentaje de tiempo en confort o desconfort por caso de estudio en relación al caso base, Escenario clima B1 2050, Estar: (a) Tiempo total en confort (b) Tiempo en desconfort por calor (c) Tiempo en desconfort por frío, Dormitorio 2: (d) Tiempo total en confort (e) Tiempo en desconfort por calor (f) Tiempo en desconfort por frío.....	96
Figura 4-14. Porcentaje de tiempo en confort o desconfort por caso de estudio en relación al caso base, Escenario clima A2 2050, Estar: (a) Tiempo total en confort (b) Tiempo en desconfort por calor (c) Tiempo en desconfort por frío, Dormitorio 2: (d) Tiempo total en confort (e) Tiempo en desconfort por calor (f) Tiempo en desconfort por frío.....	97
Figura 4-15. Variación anual de la demanda y horas en confort proyectado a 30 años en el caso base	100
Figura 4-16. Evaluación de casos por tiempo total en confort y demanda total de climatización período de 2020-2050, (a) Estar (b) Dormitorio 2.....	101
Figura 4-17. Evaluación de casos por desconfort por calor y demanda de refrigeración en un período de 30años, (a) Estar (b) Dormitorio 2.....	102
Figura 4-18. Evaluación de casos por desconfort por frío y demanda de calefacción en un período de 30años, (a) Estar (b) Dormitorio 2.....	102
Figura 4-19. Relación entre la de demanda total para climatización en las condiciones de clima actual y las condiciones de escenarios futuros para cada caso.....	104
Figura 4-20. Relación entre la de demanda de refrigeración en las condiciones de clima actual y las condiciones de escenarios futuros para cada caso.....	105
Figura 4-21. Relación entre la de demanda de calefacción en condiciones de clima actual y condiciones de escenarios futuros para cada caso	106

Figura 4-22. Relación entre el tiempo en confort en condiciones de clima actual y condiciones de escenarios futuros para cada caso (a) Estar (b) Dormitorio 2 107

Figura 4-23. Relación entre el tiempo en disconfort por frío en condiciones de clima actual y condiciones de escenarios futuros para cada caso (a) Estar (b) Dormitorio 2 108

Figura 4-24. Relación entre el tiempo en disconfort por calor en condiciones de clima actual y condiciones de escenarios futuros para cada caso (a) Estar (b) Dormitorio 2 108

Acrónimos

ACS - Agua Caliente Sanitaria

ACH - Cambios de aire por hora

ASHRAE - Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

A1 - Familia de escenarios del Informe Especial sobre escenarios de emisiones del IPCC

A2 - Familia de escenarios del Informe Especial sobre escenarios de emisiones del IPCC

B1 - Familia de escenarios del Informe Especial sobre escenarios de emisiones del IPCC

B2 - Familia de escenarios del Informe Especial sobre escenarios de emisiones del IPCC

BHU - Banco Hipotecario del Uruguay

CC - Cambio climático

CCS – Código de Construcción Sustentable

Cfa - Clima templado húmedo (clasificación climática de Köppen)

Csb - Clima mediterráneo oceánico (clasificación climática de Köppen)

Csa- Clima mediterráneo típico (clasificación climática de Köppen)

CEN - Comité Europeo de Normalización

CLO – Unidad de medida empleada para el Índice de indumento

CMNUCC - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CO₂ – Dióxido de Carbono

COP – Coeficiente de Rendimiento

CV(RMSE) - Coeficiente de Variación de la Raíz cuadrada del Error Cuadrático Medio

DINAVI – Dirección Nacional de Vivienda

DOE – Departamento de Energía de los Estados Unidos

DVH – Doble Vidriado Hermético

EIFs- Sistemas de aislación térmica exterior

EGIH - Encuesta de Gastos e Ingresos de Hogares

EN - Normas Europeas

EPS- Poliestireno expandido

epw - Archivos climáticos Energyplus

GEI - Gases de Efecto Invernadero

HVAC – Sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado

INUMET - Instituto Uruguayo de Meteorología

IM - Intendencia de Montevideo
IPCC - Panel Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático
MBE - Desviación Media del Error
Mets - Unidad de medida de tasa metabólica
MIEM - Ministerio de Energía y Minería
MIDES – Ministerio de Desarrollo Social
MVOTMA – Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
Nch - Normas Chilenas
nZEB - Edificio de consumo de energía casi nulo
ONU- Organización de las Naciones Unidas
PMV - Voto Medio Previsto
PPD - Porcentaje de Insatisfechos
PVC - Policloruro de Vinilo
REAHVI - Red de Asentamientos Humanos, Hábitat y Vivienda
RCP - Trayectorias de Concentración Representativas
SSP - Trayectorias Socioeconómicas Compartidas
SRES - Escenarios de Emisiones
TMY - Año Meteorológico Típico
UNIT – Instituto Uruguayo de Normas Técnicas

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

El consenso internacional sobre la situación que se atraviesa de cambio climático (CC) y su vinculación directa con los niveles de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidos por las actividades antropogénicas, ha concentrado esfuerzos en las últimas décadas en orientar el desarrollo mundial hacia un modelo más sostenible, a la vez que ha alertado sobre cómo afectarán las futuras condiciones climáticas a los seres humanos y ecosistemas.

A nivel global el sector edificatorio ha sido reconocido como una de las principales fuentes de demanda energética y en consecuencia de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), estando parte de esta asociada al consumo de energía en acondicionamiento térmico para satisfacer las condiciones de habitabilidad al interior de los espacios. Debido a esto, se desarrollaron en distintos países un conjunto de normativas que apuntan a reducir las necesidades de energía para calefacción y refrigeración optimizando la envolvente e integrando técnicas de acondicionamiento térmico pasivas, así como, a mejorar la eficiencia energética de los sistemas activos e incorporar energías renovables (OECD/IEA 2008).

Uruguay al igual que otros países, impulsados por políticas y acuerdos de cooperación internacional, inició una línea fuerte en diversificación de la matriz energética, ahorro y uso eficiente de la energía. Alcanzando en 2017 una matriz energética para generación de energía eléctrica con un 98% de fuentes de origen renovable (MIEM 2018).

En lo que respecta al sector residencial, enmarcado en los acuerdos asumidos en el protocolo de Kyoto (ONU 1998), desde 2009 se cuenta con reglamentación sobre el desempeño térmico de la envolvente de la Intendencia de Montevideo (IM) para vivienda nueva, la cual presenta exigencias de tipo prescriptivo específicamente para transmitancia de muros, techos y cerramientos vidriados, factor de huecos por fachada, y uso de protecciones solares (IM 2009). Por su parte, las políticas de vivienda pública presentan exigencias de desempeño térmico en programas específicos, desde 1999 en las viviendas promovidas por el Banco Hipotecario del Uruguay (BHU) y, desde 2011 para la construcción de viviendas con sistemas constructivos no tradicionales (DINAVI / MVOTMA 2011).

Hasta el momento no se establecen requerimientos obligatorios para remodelaciones o intervenciones en vivienda existente. Recientemente durante el 2017 se inició un programa piloto de mejoras energéticas de la envolvente de carácter voluntario, el cuál toma como base el nivel de exigencia que considera la normativa antes mencionada de Montevideo, pero sin establecer criterios de reducción de demanda de energía (IM y MIEM 2017).

Un punto relevante en este sentido es que el parque habitacional de Uruguay se caracteriza por ser antiguo con solo un 7,0 % de viviendas nuevas menores a 10 años (MIEM 2013). Al ser en su mayoría viviendas antiguas, anteriores a la entrada en vigencia de la reglamentación de la IM, se identifica que un importante porcentaje del parque edificado no cumple con las exigencias normativas vigentes, lo cual repercute directamente en la demanda energética asociada al acondicionamiento térmico y como consecuencia, en las condiciones de habitabilidad y en la posibilidad del usuario de asumir el costo económico que le permita acceder a la energía para mantener condiciones de confort al interior de la vivienda (Triana, Lamberts y Sassi 2018).

En lo que refiere a la demanda de energía en el sector residencial, a nivel nacional se efectuaron programas que apuntan a la incorporación de Energía Solar Térmica para Agua Caliente Sanitaria (ACS) y la promoción de electrodomésticos de calidad certificada, enfocándose directamente en el uso eficiente de energía al interior de la vivienda y particularmente en el consumo de energía para ACS, la cual representa un 37% promedio del consumo de energía eléctrica (DNE/MIEM 2014).

Más reciente en el tiempo se implementan nuevas políticas nacionales para continuar dando respuesta a la reducción de emisiones de CO₂ y por otra parte, para abordar el fenómeno del cambio climático. Se resaltan en ese aspecto y en consonancia con el enfoque de esta investigación el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2014-2024 que considera dentro de sus objetivos *“evaluar medidas de mejora de la eficiencia energética en edificaciones determinando el costo incremental de su exigencia y los beneficios asociados en a la reducción de demanda de energía para acondicionamiento térmico”* (DNE/MIEM 2015); y la Política Nacional de Cambio Climático la cual propone trabajar sobre estrategias de mitigación y adaptación con una línea específica destinada a las ciudades, Plan Nacional de Adaptación en ciudades e infraestructura, con el objetivo de profundizar el estudio sobre los efectos del cambio climático en las mismas (PNUD 2018).

En general, los estudios energéticos en las edificaciones, a nivel local y mundial, se han enfocado desde la óptica del consumo de energía en la línea de las políticas antes mencionadas; sin embargo,

se identifican que las mejoras energéticas también generan impactos positivos sobre las condiciones de habitabilidad de las viviendas y el bienestar de los usuarios, sobre todo en aquellos casos donde las condiciones de confort son deficientes producto de las dificultades económicas de acceso a la energía (García de Diego, Gómez Muñoz y Román López 2015). En esta misma línea se pone en discusión el uso del indicador de demanda de energía para determinar el desempeño de viviendas que no utilizan sistemas de calefacción o refrigeración o lo hacen únicamente en condiciones climáticas extremas, identificando que el porcentaje de tiempo en que las viviendas pueden funcionar en oscilación libre dentro de los rangos de confort, es un indicador más preciso en estos casos (Pérez-Fargallo, Pulido-Arcas, et al. 2018; Rubio-Bellido et al. 2017).

Este aspecto adquiere relevancia en el contexto nacional donde se identifica que parte del sector residencial continúa sin satisfacer los requerimientos de confort térmico de sus ocupantes (GIEE 2016), a la vez que utiliza energías contaminantes para mejorar las condiciones térmicas en el período frío, comprometiendo la salud de sus ocupantes y produciendo importantes problemas de contaminación. Según la Encuesta Continua de Hogares de 2013 (MIEM 2013), a nivel país el 54% de los hogares usan estufa a leña y el 42,0 % estufa a gas licuado para calefacción y, de acuerdo a Laureiro (2018) solo un 24,0 % de los hogares del país utilizan la energía eléctrica como principal fuente para calefacción, independientemente de la disponibilidad de energías limpias en el país. Respecto a la ventilación y refrigeración, la energía utilizada es eléctrica por uso de ventiladores y equipos de aire acondicionado.

La atención a estos indicadores desplaza el foco de la mirada macro concentrada en los aspectos energéticos-ambientales para ubicarlo en la escala de los espacios habitables y sus usuarios.

En otro orden, frente a las condiciones de cambio climático un aspecto relevante a considerar son las condiciones del clima, factor determinante del desempeño térmico y energético de las viviendas; usualmente los estudios en desempeño energético de edificaciones se realizaron utilizando datos climatológicos históricos, lo cual repercute en soluciones que difícilmente se adapten a la intensidad de los cambios climáticos que el edificio va a enfrentar durante su vida útil (Pérez-Andreu et al. 2018). Esto ha llevado a que en los últimos años a nivel mundial se desarrollen múltiples investigaciones que incorporan proyecciones climáticas, sin embargo, las aplicadas a la edificación en el contexto nacional son limitadas. Por citar algunos estudios internacionales Andrić, Koc y Al-

Ghamdi (2019), Barbosa, Vicente y Santos (2015), Van Hooff et al. (2014), Rubio-Bellido, Pérez-Fargallo y Pulido-Arcas (2016), Santamouris (2016).

En esta línea, existe un antecedente nacional que estudia la incidencia de escenarios de cambio climático en estrategias de diseño para una nueva tipología de vivienda colectiva en altura, bajo un análisis de demanda de energía, concluyendo que las estrategias de diseño más adecuadas deberán responder tanto al período caluroso (protecciones solares en cerramientos vidriados, sombreado y ventilación natural), como al frío (baja transmitancia térmica de la envolvente y control de infiltraciones), siendo fundamental el manejo de los flujos de energía en el tiempo, debido al aumento de eventos extremos (López y Picción 2016).

El vacío normativo existente para intervenciones sobre el parque habitacional construido y, por otro lado, las políticas nacionales de eficiencia energética y cambio climático, plantean un escenario propicio para indagar el potencial que tiene implementar mejoras energéticas sobre las viviendas existentes en el confort de los usuarios y en la reducción de la demanda de energía, integrando en el análisis las condiciones climáticas proyectadas a las que se verán expuestas las viviendas durante su uso.

1.2 Hipótesis

Las viviendas existentes en Montevideo (Uruguay) presentan un potencial para incorporar mejoras energéticas que permitan incrementar el tiempo en confort en un 20% en oscilación libre o, reducir la demanda energética en un 40% con el uso de sistemas activos; considerando las variaciones proyectadas en el clima que experimentará la vivienda en uso, durante el período 2020-2050.

1.3 Objetivo general

Establecer medidas de mejoramiento energético aplicables a viviendas existentes en Montevideo (Uruguay) para evaluar su impacto en la demanda energética y en el confort térmico, bajo el modelo de confort térmico adaptativo, considerando su desempeño en el período 2020-2050, en los escenarios de cambio climático A2 y B1.

1.4 Objetivos específicos

1. Analizar la aplicación de modelos de confort térmico adaptativo en el clima actual y en escenarios climáticos futuros en Montevideo.
2. Determinar la línea base de desempeño térmico y energético representativa identificando un caso característico de vivienda social existente.
3. Identificar medidas de mejoramiento que incrementen el desempeño térmico-energético actual y futuro de la vivienda considerando parámetros de normativas nacionales e internacionales.
4. Evaluar el desempeño térmico y energético de las medidas de mejoramiento considerando las proyecciones de cambio climático en los escenarios A2 y B1 para el período de uso de la vivienda 2020-2050.

2.1.3 Reglamentación térmica

En Uruguay en el año 1999 se registra un antecedente importante para la reglamentación térmica en viviendas, marcado por la incorporación de requisitos de desempeño térmico en el programa de viviendas del BHU. A partir de esa fecha los pliegos de condiciones de las licitaciones, pasan a indicar una exigencia de transmitancia térmica máxima en muros y cubiertas de $0,85\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, con igual exigencia para todo el país (BHU 2000).

Más reciente en el tiempo, a partir de 2011, se incorporan nuevos estándares y requerimientos para la vivienda de interés social construida con financiación del estado; en ellos se establece como exigencia dos niveles de transmitancia térmica para muros y cubiertas (Tabla 2-1) y se toman los criterios establecidos en la normativa departamental de Montevideo (se detalla a continuación en el texto) para áreas de iluminación y ventilación, y para cerramientos vidriados según Tabla 2-2. Esta reglamentación incorpora además la exigencia de eliminar el riesgo de condensación superficial e intersticial en cerramientos opacos e informar el factor de forma del proyecto, aunque no establece un nivel de exigencia admisible (DINAVI / MVOTMA 2011).

Tabla 2-1. Valores máximos de transmitancia para cerramientos exteriores. Según Dirección Nacional de Vivienda (DINAVI / MVOTMA 2011)

Transmitancia térmica U ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	Nivel 1	Nivel 2
Muros exteriores	< 1,6	< 0,85
Cubiertas	< 1	< 0,85

Específicamente para la ciudad de Montevideo, existe una reglamentación general sobre el desempeño térmico en viviendas desde 2009 (IM 2009), la cual tiene como origen los acuerdos asumidos a nivel país en el marco del protocolo de Kyoto (ONU 1998). Dicha reglamentación se aplica únicamente a vivienda nueva, sin involucrar reformas de edificación existente.

La reglamentación fija como exigencia $0,85\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ como transmitancia máxima de muros y techos; la transmitancia admisible en cerramientos vidriados se establece en función de la orientación y porcentaje de huecos en fachada, según se resume en la Tabla 2-2, donde además se indica la exigencia del uso de protecciones solares (factor solar entre 0,05 y 0,3) en las orientaciones norte, este y oeste para viviendas con factor de huecos mayores a 25%. La reglamentación limita además

el factor de huecos máximo por fachada en un 60 %, permitiendo un máximo de dos fachadas que superen dicho porcentaje (IM 2009).

Tabla 2-2. Requerimientos para cerramientos vidriados. Según Digesto Municipal (IM 2009)

Factor de Huecos	Transmitancia hueco máxima admisible (W/m ² K)				Protección solar			
	Orientación preponderante				Orientación preponderante			
	N	E	O	S	N	E	O	S
0 a25%	Vidrio simple				opcional			
>25 hasta 60%	Vidrio simple		2,8 DVH		Si	Si	Si	opcional

Los requerimientos mínimos de iluminación y ventilación están establecidos en relación a las áreas de superficie de los locales, siendo requisito para espacios habitables (estar y dormitorios) un área de iluminación mayor o igual a 1/10 del área de piso con el requerimiento de que la abertura sea móvil en un 50,0 % para permitir la ventilación. Para baños se exige un área mínima de ventilación directa de 0,20 m² o ventilación por ducto y en cocinas un mínimo de 0,40 m² (IM 1972).

Es preciso puntualizar que la normativa vigente no aplica requerimientos de caudales mínimos de ventilación, ni nivel de infiltración de la vivienda o sus componentes.

En relación a la información presentada de las características del parque habitacional, se puede advertir que, debido a la antigüedad del parque habitacional existente, en su mayoría son construcciones anteriores a la entrada en vigencia de la reglamentación térmica del año 2009. Vale puntualizar en este aspecto, que los datos que se presentan en la EGIH son previos a 2009 y que hasta el 2006, fecha de la encuesta, la única exigencia térmica existente era para un programa específico de viviendas, BHU.

2.2 Cambio Climático

El concepto de cambio climático (CC) es definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC por sus siglas en inglés) como *“cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”* (ONU 1992), dejando explícita la diferencia entre el CC que atribuye a las actividades humanas las alteraciones en la composición atmosférica y la variabilidad climática que las atribuye a causas naturales.

A partir de 1988 se establece el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con el fin de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático y sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas.

El IPCC a través de sus sucesivos informes ha demostrado el aumento de la concentración de GEI en la atmósfera y su consecuencia en el aumento del calentamiento global en el último siglo, atribuyendo las causas principalmente a los procesos de crecimiento demográfico y económico basados en la quema de combustibles fósiles y modificación de los usos del suelo.

A su vez, ha estudiado los impactos que éste genera sobre los ecosistemas naturales y humanos. En consecuencia, se evidencian cambios en los patrones climáticos con aumentos de la temperatura atmosférica y oceánica, cambios en la salinidad y acidificación del océano, frecuencia e intensidad de las precipitaciones, decrecimiento de los mantos de hielo, aumento en el nivel del mar y modificaciones en los patrones de eventos climáticos extremos (IPCC 2014).

Si bien ha habido posturas que avalan y cuestionan la incidencia de la acción antropogénica sobre las causas que producen el CC, el IPCC en su 4to informe presenta una modelación de las anomalías en la temperatura de la tierra contrastando datos observados con modelos, donde se evidencia que los modelos que incorporan factores naturales y humanos representan mejor las condiciones registradas que aquella que solo considera los forzantes naturales (ver Figura 2-8) y, en su 5to informe de evaluación afirma que *“la influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia. El*

cambio climático ha tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales” (IPCC 2014). A su vez afirman que las estrategias de mitigación serán las que permitan limitar el calentamiento de la temperatura global por debajo de los 2°C a finales de siglo en relación a los niveles preindustriales pero que para ello advierten que “se requerirán de reducciones notables de las emisiones durante los próximos decenios y emisiones próximas a cero de CO₂ y otros gases de efecto invernadero de larga vida para finales de siglo” (IPCC 2014)

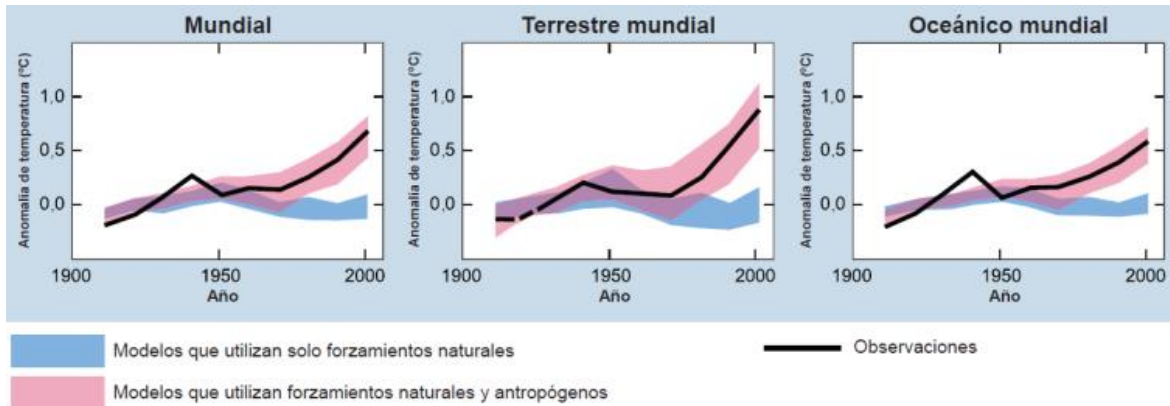


Figura 2-8. Cambios observados de la temperatura superficial a escala mundial, comparados con los resultados simulados mediante modelos del clima que contemplan forzamientos naturales o forzamientos naturales y antropógenos. Fuente: IPCC (2007)

Desde esta posición de consenso científico internacional se han generado a escala global acuerdos y compromisos para abordar el CC y reducir las emisiones de GEI, siendo los principales el Protocolo de Kyoto (ONU 1998), el acuerdo de Paris (ONU 2015) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU 2014). En ellos se plantean dos grandes líneas para abordar el tema: desde la mitigación, es decir acciones para reducir y limitar las emisiones de GEI, así como, iniciativas para reducir su presencia en la atmósfera, las cuales están principalmente vinculadas a la reducción de energías de origen fósil, disminución de procesos contaminantes y generación de sumideros de carbono; y desde la adaptación a las actuales y futuras consecuencias de las condiciones climáticas previstas, de forma de reducir las vulnerabilidades e impactos negativos que estos cambios puedan generar sobre los seres humanos y los ecosistemas.

2.2.1 Escenarios proyectados de CC

Con el objetivo de analizar las posibles consecuencias del CC, la comunidad científica ha desarrollado escenarios globales futuros proyectando posibles trayectorias de las distintas fuerzas motoras de las emisiones de GEI, planteando estos escenarios como alternativas posibles de cómo evolucionará el mundo, sin asociación de probabilidades (Castillo, Peña y Delgado 2017).

El IPCC ha ido presentando los mismos a través de sus informes. Hasta el 4to informe los Escenarios de Emisiones denominados (SRES por sus siglas en inglés), se agruparon en cuatro familias - A1, A2, B1, B2- representando cada una diferentes perspectivas de evolución demográfica, socio-económica y tecnológica y su consecuente proyección de emisiones y concentración de GEI. Dentro de estos escenarios no se contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendientes a mitigar las emisiones.

En el 5to informe se definieron nuevos escenarios de emisiones denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés) basados en una descripción cuantitativa de las concentraciones de contaminantes y su forzamiento radiactivo proyectadas para el 2100, sin considerar las condiciones socioeconómicas que condujeron a dicho estado. A diferencia de los SRES, algunos RCP contemplan en su trayectoria los efectos de las políticas orientadas a mitigar el CC que se ya se han implementado y futuras previstas (Quante y Bjørnæs 2016).

Para su 6to informe que saldrá en 2021, se ha definido una nueva familia de escenarios Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés), según Castillo et al (2017) se describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico y representan, a partir de una narrativa y de variables cuantitativas, cómo podría evolucionar el mundo en las décadas siguientes y qué desafíos suponen esos cambios para la mitigación y la adaptación. Estos escenarios asumen la ausencia de efectos del cambio climático, incorporándolos como elementos “externos”.

En la Tabla 2-3, en la Tabla 2-4 y en la Tabla 2-5 se presentan sus principales características y en la Figura 2-9 la relación establecida entre modelos.

Tabla 2-3. Características de escenarios SRES. Adaptado de Quante y Bjørnæs (2016)

Escenario	Descripción
A1	Crecimiento económico mundial muy rápido, alcanzando la población mundial máxima hacia mediados de siglo, rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B)
A2	Mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento.
B1	Escenario con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.
B2	Mundo con población y crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental

Tabla 2-4. Características de escenarios RCP. Adaptado de Quante y Bjørnæs (2016)

Escenario	Descripción
8.5	Alcanza más de $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ de forzamiento radiativo para 2100 y continúa aumentando a partir de entonces. Refleja un futuro sin cambios en las políticas para reducir las emisiones y se caracteriza por el aumento de las mismas
6.0	Escenario intermedio que se estabiliza a 6.0 Wm^{-2} de forzamiento radiativo después de 2100 mediante la aplicación de una gama de tecnologías y estrategias de mitigación de GEI
4.5	Escenario intermedio en que el forzamiento radiativo se estabiliza en 4.5 Wm^{-2} después de 2100 a través de reducciones de emisiones relativamente ambiciosas
2.6	Escenario de mitigación estricto, alcanza un máximo de 3 Wm^{-2} antes de 2030 y luego disminuye a 2.6 Wm^{-2} para 2100. Representa el objetivo de mantener el calentamiento global a menos de $2 \text{ }^\circ\text{C}$ por encima de las temperaturas preindustriales

Tabla 2-5. Características de escenarios SSP. Elaborado en base a (O'Neill et al. 2016)

Escenario	Descripción
1	Proyección optimista para el desarrollo humano, con inversiones sustanciales en educación y salud, rápido crecimiento económico e instituciones que funcionen bien con un cambio creciente hacia prácticas sostenibles
2	Vía central en la cual las tendencias continúan sus patrones históricos sin desviaciones sustanciales
3	Tendencia de desarrollo más pesimistas, con poca inversión en educación o salud, población en rápido crecimiento y desigualdades crecientes. Representa un escenario vulnerable al cambio climático con países que priorizan la seguridad regional.
4	Proyección de desarrollo ídem. SSP3. Escenario vulnerable al cambio climático donde predominan las grandes desigualdades dentro y entre los países
5	Proyección de desarrollo ídem. SSP1 con economía basada en combustibles fósiles.

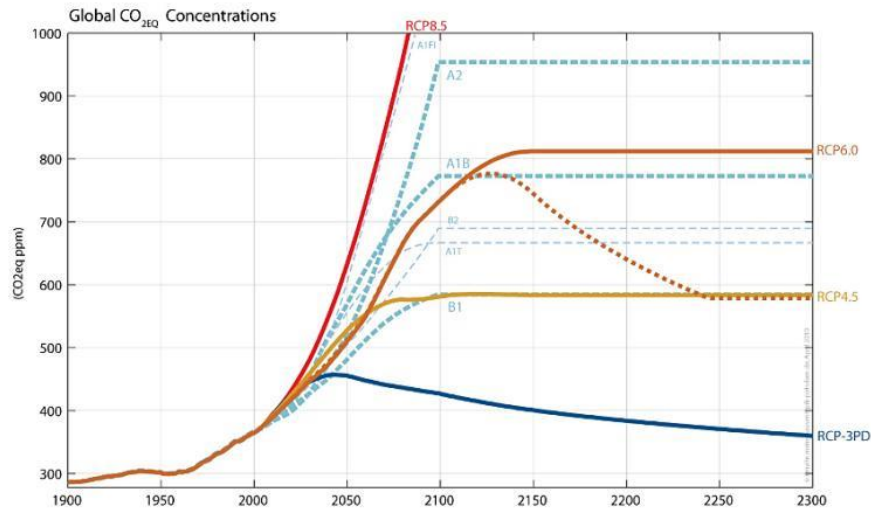


Figura 2-9. Comparación entre concentraciones de CO₂ proyectadas en los escenarios RCP y SRES.
Fuente: (IPCC, 2010)

2.2.2 Proyecciones de cambio climático para el clima local

Las proyecciones climáticas para escenarios futuros que se presentan a continuación, pertenecen a una reducción a escala nacional realizada por Bentancur y Molinari (2019), quienes proyectan en base a escenarios RCP 4.5 y 8.5 para el período 2010-2070 una evolución creciente de las precipitaciones y las temperaturas mínimas y máximas, independiente del escenario, período o temporada del año, aunque con diferencia de magnitud.

En el mismo informe se indica, que las temperaturas anuales para el período 2010-2040 aumentarían entre 0,6°C y 1,3°C y entre 0,8°C a 1,3°C para RCP 4.5 y 8.5 respectivamente, mientras que para el 2040-2070 las diferencias entre escenarios se incrementarían entre 1,3°C y 2,2°C para RCP 4.5 y entre 2.0°C a 2.7°C para RCP 8.5. Mientras las temperaturas máximas y mínimas presentarían mayor variación en la temporada fría, las precipitaciones tendrían un mayor aumento en la temporada cálida. Por otra parte, se proyecta que la amplitud térmica de la temporada cálida se mantendrá y en la temporada fría aumentará por un mayor crecimiento de la temperatura máxima respecto a la mínima.

En relación a los eventos extremos, se indica que se observa una reducción de las heladas y un aumento en las frecuencias de olas de calor, y proyectan además un aumento de las precipitaciones de más de 20mm para la zona sur del país.

2.2.3 Cambio Climático y edificación

La relación entre CC y la edificación plantea la doble condición de que las edificaciones a lo largo de su ciclo de vida son consumidoras de energía y, por tanto, fuentes de emisiones de GEI, y a la vez, su desempeño energético está condicionado por el clima al que están expuestas, en consecuencia, serán afectadas directamente por el cambio en las condiciones climáticas (De Wilde y Coley 2012). Esta doble condición orientó el abordaje del tema en las edificaciones en las dos líneas antes mencionadas: mitigación y adaptación.

La mitigación se centró inicialmente en la reducción de la demanda de energía en el uso del edificio, en una etapa más reciente se incorpora como meta reducir la huella de carbono del edificio durante el ciclo de vida del mismo (Skullestad, Bohne y Lohne 2016). Dentro de esta línea también se desarrolló la eficiencia de los sistemas activos que utilizan las edificaciones, la sustitución del consumo de energías fósiles por renovables y la producción de energía en sitio, llevando a desarrollar los conceptos de edificios de energía nula o casi nula (*net* ZEB o *nearly* ZEB por sus siglas en inglés) (Cellura et al. 2014).

Esta línea ha sido plasmada en las principales normativas y reglamentaciones internacionales de edificación (Parlamento Europeo 2012b; 2012a) y también en la normativa nacional existente (IM 2009), donde los niveles exigibles a las edificaciones (transmitancia, ventilación e infiltración, entre otros) son establecidos con el objetivo de reducir el consumo de energía para acondicionamiento térmico y como consecuencia disminuir las emisiones de CO₂ (Rubio-Bellido et al. 2017)

Las medidas de adaptación se enfocan en la capacidad que deberán tener las edificaciones para atender a las condiciones proyectadas en el clima futuro.

Se proyecta que en las zonas urbanas aumenten los riesgos derivados del estrés térmico, las tormentas y precipitaciones extremas, vientos fuertes, inundaciones continentales y costeras, deslizamientos de tierra, contaminación del aire, sequías y escasez de agua (IPCC 2014), siendo las edificaciones vulnerables a los daños causados por el aumento en la frecuencia e intensidad de estos fenómenos, con efectos directos sobre sus ocupantes como el discomfort, mortalidad, daños y enfermedades y sobre la integridad de las edificaciones (De Wilde y Coley 2012; Santamouris 2016), por tanto, las edificaciones requerirán desde su diseño y construcción garantizar las condiciones de habitabilidad frente a las proyecciones climáticas futuras.

Son variadas las investigaciones que exploran la incidencia del CC en las edificaciones, en lo que refiere al desempeño térmico y energético específicamente se proyecta un cambio en los patrones de consumo de energía en el sector edilicio con un desplazamiento de las cargas de calefacción a las cargas de refrigeración debido al aumento gradual de temperatura. Siendo en la actualidad, la electricidad la principal forma de energía utilizada en refrigeración, mientras que los combustibles fósiles se utilizan para la calefacción; el impacto sobre las emisiones de GEI estará condicionada a la matriz de producción de energía (Yang, Yan y Lam 2014).

Por otra parte, el aumento de la temperatura en los espacios interiores y las condiciones de olas de calor incrementaran los *peak* de demanda, requiriendo de la infraestructura necesaria para cubrirlos. Esta combinación (aumento de la temperatura y aumento en la frecuencia de olas de calor) proyectan en las ciudades los efectos de islas de calor, repercutiendo además de en el consumo de energía mencionado en el aumento en las concentraciones de contaminantes y el deterioro de las condiciones de confort térmico tanto exterior como interior con un incremento de mortalidad y riesgo para las poblaciones vulnerables (Santamouris 2016).

En este contexto, las edificaciones deberían orientarse a mantener las condiciones saludables y de confort interior sin un uso excesivo de energía (Van Hooff et al. 2016). La aplicación de medidas pasivas sobre los edificios constituye una medida tanto de adaptación como de mitigación puesto que generan un efecto positivo sobre las condiciones térmicas y a la vez reducen la demanda de energía para climatización.

2.3 Mejoramiento energético de viviendas existentes

Las mejoras energéticas del parque habitacional construido, plantean hoy en día diversos objetivos. Los principales, alineados con los objetivos de mitigación, se enfocan en mejorar el desempeño energético de las viviendas como forma efectiva de reducir el consumo de energía y en consecuencia las emisiones de CO₂ asociadas en el sector edilicio (Ballarini, Corgnati y Corrado 2014). Otros autores, también incluyendo la perspectiva del CC, hacen foco en el aspecto de adaptación con el objetivo de que las mejoras en las viviendas existentes garanticen condiciones de confort térmico a sus ocupantes en condiciones de clima futuro y no aumente su demanda de energía (Van Hooff et al. 2014).

Adicionalmente a estos objetivos principales, en la literatura se reconocen otros motivos que subyacen a los vinculados a las políticas energéticas. Desde la lógica del mercado, las políticas de mejoramiento de vivienda existente, ayudan a incentivar el desarrollo de nuevos productos, generación de nuevos empleos, y creación de un mercado inmobiliario específico (Figus et al. 2017). Desde las condiciones ambientales *“el mayor beneficio no se manifiesta en ahorro económico, sino que en lograr: (i) confort térmico, (ii) calidad del aire interior y (iii) debido a la reducción de patologías, una extensión de la vida útil de la vivienda”* (Wegertseder 2014). Otros autores aportan la mirada patrimonial, por la contribución que estas políticas traen a la conservación de los edificios tradicionales existentes en sectores con infraestructura, así como la puesta en valor de edificios patrimoniales (Webb 2017).

Dentro de los objetivos múltiples que puede tener el mejoramiento energético de viviendas existentes y en relación a las condiciones que se pueden generar a consecuencia de los escenarios proyectados de CC, vale la pena destacar el enfoque que plantean algunos autores en relación al aporte que estas nuevas condiciones pueden contribuir a reducir las situaciones de pobreza energética (Escandón et al. 2019; Filippín et al. 2017; Santamouris 2016).

2.3.1 Tipos de mejoramiento energético

Las mencionadas políticas energéticas en el sector edilicio, incluido el residencial, se desarrollan en base a dos tipos de medidas: activas y pasivas, tanto para obra nueva como para rehabilitación.

Las estrategias activas apuntan directamente a la eficiencia energética y a la sustitución del uso de energía de origen fósil por energías renovables en los equipamientos e instalaciones que requiere un edificio para su uso.

Las estrategias pasivas, por su parte, tienen el objetivo de aprovechar las condiciones climáticas para alcanzar las condiciones de confort en el espacio interior. Éstas se basan principalmente en estrategias de captación, almacenamiento y distribución del calor para el período frío y en evitar las ganancias solares y disipación de calor para el período caluroso.

Mientras que para nuevos edificios es posible considerar estrategias pasivas desde la implantación del proyecto y su configuración morfológica y espacial, para edificios existentes, se parte de ciertas condicionantes establecidas como son la configuración formal, orientación y relación con el entorno.

Andrić, Koc, & Al-Ghamdi, (2019) establece una clasificación de medidas de renovación energética en viviendas e identifica dentro de las medidas pasivas el incremento de aislación térmica, la mejora de la hermeticidad de la envolvente, la incorporación de vidrios eficientes, el uso de protecciones solares móviles y fijas, la incorporación de techos y paredes vegetales, la ventilación natural y la nocturna, y la reflectividad y absorptividad de las superficies (Ver Tabla 2-6). Es decir, las mejoras se centran principalmente en los flujos de energía entre el espacio interior y exterior que se producen de manera natural o intencionada, a través de la envolvente, ya sea por sus partes opacas, transparentes o huecos.

Adicionalmente a las medidas pasivas y activas estos autores establecen una categoría que denomina “medidas adicionales” las cuales involucran la masa térmica, la relación entre vidriado y superficie opaca de la envolvente y las temperaturas de consigna para confort. Las cuales, en opinión de los autores, involucran en los primeros casos modificaciones en la estructura del edificio, mientras que las temperaturas de consigna (para la activación de sistemas complementarios) dependen del comportamiento de los usuarios.

En estas “medidas adicionales” cabría incluir medidas que modifican las condiciones del espacio interior y repercuten en el desempeño energético como, por ejemplo, la redistribución de los espacios interiores o la modificación del volumen interior, implicando estas medidas, en general, intervenciones de mayor magnitud.

Tabla 2-6. Clasificación de medidas de renovación energética de viviendas. Adaptado de Andrić, Koc y Al-Ghamdi (2019)

Tipos		Descripción
Medidas convencionales	Medidas pasivas	Incremento de aislación térmica
		Hermeticidad de la envolvente
		Vidrios eficientes
		Protecciones solares fijas
		Techos y paredes vegetales
		Reflectividad y absortividad de las superficies
	Operacionales	Ventilación natural y nocturna
		Uso de protecciones solares móviles
	Medidas activas	Paneles solares (fotovoltaicos y colectores solares)
		Intercambiadores de calor
		Calefacción/refrigeración distrital
		Eficiencia energética iluminación
		Eficiencia energética equipamiento
		Sistemas de control remoto
Medidas adicionales	Masa térmica	
	Relación área vidriado-superficie opaca de la envolvente	
	Temperaturas de consigna para confort	
	Redistribución de espacios interiores	
	Modificación del volumen interior	

Una subcategoría que se puede identificar en la línea de lo que presentan Escandón et al. (2019) y Van Hooff et al. (2014), es la de “parámetros operacionales” a los cuales le correspondería para las medidas presentadas las protecciones solares móviles y la ventilación natural y nocturna. La efectividad de estas medidas, por tanto, queda determinada por el uso que le den los habitantes. Estos autores subrayan la importancia que estos parámetros operacionales tienen en generar las condiciones de confort térmico para las condiciones de clima actual y para escenarios futuros en edificios naturalmente ventilados.

En lo que respecta a las medidas pasivas convencionales, la aislación térmica de la envolvente ha sido una de las principales estrategias de mejoramiento energético aplicadas, promovida en las últimas décadas por las diferentes normativas internacionales (Van Hooff et al. 2014). Esto debido a que la envolvente desempeña un rol principal en el intercambio con el clima exterior y que

el uso de envolventes más aisladas ha demostrado reducciones importantes de la demanda de energía para climatización (Carpio et al. 2014) .

Sin embargo, Van Hooff et al. (2014), advierten que los hechos ocurridos en Europa frente a la ola de calor de 2003 y las sucedidas posteriormente, que se prevén con mayor ocurrencia y severidad en condiciones de clima futuro, plantean la discusión de la efectividad de esta estrategia debido a las consecuencias indeseadas en el sobrecalentamiento al interior de los espacios; esto debido a que con ganancias solares por cerramientos transparentes o ganancias por ocupación y bajas transmitancias térmicas a través de la envolvente, las transferencias de calor a través de la misma son limitadas incrementando así la temperatura interior en los días cálidos.

Otros autores, por el contrario, cuestionan que los problemas sobrecalentamiento presentados sean a consecuencia únicamente del aumento en la aislación térmica. En un estudio que combina múltiples variables (latitud, clima, aislación, masa térmica, porcentaje de vidriado, sombreadamiento, ocupación, infiltración, ventilación, orientación, modelos de confort) concluyen que todos los parámetros que estudian tienen incidencia en el sobrecalentamiento, y que la aislación impacta tanto en el aumento como en el descenso del sobrecalentamiento dependiendo de la influencia de otros parámetros, reconociendo que los mejores niveles de aislamiento junto con la ventilación de los espacios, tienden a reducir la duración del sobrecalentamiento al igual que la severidad de las temperaturas (Fosas et al. 2018).

Un tercer aspecto vinculado a la incidencia de la aislación y el sobrecalentamiento es la relación entre ésta y la masa térmica, Van Hooff et al. (2014) recopila un conjunto de investigaciones que identifican que la aislación puede ser beneficiosa para reducir el riesgo de sobrecalentamiento siempre que no esté colocada del lado interior del muro. Esto se debe a que la masa térmica tiene una contribución a la regulación de las fluctuaciones de temperatura del aire interior.

Las investigaciones mencionadas consideran edificios naturalmente ventilados, por tanto, el indicador está enfocado en el confort térmico de los usuarios. Cuando se estudia la mejora en la transmitancia térmica de la envolvente para las condiciones climáticas futuras en relación a la demanda de energía para climatización, como recopila Andrić, Koc, & Al-Ghamdi, (2019), para diversos climas se constata una disminución tanto de la demanda energética para refrigeración como para calefacción, por el incremento de la aislación.

Por otra parte, se debe reconocer la contribución sobre las condiciones higrotérmicas que genera la mejora de la transmitancia térmica de los cerramientos, debido a que la incorporación de aislante del lado exterior, aumenta la temperatura del cerramiento reduciendo el riesgo de ocurrencia de condensación en el período frío, y como consecuencia la aparición de hongos (Chauvie y Picción 2005).

Dentro de la envolvente, las ventanas se han convertido en un elemento clave en la rehabilitación energética (Rodríguez-Jiménez, Carretero-Ayuso y Claro-Ponce 2018). Si bien en las viviendas representan un porcentaje menor en relación a los cerramientos opacos - muros, cubierta y pisos-, tal como señalan los mismos autores su mejoramiento repercute tanto en la reducción de la transmitancia del hueco, como en la disminución de los niveles de infiltraciones. Adicionalmente a esto, es a través de las ventanas por donde se producen ganancias térmicas por radiación solar de onda corta, las cuales para un clima como el de Montevideo, son deseables en el período frío pero no lo son para el período caluroso, por tanto asociado a las ventanas los elementos de sombreado pasan a tener un rol importante. Por último, un aspecto más vinculado a las ventanas, es la capacidad que estas tienen para permitir la ventilación natural, y de esta forma en términos energéticos disipar el calor al interior de la vivienda.

En otro orden, la mejora de la envolvente en su conjunto implica un incremento en los niveles de hermeticidad de la vivienda, ya que al sustituir elementos como ventanas y puertas o agregar una capa de aislación a la envolvente opaca se incide en la reducción de grietas y fisuras por las que se producen las infiltraciones.

Tal como indica Bobadilla et al.(2014) , para climas donde se requiera calefacción, las infiltraciones pueden representar una importante reducción en la demanda energética, dependiendo la magnitud de las características del clima y de la construcción. Sin embargo, la reducción de los niveles de infiltraciones trae a consecuencia la reducción en la renovación de aire al interior de la vivienda, con lo cual resulta en detrimento de la calidad del aire interior (D'Ambrosio Alfano et al. 2016) si no están garantizados los niveles de ventilación higiénica, ya sea por ventilación mecánica o apertura de ventanas para tal fin por parte de los usuarios.

A modo de resumen, en una escala más general el mejoramiento de la envolvente tiene mayores implicancias *“hay que ir más allá de las consideraciones energéticas y considerar que las reparaciones en la envolvente implican también renovación de la impermeabilización, subsanación de defectos superficiales (zonas degradadas, fisuraciones, roturas, etc.), de forma que mejora*

notablemente el comportamiento ante humedades interiores, condensaciones, acústica, estabilidad de revestimientos y otras lesiones frecuentes en edificios sin rehabilitar. Sin olvidar también los efectos estéticos cuyo beneficio es indudable para los ocupantes y su entorno” (Rodríguez-Jiménez, Carretero-Ayuso y Claro-Ponce 2018).

Por lo expuesto anteriormente las medidas de mejoramiento energético de vivienda existente plantean desafíos más amplios e integrales que la mera reducción de la demanda energética.

2.4 Indicadores de desempeño

Existe una estrecha relación entre las condiciones térmicas del edificio, el confort de sus ocupantes y la eficiencia energética, como consecuencia de que espacios con condiciones térmicas inadecuadas implican usuarios sin confort térmico o consumo de energía para mantener las condiciones deseadas (Pérez-Fargallo, Rubio-Bellido, et al. 2018). Para cuantificar el desempeño de las edificaciones se han utilizado un conjunto de indicadores, entre los más recurrentes para evaluar energéticamente se encuentran: la demanda de energía, el consumo de energía y los grados días de calefacción o refrigeración; por otro lado, para evaluar térmicamente se han utilizado principalmente el tiempo en confort y el número de horas en sobrecalentamiento.

Desde las normativas, el indicador mayormente utilizado ha sido la demanda energética, enfocados en los objetivos de mitigación, la misma es cuantificable a partir de determinadas temperaturas de consigna y horas de operación fijadas para su análisis.

Por otra parte, autores como Pérez-Fargallo, Pulido-Arcas, et al. (2018) y Rubio-Bellido et al. (2017) sostienen que los indicadores de consumo de energía primaria y emisiones de CO₂ no son aplicables a las viviendas que funcionan en oscilación libre, como las viviendas sociales que solo operan en modo mixto frente a condiciones extremas de frío y de calor; reconociendo que un indicador más adecuado para estas situaciones, debe considerar el porcentaje de tiempo en que las viviendas pueden funcionar en oscilación libre dentro de los rangos de confort.

Los rangos de temperatura que determinan ambos indicadores se establecen comúnmente en base a los diferentes modelos de confort. Tal como identifican Nicol and Humphreys (2002) la definición adecuada de este parámetro, es por tanto determinante para garantizar el confort a los usuarios y reducir el consumo de energía.

2.4.1 Modelos de confort térmico

El confort térmico ha sido abordado desde diferentes enfoques a lo largo del tiempo, tal como presenta Attia y Carlucci (2015) los tres principales han sido el fisiológico, el psicológico y el racional.

El fisiológico en definición de estos autores identifica que *“La percepción térmica de un individuo se debe a la entidad de los impulsos nerviosos que comienzan desde los receptores térmicos en la piel y llegan al hipotálamo”*. Mientras que el racional haciendo referencia a P. Höppe (2002) relaciona la sensación de confort con la condición de balance térmico del cuerpo. La definición psicológica que identifican estos autores es la que se han incorporado en la normativa internacional y se define según ASHRAE (2017) como *“la condición de la mente que expresa la satisfacción con el entorno, evaluado de forma subjetiva”*.

Este conjunto de definiciones plasma la complejidad de variables que inciden en la sensación de confort, particularmente la última mencionada al definirlo como un estado subjetivo, lleva implícito las condiciones particulares tanto psicológicas como fisiológicas de cada persona, desplazándolo de la mera condición del equilibrio térmico, la cual se lograría con un balance energético cero entre el individuo y el ambiente. Es esta complejidad la que ha dado origen a distintos enfoques de análisis.

Existen dos modelos entorno a los cuales se centra la discusión del confort térmico en espacios interiores, el primero desarrollado por Fanger en los años 70 se basa en estudios desarrollados en cámaras climáticas en condiciones estacionarias y se denomina modelo racional o estático; por otro lado la teoría adaptativa desarrollada a partir 1995 se basa en estudios de campo en edificios con ventilación natural en diferentes condiciones climáticas, considera un usuario activo que interactúa con el ambiente, adaptándose y modificándolo según sus preferencias. Este modelo es desarrollado entre otros por Nicol e Humphreys, Auliciems, De Dear y Brager (Rupp, Vásquez y Lamberts 2015; Attia y Carlucci 2015).

El método desarrollado por Fanger establece una ecuación de equilibrio térmico basada en la relación entre seis parámetros: cuatro variables físicas - Temperatura del aire, Velocidad del aire, Humedad relativa, Temperatura media radiante- y dos variables personales - Vestimenta y Nivel de actividad-; esta ecuación permite predecir la sensación térmica para unas condiciones interiores determinadas a través del indicador que denominó voto medio previsto (PMV por sus siglas en inglés), determinándose de esta forma la escala de sensación térmica en siete niveles,

de +3 (muy caluroso) a -3 (muy frío), siendo 0 la neutralidad térmica; como indicador complementario se obtienen a partir de este valor el porcentaje de insatisfechos (PPD por sus siglas en inglés) (FANGER 1970).

Este modelo es aplicable a usuarios con exposición prolongada a condiciones constantes, velocidad del aire menor a 0,2 m/s, una tasa metabólica entre 1,0 y 1,3 mets y determinado nivel de vestimenta entre 0,5 clo (verano) o 1,0 clo (invierno), por lo que su uso es adecuado para edificios climatizados sin ventanas operables; ha servido de base para las normativas ASHRAE 55, ISO estándar 7730 y EN 15251 (actual EN 16798) (ASHRAE (2017); ISO 7730 (1994); CEN EN 16798 (2017)), entre otras reglamentaciones, aplicándose actualmente a espacios interiores con acondicionamiento artificial. En la Figura 2-10 se presenta el ábaco (método gráfico) a partir del cual se delimitan los rangos de confort en dos niveles de vestimenta y las condiciones establecidas.

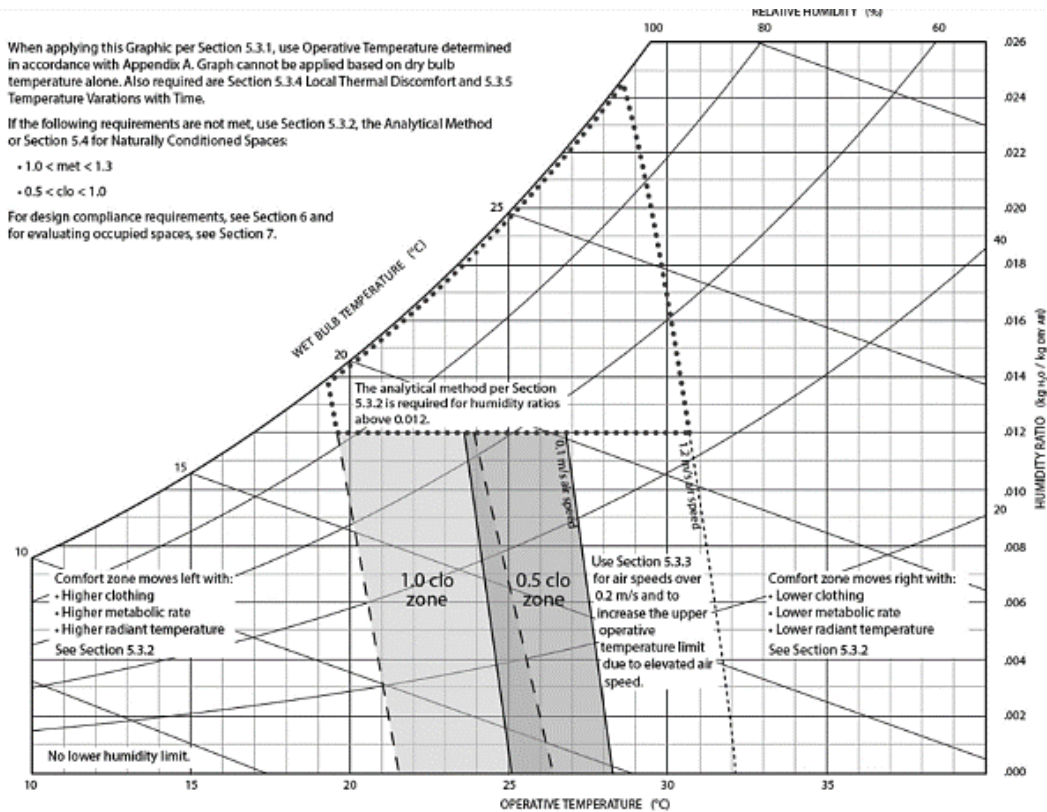


Figura 2-10. Rangos de confort modelo ASHRAE 55 Fuente: ASHRAE:2017

Las principales críticas a este modelo realizadas entre otros por Brager and De Dear (1998) se basan en que es un modelo estático que no contempla las variaciones de temperatura durante el día, es aplicado a personas en condiciones estables y actividad constante, considerando a los usuarios como meros receptores de estímulos térmicos; además de cuestionar su aplicabilidad universal debido a que ignora influencias del contexto que pueden afectar las condiciones térmicas.

En cambio, el modelo adaptativo distingue tres modos de adaptación: el conductual, se trata de ajustes que realiza el usuario en su vestimenta, actividad, entorno para mantenerse en confort; el psicológico, considera los efectos que las variables cognitivas, sociales y culturales tienen sobre los hábitos y las expectativas de las personas, las cuales influyen sobre la percepción de la condición térmica; y el fisiológico, que refieren a la capacidad aclimatarse (Brager y De Dear 1998).

El modelo adaptativo de De Dear y Brager (2002) desarrollado en el proyecto ASHRAE RP-884: *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*, fue incluido en la normativa ASHRAE 55 a partir de 2004 para edificios naturalmente ventilados. Por su parte, la EN 16798 (anterior EN 15251) utiliza la versión desarrollada por Nicol y Humphreys (2002) en base proyecto al *Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs)* (ASHRAE (2017); CEN EN 16798 (2017)).

Los estudios de campo, en los que se basan los modelos de confort adaptativo, permitieron establecer una relación lineal entre la temperatura de confort térmico interior y la temperatura exterior, desencadenando múltiples estudios para establecer cuál es la fórmula que mejor representa esta relación para diferentes contextos climáticos (Attia y Carlucci 2015); y como consecuencia de los múltiples factores que influyen en el confort térmico en los últimos años también se han desarrollados modelos que consideran los contextos socioeconómicos (Pérez-Fargallo, Pulido-Arcas, et al. 2018).

Estos modelos se aplican a edificios sin sistemas de climatización y se establecen ciertas condiciones para su aplicabilidad: los ocupantes realizan una actividad sedentaria, con tasa metabólicas entre 1,0 y 1,3 met; los usuarios deben de tener libertad para adaptar su vestimenta en función del clima interior y exterior entre 0,5 y 1,0 clo, y se deben disponer de ventanas operables por los usuarios permitiendo el uso de ventilación mecánica sin enfriamiento del aire.

En el caso de la ASHRAE 55 el rango de temperaturas de confort se calcula en función la temperatura media ponderada exterior de los días previos y para su aplicación la misma debe encontrarse entre 10,0 °C y 33,5 °C, la Figura 2-11 presenta de manera gráfica los rangos de confort para el modelo adaptativo.

En Attia y Carlucci (2015), refieren a algunas críticas realizadas a este modelo. Indicando que *“Fanger no está de acuerdo con el enfoque adaptativo en concepto, ya que solo se ocupa de la temperatura del aire exterior y descuida los otros cinco factores principales que identificaron... Givoni, mientras revisaba su trabajo ya notable en la tabla bioclimática del edificio, sugirió que al menos la temperatura del aire, la temperatura de la superficie y la velocidad del aire deberían tenerse en cuenta en climas cálidos”*.

Si bien los modelos de confort adaptativo fueron principalmente desarrollados en oficinas, son modelos que resultan particularmente ajustados para viviendas debido a que los habitantes tienen la libertad de adecuar el tipo de ropa en uso, y abrir o cerrar ventanas para mejorar la sensación térmica (Escandón et al. 2019), y por otra parte, resultan modelos más apropiados para evaluar el desempeño de viviendas que funcionan en oscilación libre o en modo mixto (Rubio-Bellido et al. 2017)

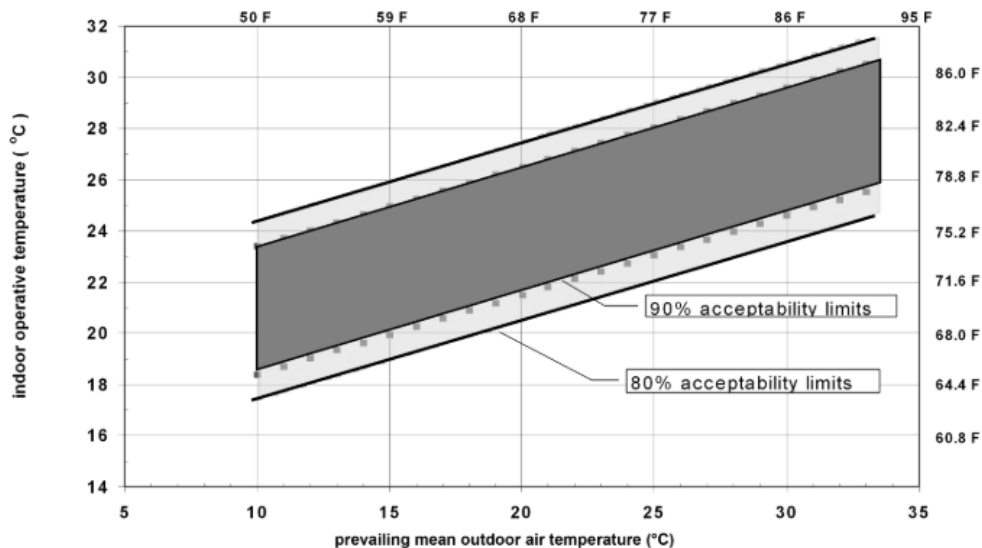


Figura 2-11. Rangos de temperatura operativa aceptable para espacios naturalmente ventilados.
Fuente: ASHRAE 55-2017

2.4.2 Incidencia del modelo de confort en la evaluación energética

La evaluación de desempeño energético de un edificio, de acuerdo a lo mencionado anteriormente, presenta una relación directa con las temperaturas de consigna establecidas para la climatización, las cuales a su vez están directamente vinculadas a los parámetros de confort considerados

Son múltiples las investigaciones que estudian la incidencia utilizar temperaturas de consigna menos estrictas que las convencionales, considerando rangos más amplios, así como, la importancia de considerar el modelo de confort adaptativo para la evaluación de desempeño de la edificación.

En particular, es mencionable la investigación que recoge resultados del estudio de una vivienda tipo, para un conjunto de quince ciudades del sur de Europa, que abarcan clima cálido y templado; en la misma se explora la incidencia del cambio de temperatura de consigna obteniendo que para calefacción un cambio de 20,0 °C a 19,0 °C resulta en una reducción de la demanda entre 30,0 % y 46,0 % para edificios nZEB y entre 13,0 % y 23% en viviendas tradicionales, mientras que un incremento de 20,0 °C a 21,0 °C supone un aumento de la demanda de entre 40% y 60% para edificios nZEB y entre 15,0 % and 25,0 % para viviendas tradicionales. En cuanto a las temperaturas de refrigeración resulta que un cambio en las temperaturas de consigna de 26,0 °C a 27,0 °C reduce la demanda entre 23,0 % y 34,0 % para nZEB y entre 25,0 % y 35,0 % en viviendas tradicionales, y aumenta entre 25,0 % y 52,0 % cuando se baja la temperatura de consigna de 26,0 °C a 25,0 °C para edificios nZEB y de 29,0 % a 56,0 % para viviendas tradicionales (Guillén-Lambea, Rodríguez-Soria y Marín 2017).

Dentro de esta temática pero desde otra línea de abordaje, se desarrollan investigaciones que sustituyen las consignas de temperatura estáticas por consignas basadas en los modelos adaptativos, obteniendo resultados que demuestran que con consignas adaptables se reduce significativamente el consumo de energía en los edificios existentes, tanto en escenarios actuales como futuros, se obtuvieron reducciones de entre 23,0 % y 46,0 % en climas cálidos, entre 19,0 % y 25,0 % en clima templado y entre 10,0 % y 29,0 % en clima frío (Sánchez-García et al. 2019).

En términos generales es preciso reconocer que los modelos de confort adaptativos presentan un rango de temperaturas más amplio que el modelo estático, lo cual trae como consecuencia la posibilidad de mantener las condiciones interiores en confort térmico mediante medios naturales; y por otra parte, en los casos en que igual sea necesario el acondicionamiento artificial, un rango más amplio de temperatura de confort supone un menor consumo de energía asociado, debido a

que las temperaturas de consigna de los equipos son más bajas para calefacción y más altas para refrigeración (Yang, Yan y Lam 2014).

En otro orden, estudios de confort adaptativo en condiciones de cambio climático demuestran un cambio en la distribución de los niveles de confort, con una reducción de los niveles de disconfort por frío y desplazamiento hacia los niveles cálidos. (Yang, Yan y Lam 2014) (Rubio-Bellido et al. 2017); este desplazamiento se produce aun considerando que el rango de confort varía en función de las futuras condiciones climáticas más cálidas. Desde un modelo de confort estático, con temperaturas de consigna fijas, las nuevas condiciones climáticas, generan un desplazamiento de las cargas de calefacción a las cargas de refrigeración, sin afectar mayormente la carga total de energía (Yang, Yan y Lam 2014).

Se desprende de la bibliografía que el rango de confort y temperaturas de consigna de calefacción y refrigeración, según el funcionamiento de vivienda, son determinantes para el dimensionamiento del desempeño energético exigible a las edificaciones. Por tanto, es necesario que estos se ajusten a los requerimientos y prácticas de uso de los habitantes.

Capítulo 3. Metodología

Este capítulo describe la metodología abordada para el estudio de mejoras aplicadas a un caso de vivienda existente de la ciudad de Montevideo (Uruguay) y su análisis bajo los parámetros de desempeño térmico y energético en el contexto de cambio climático.

La metodología desarrollada responde a una investigación de tipo cuantitativa, desarrollada de forma experimental mediante simulación energética con el programa *DesignBuilder*, el cual utiliza el motor de cálculo del *EnergyPlus* desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés).

La investigación se estructura en cuatro grandes etapas: (I) Selección y caracterización del caso de estudio; (II) Definición de variables a evaluar: clima y estrategias de mejoramiento; (III) Aplicación del modelo de confort adaptativo a los escenarios climáticos locales; (IV) Simulación de caso base y casos con mejoras en escenarios actual y futuros; (V) Análisis de los resultados obtenidos y la discusión de los mismos.

La Figura 3-1 se presenta el esquema metodológico de la investigación donde se identifican las etapas mencionadas junto con las principales herramientas utilizadas en cada caso, a su vez se presentan las secuencias establecidas con los vínculos entre etapas, donde los resultados obtenidos en unas se utilizan como insumo para las etapas sucesivas.

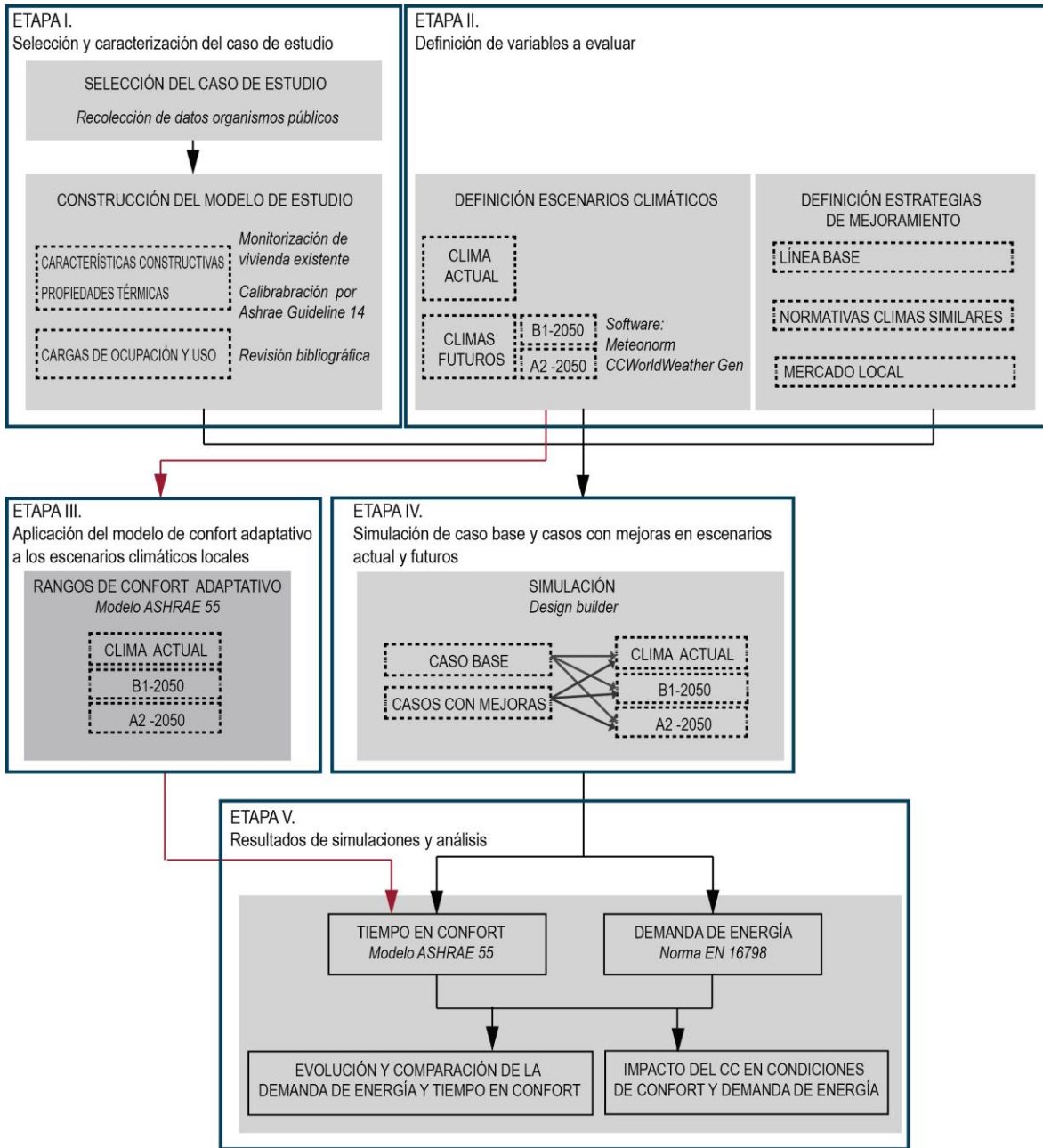


Figura 3-1. Esquema metodológico de la investigación

3.1 Selección y caracterización del caso de estudio

3.1.1 Determinación del caso de estudio

Una primera delimitación del caso de estudio se basó en las características formales y materiales identificadas en la Sección 2.1.2, obteniendo como caso una vivienda ubicada en Montevideo, de tipo “Casa”, con una superficie entre 41 y 100 m², construida en “sistema pesado”.

Por otra parte, se consideró para la selección de la tipología, el programa de vivienda social “Viviendas Populares” de la Intendencia de Montevideo (IM, 2004) por su representatividad en el parque habitacional de Montevideo. El programa funciona desde 1947 a la fecha brindando planos de vivienda “tipo” para ser autoconstruida por particulares. De acuerdo a la información brindada por la oficina responsable del programa, a la fecha hay solicitados 54.800 permisos de construcción bajo esta modalidad, si bien es posible que no todos los permisos solicitados se hayan ejecutado, este número representa cerca del 20,0 % del total de viviendas del tipo “Casa” de Montevideo. La Figura 3-2 presenta las fachadas características de las viviendas pertenecientes al programa.



Figura 3-2. Fachadas características de las “viviendas populares”

Fuente: REAHVI 2008, IM

Las viviendas construidas en esta modalidad son de 1, 2 y 3 dormitorios principalmente en un nivel, de los cuales la tipología más utilizada, de acuerdo a la oficina responsable, es la correspondiente a 3 dormitorios más específicamente la realizada a partir de 1972.

Este programa de viviendas se encuentra en varias zonas de la ciudad de Montevideo, excluyendo las áreas centrales y zonas costeras, y es por este motivo que en su mayoría, de acuerdo a la reglamentación de ocupación del suelo presenta al menos un retiro lateral cuando no se encuentran exentas.

En cuanto a la materialidad las memorias y detalles constructivos, ofrecían diferentes opciones de cubierta: losa de hormigón horizontal, losa de hormigón a dos aguas y techo liviano, todas con una altura interior mínima de 2,4 m. Los muros exteriores de 20 cm de espesor son conformados por un bloque de hormigón o cerámico hueco (denominado “ticholo” en Uruguay) con un ladrillo aplacado al exterior, revocado en ambas caras; mientras que los interiores de 15 cm son de bloque de hormigón o cerámico hueco revocado en ambas caras. El contrapiso es de hormigón de cascote con un espesor de 8 cm, generalmente con terminación cerámica y las ventanas solían ser de hierro o madera con vidrio simple. Debido a que este programa se ha extendido en el tiempo en los recaudos se han incorporado algunas modificaciones, por ejemplo, las viviendas construidas a partir de la actualización de la normativa, incorporan tanto en muros como en cubierta el aislamiento con poliestireno expandido con un espesor de 3 cm y la materialidad de las aberturas se ha sustituido por aluminio.

A pesar de las especificaciones constructivas indicadas en los planos, el proceso de realización de estas viviendas con escasa supervisión técnica en obra (hasta hace algunos años), dejó en manos del beneficiario del programa la selección final de materiales y concreción de la obra. Esto llevó a que el énfasis al momento de la construcción se centrará en reducir los costos iniciales, sin considerar el costo operacional de la vivienda. Como consecuencia, se puede identificar que hay muchas de estas tipologías que presentan muro exterior simple revocado en ambas caras.

En base a los criterios presentados, el caso seleccionado corresponde a la tipología de 3 dormitorios del programa “Viviendas Populares”, con un área construida total de 70,4 m² (79,0 m² considerando la superficie de techo).

La tipología seleccionada consta de 3 dormitorios, estar, cocina y baño con una distribución interna de acuerdo a lo presentado en la Figura 3-3 y fachada según Figura 3-4. Las áreas de huecos por fachada quedan determinadas de acuerdo a la Tabla 3-1.

En cuanto a la implantación de la vivienda se estudió la condición exenta por ser la que presenta mayor superficie expuesta y, por tanto, se asume como situación más desfavorable. Se consideró para el caso de estudio la fachada principal orientada al sur.

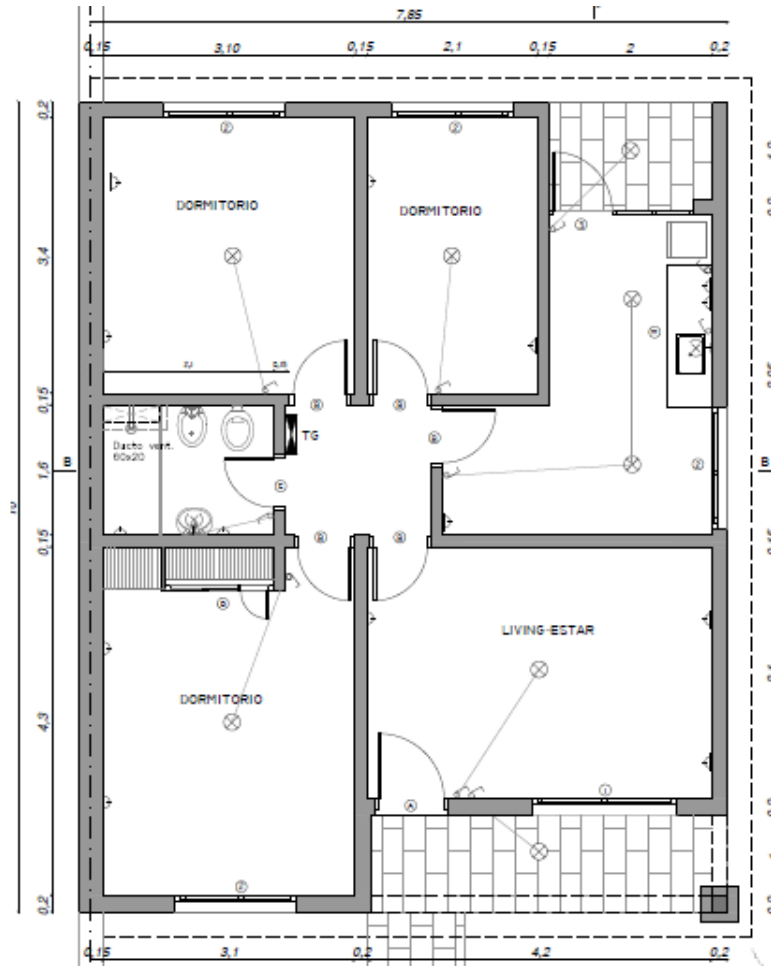


Figura 3-3. Caso de estudio: Planta

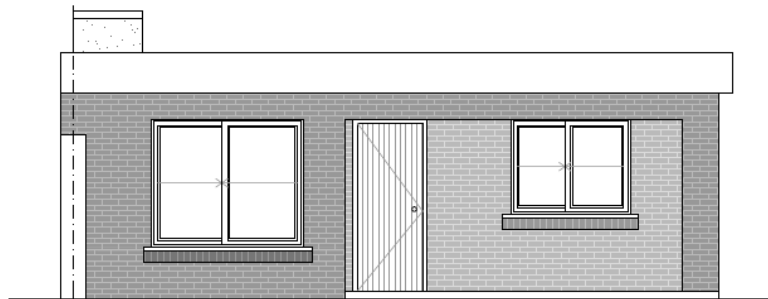


Figura 3-4. Caso de estudio: Fachada principal

Tabla 3-1. Porcentaje de huecos por fachada

Fachada	% de huecos
Principal	22%
Lateral izquierdo	0%
Lateral derecho	6%
Posterior	25%

3.1.2 Condiciones de operación y uso

Las condiciones de operación y uso se establecieron en base a la revisión bibliográfica realizada. El uso de la vivienda se consideró con una ocupación de 4 personas de acuerdo al tamaño medio de los hogares de los quintiles más bajos (MIDES 2017) y las cargas y horarios de ocupación y uso se establecieron de acuerdo a Picción et al. (2009), según se presenta en la Tabla 3-2 y en la Tabla 3-3 considerando las cargas de iluminación y equipos como carga absoluta por habitación.

Adicionalmente, se estableció una ventilación con un caudal de aire mínimo para garantizar la calidad de aire interior, con una tasa de ventilación higiénica de 2,5 lt/s-persona y 0,3 l/s·m² (ASHRAE 2007).

Tabla 3-2. Cargas y período de ocupación lunes a viernes. Adaptado de Picción et al. (2009)

Hs	ESTAR			DORMITORIO 1			DORMITORIO 2 Y 3		
	Lunes a viernes			Lunes a viernes			Lunes a viernes		
	Ocup. Pers.	Ilum. W	Eq. W	Ocup. Pers.	Ilum. W	Eq. W	Ocup. Pers.	Ilum. W	Eq. W
1:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
2:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
3:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
4:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
5:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
6:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
7:00	2	0	0	0	0	0	1	0	0
8:00	2	0	0	0	0	0	1	0	0
9:00	2	0	0	0	0	0	1	0	0
10:00	2	0	0	0	0	0	1	0	0
11:00	2	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00	2	0	0	0	0	0	0	0	0
13:00	2	0	0	0	0	0	0	0	0
14:00	2	0	0	0	0	0	0	0	0
15:00	2	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00	2	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00	2	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00	2	18	200	0	0	0	0	0	0
19:00	2	18	200	0	0	0	0	0	0
20:00	2	18	200	0	0	0	0	0	0
21:00	4	18	200	0	0	0	0	0	0
22:00	4	18	200	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	2	18	0	1	18	0
0:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0

Ocup.: ocupación; Ilum.: iluminación; Eq. Equipos; Pers.: Personas

Tabla 3-3. Cargas y período de ocupación sábado y domingo. Adaptado de Picción et al. (2009)

Hs	ESTAR Sábado y domingo			DORMITORIO 1 Sábado y domingo			DORMITORIO 2 y 3 Sábado y domingo		
	Ocup.	Ilum.	Eq.	Ocup.	Ilum.	Eq.	Ocup.	Ilum.	Eq.
	Pers.	W	W	Pers.	W	W	Pers.	W	W
1:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
2:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
3:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
4:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
5:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
6:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
7:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
8:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
9:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0
10:00	2	0	0	0	0	0	1	0	0
11:00	4	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00	4	0	0	0	0	0	0	0	0
13:00	4	0	0	0	0	0	0	0	0
14:00	4	0	0	0	0	0	0	0	0
15:00	4	0	200	0	0	0	0	0	0
16:00	4	0	200	0	0	0	0	0	0
17:00	4	0	200	0	0	0	0	0	0
18:00	4	18	200	0	0	0	0	0	0
19:00	4	18	200	0	0	0	0	0	0
20:00	4	18	200	0	0	0	0	0	0
21:00	4	18	200	0	0	0	0	0	0
22:00	4	18	200	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	2	18	0	1	18	0
0:00	0	0	0	2	0	0	1	0	0

Ocup.: ocupación; Ilum.: iluminación; Eq. Equipos; Pers.: Personas

3.1.3 Características constructivas y térmicas

Las características constructivas y térmicas se establecieron a través de la calibración del modelo en base a la monitorización de condiciones internas de temperatura, humedad y parámetros de uso en una vivienda existente que cumple con las características seleccionadas. La vivienda monitoreada fue construida con los planos del programa “Viviendas populares” en el año 1956 y presenta pequeñas diferencias con el caso más representativo presentado anteriormente⁵. Por tanto, en primer lugar, se realizó la calibración de esta tipología y luego se aplicaron las características constructivas y térmicas al caso de estudio.

A partir de la información recabada se construyó un modelo para realizar la simulación energética en el programa *DesignBuilder* el cual se calibró usando estándares *Ashrae Guideline 14*; en dicha norma, se establecen las condiciones límite que puede existir entre los valores simulados y medidos para determinar la exactitud del modelo térmico. Se considera que el Desviación Media del Error (MBE por sus siglas en inglés) entre las temperaturas de la simulación y la realidad debe ser entre -10% y 10% y el Coeficiente de Variación de la Raíz cuadrada del Error Cuadrático Medio (CV(RMSE) por sus siglas en inglés) menor al 30% (ASHRAE 2014).

El caso monitoreado es una vivienda exenta de 70,0 m², con tres dormitorios, construida en sistema constructivo pesado, muros exteriores e interiores simples de bloque de hormigón revocado y techo horizontal de losa de hormigón; altura interior uniforme de 2,80 m. La vivienda se encuentra en uso, con tres habitantes. La Figura 3-5 y la Figura 3-6 muestran las características de sus fachadas. La Figura 3-7, plano de la vivienda, permite visualizar la orientación de la misma y las habitaciones donde se realizaron las mediciones.

Los registros se realizaron entre el 13 y el 31 de Mayo de 2019, obteniendo datos de temperatura y humedad del aire por hora, mediante registrador HOBO ONSET modelo UX100-003. Se monitorearon tres habitaciones de la vivienda, Dormitorio 1, Dormitorio 2 y Distribuidor, con el objetivo de cubrir espacios con diferentes usos y orientaciones (Ver Figura 3-7).

⁵ La vivienda monitoreada es seleccionada por su similitud al caso más representativo y por la facilidad para realizar las mediciones en los tiempos establecidos para el desarrollo de la Tesis.



Figura 3-5. Fachada principal y posterior



Figura 3-6. Fachadas laterales

Para la elaboración del modelo se consideraron las condiciones físicas y de uso obtenidas mediante relevamiento físico de la vivienda y declaración de uso de sus ocupantes. Las características de implantación, orientación y entorno quedan definidas como vivienda exenta, sin obstrucciones. En la Tabla 3-4 se presenta la definición constructiva de los cerramiento opacos y sus características térmicas y, en la Tabla 3-5 las características de las ventanas y puertas respectivamente. Las cargas y calendarios de uso se presentan en la Tabla 3-6 para el uso de lunes a viernes, y en la Tabla 3-7 para sábado y domingo. En la Tabla 3-8 se puede ver el calendario de ventilación en base a lo indicado por la familia y en la Tabla 3-9 el uso de protecciones solares.

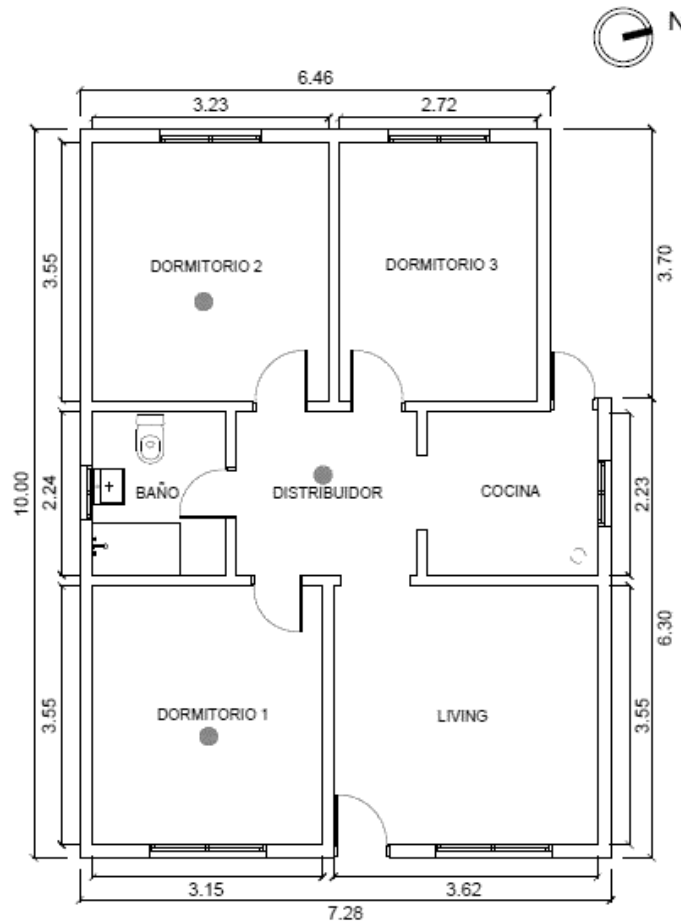


Figura 3-7. Plano de la vivienda con indicación de las habitaciones monitorizadas.

Tabla 3-4. Características materiales y térmicas de la envolvente

Paramento	Capas	Espesor (m)	U (w/m ² k)	Ct (kj/m ² k)
Muro exterior	Revoque interior	0,18	2,62	186,2
	Bloque de hormigón hueco			
	Revoque exterior			
Techo	Revoque interior	0,165	3,42	225,0
	Hormigón armado			
	Hormigón de cascote			
	Alisado de arena y portland			
Contrapiso	Membrana asfáltica aluminizada	0,12	2,60	150,2
	Baldosa cerámica			
	Mortero de toma			
	Hormigón de cascote			
Muros interiores	Revoque interior	0,15	2,22	186,3
	Bloque de hormigón hueco			
	Revoque interior			

Tabla 3-5. Características materiales, térmicas y lumínicas de las ventanas y puertas

Elemento	Tipo	Apertura (%)	Marco	Vidrio	U (w/m ² k)	Ts ⁽¹⁾	Tv ⁽²⁾	Protección solar
Ventana 1y2	Corrediza	50%	Aluminio	Simple 4mm	5,87	0,81	0,89	Cortina exterior PVC
Ventana 3	Batiente	100%	Hierro	Simple 4mm	5,87	0,81	0,89	Cortina interior tela opaca
Ventana 4	Batiente	60%	Hierro	Simple 4mm	5,87	0,81	0,89	Cortina interior Tela opaca
Ventana 5	Pivotante	100%	Hierro	Simple 4mm	5,87	0,81	0,89	Cortina interior Tela transparente
Puerta	Hierro y vidrio	100%		Simple 4mm	5,89	- / 0,81-	/ 0,89	

(1) Ts: transmisión solar; (2) Tv: transmisión lumínica

Tabla 3-6. Cargas y período de ocupación lunes a viernes

Hr	Dormitorio 1			Dormitorio 2			Dormitorio 3			Distribuidor		
	Ocup. pers.	Ilum. W	Eq. W	Ocup. pers.	Ilum. W	Eq. W	Ocup. pers.	Ilum. W	Eq. W	Ocup. pers.	Ilum. W	Eq. W
1:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
3:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
4:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
5:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
6:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
7:00	1	18	200	1	0	0	1	0	0	1	0	0
8:00	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
9:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
10:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
11:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
12:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
13:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
14:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
15:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
16:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
17:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
18:00	0	0	0	0	18	200	1	18	0	1	18	0
19:00	1	18	200	0	18	200	1	18	0	2	18	0
20:00	1	18	200	0	18	200	1	18	0	2	18	0
21:00	1	18	200	1	18	200	1	18	0	2	18	0
22:00	1	18	200	1	18	200	1	18	0	2	18	0
23:00	1	18	200	1	18	200	1	0	0	0	18	0
0:00	1	18	200	1	18	0	1	0	0	0	0	0

OCUP.: ocupación; ILUM.: iluminación; EQ. Equipos; pers.: Personas

Tabla 3-7. Cargas y período de ocupación sábado y domingo

Hr	Dormitorio 1			Dormitorio 2			Dormitorio 3			Distribuidor		
	Ocup pers.	Ilum W	Eq. W	Ocup pers.	Ilum W	Eq. W	Ocup pers.	Ilum W	Eq. W	Ocup pers.	Ilum W	Eq. W
1:00	1	18	200	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
3:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
4:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
5:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
6:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
7:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
8:00	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
9:00	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
10:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
11:00	0	0	200	0	0	0	1	0	0	1	0	0
12:00	0	0	200	0	0	0	1	0	0	3	0	0
13:00	0	0	200	0	0	0	1	0	0	3	0	0
14:00	0	0	200	0	0	0	1	0	0	3	0	0
15:00	0	0	200	0	0	0	1	0	0	3	0	0
16:00	1	0	200	0	0	0	1	0	0	1	0	0
17:00	1	0	200	0	0	0	1	0	0	1	0	0
18:00	0	18	200	0	18	200	1	18	0	2	18	0
19:00	1	18	200	0	18	200	1	18	0	2	18	0
20:00	1	18	200	0	18	200	1	18	0	2	18	0
21:00	1	18	200	1	18	200	1	18	0	2	18	0
22:00	1	18	200	1	18	200	1	18	0	2	18	0
23:00	1	18	200	1	18	200	1	0	0	0	18	0
0:00	1	18	200	1	18	0	1	0	0	0	0	0

OCUP.: ocupación; ILUM.: iluminación; EQ. Equipos; pers.: Personas

Tabla 3-8. Calendario de ventilación diaria

Local	Apertura ventana (%)	Período hr	Caudal (l/s*m ²)
Living	50%		
Dormitorio 1	25%	11 a 16	5,8
Dormitorio 2	25%		

Tabla 3-9. Calendario uso de protecciones solares

Hr	Dormitorio 1	Dormitorio 2	Dormitorio 3	Estar
1:00	100%	100%	100%	100%
2:00	100%	100%	100%	100%
3:00	100%	100%	100%	100%
4:00	100%	100%	100%	100%
5:00	100%	100%	100%	100%
6:00	100%	100%	100%	100%
7:00	100%	100%	100%	100%
8:00	100%	100%	100%	100%
9:00	100%	0	0	0
10:00	0	0	0	0
11:00	0	0	0	0
12:00	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0
15:00	0	0	0	0
16:00	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0
19:00	100%	100%	100%	100%
20:00	100%	100%	100%	100%
21:00	100%	100%	100%	100%
22:00	100%	100%	100%	100%
23:00	100%	100%	100%	100%
0:00	100%	100%	100%	100%

La simulación energética además de las características del modelo requiere de una base climática, para ello se obtuvieron los datos de temperatura, humedad y radiación pertenecientes al período de monitorización de forma de realizar la simulación con las características de clima exterior que experimentó la vivienda en dicho período. Los datos de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y humedad del aire se obtuvieron del Instituto Nacional de Meteorología (INUMET) para la estación meteorológica del Prado, estación que se sitúa en un barrio de la ciudad (INUMET 2019a); por otro lado, los datos de radiación global horizontal se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en el edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en Montevideo (LES/UdelaR 2019). Dicha información se incorporó en un archivo *.epw* a través del programa *Elements*⁶ para su utilización en el programa de simulación *DesignBuilder* como archivo climático para la simulación (Big Ladder Software y Rocky Mountain Institute, 2016).

⁶ *Elements* es una herramienta que permite crear y editar archivos climáticos personalizados en formato *.epw* para su uso en programas de simulación energética.

Una vez configurada la materialidad, parámetros de uso y condiciones climáticas exteriores para calibrar el modelo se utilizaron como variables de ajuste el nivel de hermeticidad y temperatura del suelo, parámetros que no pudieron ser medidos en el levantamiento de información. Estas variables se fueron ajustando hasta alcanzar los estándares de la *Ashrae Guideline 14*.

Para la hermeticidad al aire se consideraron los rangos determinados en CITEC UBB (2013) para viviendas de albañilería en ladrillo. Para temperatura del suelo, la validación del modelo se logró utilizando la herramienta *grounddomain* incluida en *Designbuilder*, la cual calcula las temperaturas del suelo a partir de las características configuradas, ver Tabla 3-10.

Tabla 3-10. Configuración de suelo

Tipo de suelo	Arcilla -Limo	
Conductividad	W/mK	1.5
Peso específico	J/kgK	2085
Densidad	kg/m ³	1500
Profundidad de dominio del suelo	m	10
Perímetro de incidencia	m	6

3.2 Definición de variables a evaluar

3.2.1 Escenarios climáticos y generación de archivos climáticos

La simulación energética y térmica de edificaciones requiere de archivos climáticos, los cuales tradicionalmente utilizan datos de series históricas recientes, conformando lo que se denomina año meteorológico típico o año típico de referencia (por sus siglas en inglés TMY y TRY respectivamente). Sin embargo, los cambios en las condiciones climáticas experimentados y proyectados han llevado a cuestionar la validez de basar los estudios en datos históricos debido a que desconocen los cambios que va a enfrentar el edificio durante su vida útil (Invidiata y Ghisi 2016; Pérez-Andreu et al. 2018).

A nivel mundial se han desarrollado modelos de circulación global que permiten generar proyecciones de clima futuro basados en los escenarios determinados por el IPCC, estos modelos requieren de “*downscaling*” para obtener una resolución de datos de escala local.

En análisis energético de edificaciones se utilizan principalmente dos programas para generar archivos para uso en simulación en condiciones de clima futuro: *Meteonorm* (Remund et al. 2011) y *CCWorldWeatherGen* (Jentsch, Bahaj y James 2013), siendo el último el de mayor uso registrado. La revisión bibliográfica realizada permitió identificar que existen pocos antecedentes del uso de *Meteonorm*, por ello, se consideró oportuno evaluar los archivos resultantes de ambos programas.

Los dos programas mencionados utilizan el modelo climático *Hadley CM3* para escenarios del IPCC AR4. En el caso de *Meteonorm* se obtienen los archivos directamente del programa de acuerdo a las coordenadas deseadas y se obtienen archivos de clima para los escenarios B1 y A2. El programa *CCWorldWeatherGen* requiere un archivo base del período 1961-1990, el cual se obtuvo de *Meteonorm*⁷ y a partir de éste se generó el archivo en escenario futuro, siguiendo la metodología de Flores-Larsen, Filippín, & Barea (2019); este programa genera únicamente el escenario A2. De acuerdo a lo presentado en 2.2.1 el escenario B1 presenta una trayectoria comparable al escenario más reciente RCP 4.5, mientras que el A2 es un punto medio entre los escenarios RCP 6 y 8.5.

⁷ Se verificaron los datos obtenidos de *Meteonorm* con los disponibles de INUMET para igual período, encontrando una correlación entre ellos.

Es importante considerar que los archivos obtenidos representan proyecciones de los años meteorológicos típicos con escasa representatividad de variaciones climáticas localizadas o fenómenos de eventos extremos asociados al cambio climático (Rubio-Bellido, Pulido y Ureta-Gragera 2015).

Asumiendo que el clima actual es representado por los archivos climáticos utilizados tradicionalmente (TMY), se estudian los escenarios de clima futuro B1 y A2 proyectados al año 2050, por ser un período acorde a la vida útil para un mejoramiento energético de una vivienda existente (OECD/IEA 2008).

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MONTEVIDEO

Para determinar los archivos climáticos a utilizar se realizó una comparación entre los datos de temperaturas horarias obtenidos en uno y otro programa para el escenario A2, escenario común a ambos.

Los datos obtenidos mediante *Meteonorm*, proyectan en relación a la temperatura para todos los casos (temperatura media, temperatura máxima media y temperatura mínima media) y para los dos escenarios (B1 y A2), una tendencia en aumento en todos los casos independiente de la temporada, aunque con variación en la magnitud y con mayor intensidad para el escenario A2 debido a las condiciones que este plantea (Ver Figura 3-8).

Para el escenario B1 en relación al clima actual, se presenta un aumento de temperaturas medias entre 0,8 y 1,2 °C, mientras que las temperaturas medias para el escenario A2 se incrementan entre 1,1 y 1,7 °C.

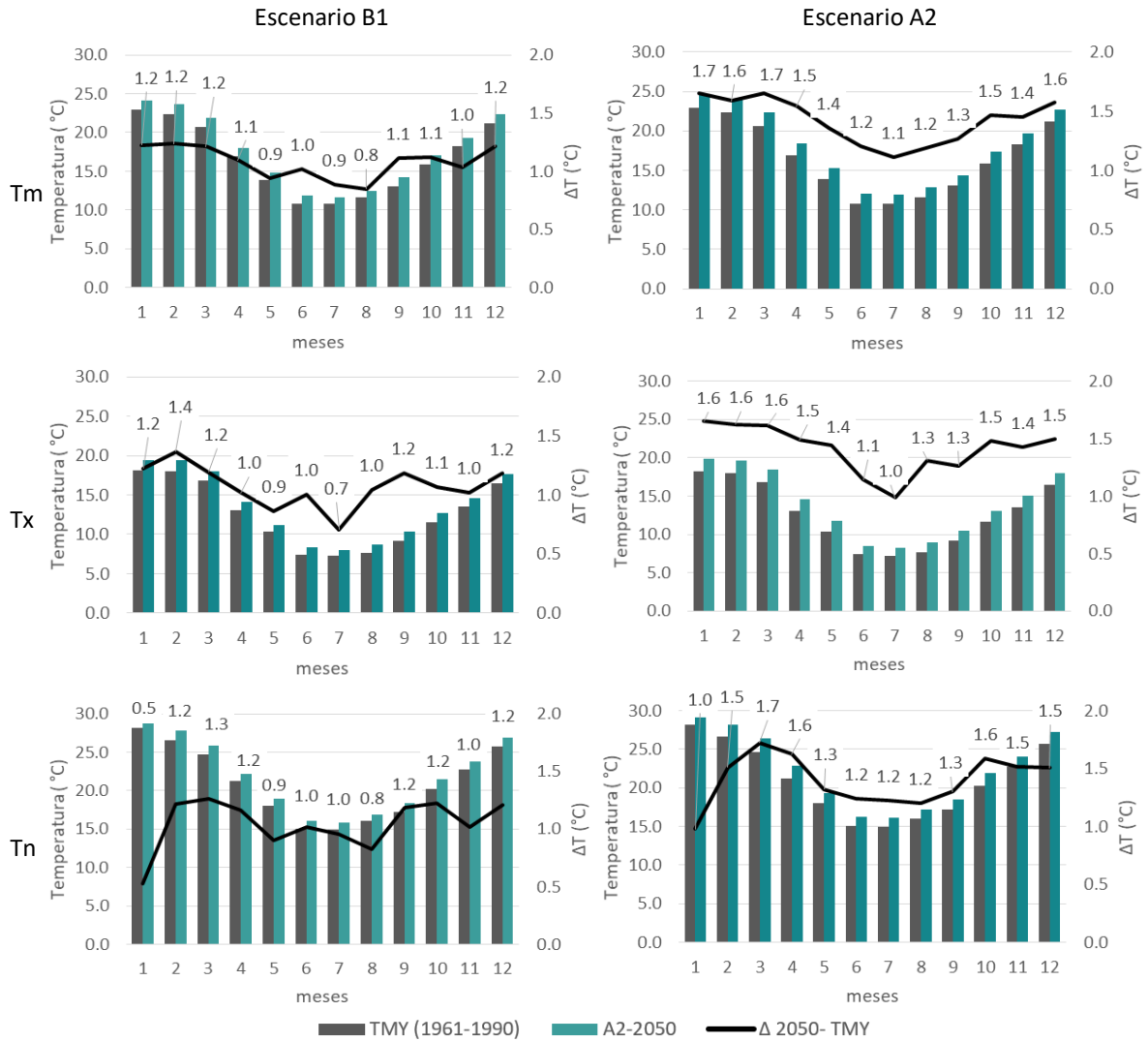


Figura 3-8. Temperatura media (Tm), Temperatura máxima media (Tx), Temperatura mínima media (Tn) en escenarios B1 y A2. TMY (1961-1990) y 2050. Variación de temperatura entre el 2050 y período base para cada caso. Elaborado en base a archivos obtenidos de Meteonorm.

En los datos obtenidos mediante *CCWorldWeatherGen*, al igual que los obtenidos por *Meteonorm*, se observa en relación a la temperatura que tanto la temperatura media como la temperatura máxima media y temperatura mínima media indican una tendencia en aumento, independiente de la temporada, aunque con variación en la magnitud. Para el escenario A2 en el 2050 en relación al clima actual, se presenta un aumento de temperaturas medias entre 1,4 y 2,0 °C (Ver Figura 3-9).

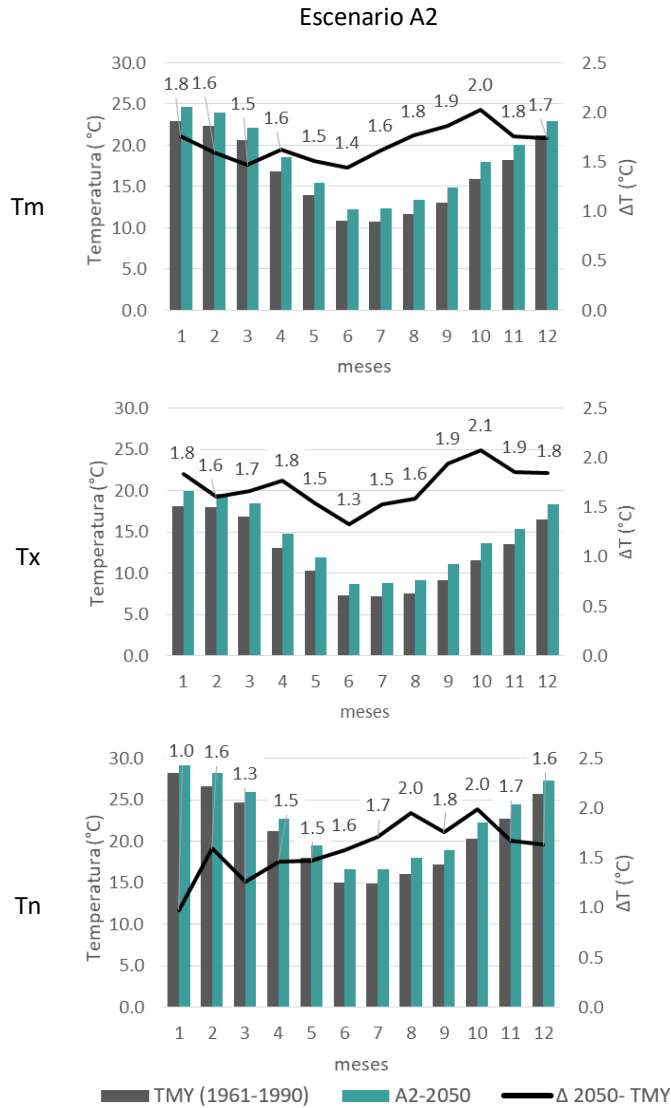


Figura 3-9. Temperatura media (Tm), Temperatura máxima media (Tx), Temperatura mínima media (Tn) en escenario A2. TMY (1961-1990) y 2050. Variación de temperatura entre el 2050 y período base para cada caso. Elaborado en base a archivos obtenidos de CCWorldWeatherGen.

La comparación realizada entre los resultados horarios de temperatura por ambos programas presenta un MBE 1,4 %, inferior al 10,0 %, y el CV(RMSE) de 7,9 %, menor al 30,0 % (ASHRAE 2014). Adicionalmente se estudió la dispersión entre ambos registros, obteniendo una relación r^2 de 0,95, ver Figura 3-10. Esto permite considerar los archivos de *Meteonorm* para el estudio en climas futuros, con la ventaja que admite evaluar dos escenarios B1 y A2.

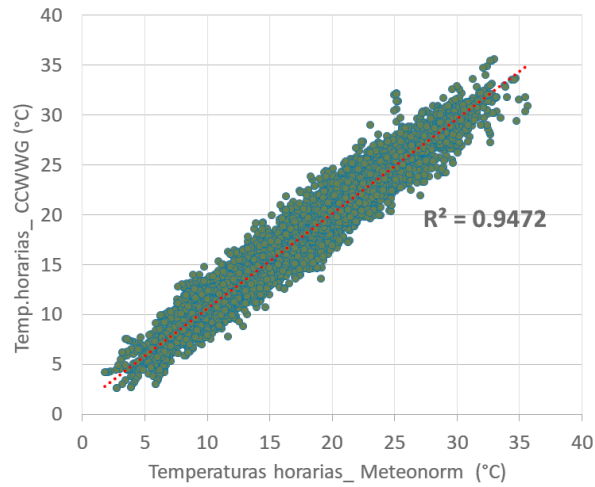


Figura 3-10. Relación entre datos obtenidos de Meteonorm y CCWorldWeatherGen para escenario A2 año 2050.

3.2.2 Criterios de selección de mejoras a estudiar

Las mejoras a implementar se determinaron considerando su adecuamiento para solucionar los problemas levantados a partir de la evaluación del desempeño del caso base en relación al clima actual y futuro; determinadas las estrategias, se consideraron criterios comunes con normativas existentes en climas similares y materiales disponibles en el mercado local, para delimitar los rangos a estudiar de cada estrategia de mejora. Asimismo, se consideró en relación a la bibliografía presentada analizar tanto mejoras constructivas como mejoras operacionales. Se detalla a continuación la metodología utilizada.

Las normativas y estándares de referencia internacional se consideraron en el caso de Chile y España por ser países reconocidos por su desarrollo en políticas energéticas, el caso de Argentina resulta de interés por pertenecer a un contexto similar al de Uruguay. Para cada país se seleccionan las ciudades referentes con características climáticas comparables al clima de Montevideo (Ver Tabla 3-11). Para el caso de Argentina y España se consideran las normativas vigentes mientras que para Chile se consideran los estándares fijados en el Código de Construcción Sustentable (CCS).

Tabla 3-11. Características climáticas de normativas de referencia

Ubicación				Zonif. Clima		Inverno				Verano			
País	Ciudad	Lat	Long	Local	Köppen	T _{NM} °C	T _{MED} °C	T _{XM} °C	HR %	T _{NM} °C	T _{MED} °C	T _{XM} °C	HR %
Uruguay ⁽¹⁾	Montevideo	34°50' S	56° 12' O	IVd	Cfa	7.2	10.9	15.0	82	18.0	23.0	28.4	69
Argentina ⁽²⁾	Rosario	33° 02' S	60° 47' O	III	Cfa	5.8	11.1	17.3	79	16.5	23.3	30.2	69
Chile ⁽³⁾	Valparaíso	33°1' S	71° 37' O	C	Csb	9.2	11.4	14.3	84	13.5	17.0	20.8	78
	Talca	35° 22' S	71° 28' O	D	Csb	2.6	7.6	12.0	88	11.8	20.3	31.0	62
España ⁽⁴⁾	Sevilla	37° 25' N	5° 52' O	B4	Csa	5.7	10.9	16.0	71	20.3	28.2	36.0	44
	Málaga	36° 39' N	4° 28' O	A3	Csa	7.4	12.1	16.8	69	20.5	25.5	30.5	58

Datos obtenidos de : (1) Inumet / (2) Normativa Municipal/ (3) Nch 1079/ (4) www.aemet.es

Adicionalmente para caracterizar las mejoras se consideraron elementos y materiales disponibles en el contexto nacional. Se tomó de referencia el sistemas de aislación térmica exterior (EIFS por sus siglas en inglés) o escudo térmico y placas autotrabantes para cubiertas, en ambos casos compuestos de poliestireno expandido (EPS por sus siglas en inglés), ver Figura 3-11. Los espesores nominales de EPS para sistemas de cubierta invertida que se comercializan son de 5 cm y 7 cm, mientras que para el caso de muros los espesores estándar van de 1 a 5 cm.

Vale la aclaración que el tomar estos sistemas de referencia es a los fines del análisis de los niveles de aislación y que los mismos pueden ser alcanzados por otros sistemas constructivos.

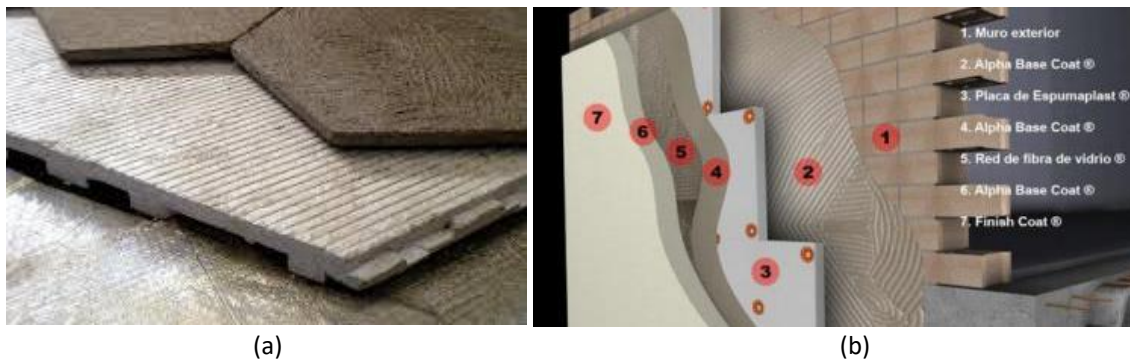


Figura 3-11. Sistemas de aislación por el exterior (a) sistema para cubiertas (b) sistema para muros

La transmitancia térmica de las ventanas se consideró según sean con marco de aluminio con vidrio simple o Doble Vidriado Hermético (DVH) o marco de policloruro de vinilo (PVC) con DVH. Todas opciones disponibles en el mercado nacional.

El nivel de mejora de las infiltraciones se determinó considerando que para alcanzar un nivel de 5ACH (n50) se sustituyen las ventanas por otras de menor nivel de permeabilidad al aire y para alcanzar el nivel de 1ACH (n50) se requiere además del cambio de ventanas el sellado y aplicación de burletes en puertas y posibles pases de cañerías. Se adopta este criterio debido a la complejidad de cuantificar la real incidencia de las mejoras en la hermeticidad global, y basados en experiencias de rehabilitación que presentan niveles variables de reducción de las infiltraciones aún con la implementación del mismo tipo de mejoramientos sobre muros y ventanas (Rodríguez-Jiménez, Carretero-Ayuso y Claro-Ponce 2018; D'Ambrosio Alfano et al. 2016)

En relación a las protecciones solares se consideraron cortinas de enrollar de PVC exteriores, por ser elementos de protección solar exterior y porque permiten bloquear el 100% en todas las orientaciones. Dado que es una estrategia para el período cálido, se consideraron activas entre noviembre y marzo cuando la temperatura exterior es mayor a 19,0 °C y la radiación solar incidente sobre la ventana supera los 120 W/m².

La ventilación (funcionamiento y caudal) se determinó a partir del estudio del período en que se produce discomfort por calor en el caso base y dentro de esas horas las que se genera la condición de que la temperatura exterior es al menos 2°C menor que la temperatura interior, es decir los períodos en que el aire exterior tiene capacidad de enfriamiento.

3.3 Modelo de confort adaptativo

La evaluación del tiempo en confort empleando modelos de confort adaptativo requiere modelos ajustados al contexto climático y sociocultural; en ausencia de modelos específicos para el contexto local se recurrió a modelos internacionales optando por la norma ASHRAE 55, en primer lugar existe un antecedente local que verifica que dicho rango se ajusta a las condiciones de confort en edificios naturalmente ventilados (Picción et al. 2011); por otra parte, en relación al modelo europeo, el ASHRAE 55 presenta un rango de temperaturas más amplio y con un límite inferior más bajo, lo cual tiene mayor aplicabilidad en viviendas sociales puesto que la adaptación de sus usuarios al clima es mayor (Pérez-Fargallo et al. 2018).

La temperatura neutral (T_n) siguiendo el procedimiento indicado en ASHRAE 55 (2017) se calcula a partir de la temperatura promedio de funcionamiento exterior ($T_{pma(out)}$) según la ecuación 1.

$$T_n = 0,31 \cdot T_{pma(out)} + 17,8 \quad (1)$$

Siendo $T_{pma(out)}$ la temperatura promedio de funcionamiento exterior calculada a partir de la temperatura media exterior de los 7 días previos, tal como describe la ecuación 2, donde $T_{e(d-1)}$ es la temperatura exterior promedio del día previo, $T_{e(d-2)}$ la temperatura exterior promedio del segundo día previo y así sucesivamente; y α es una constante que depende del clima, asumiendo $\alpha=0,8$.

$$T_{pma(out)} = (1 - \alpha) [T_{e(d-1)} + \alpha \times T_{e(d-2)} + \alpha^2 T_{e(d-3)} + \alpha^3 T_{e(d-4)} + \dots] \quad (2)$$

A partir de la temperatura neutral se establecen los rangos de 80,0 % y 90,0 % de aceptabilidad determinados por un $\pm 3,5$ °C (rango de 7,0 °C total) para un porcentaje de aceptación térmica del 80 % y $\pm 2,5$ °C (rango de 5,0 °C total) para 90% aceptabilidad térmica. Representado en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Límite superior de la zona de confort aceptabilidad 90\%} = 0,31 \times T_{pma(out)} + 17,8 + 2,5 \quad (3)$$

$$\text{Límite inferior de la zona de confort aceptabilidad 90\%} = 0,31 \times T_{pma(out)} + 17,8 - 2,5 \quad (4)$$

$$\text{Límite superior de la zona de confort aceptabilidad 80\%} = 0,31 \times T_{pma(out)} + 17,8 + 3,5 \quad (5)$$

$$\text{Límite inferior de la zona de confort aceptabilidad 80\%} = 0,31 \times T_{pma(out)} + 17,8 - 3,5 \quad (6)$$

La norma establece que para aplicar los límites de confort adaptativo determinados con las ecuaciones anteriores la temperatura promedio de funcionamiento exterior ($T_{pma(out)}$) debe encontrarse entre 10,0 °C y 33,5 °C, cuando se encuentre fuera de esos valores los límites de confort se asumirán las condiciones constantes tomando los valores determinados por las ecuaciones anteriores para 10,0 °C y 33,5 °C, Ver Figura 3-12.

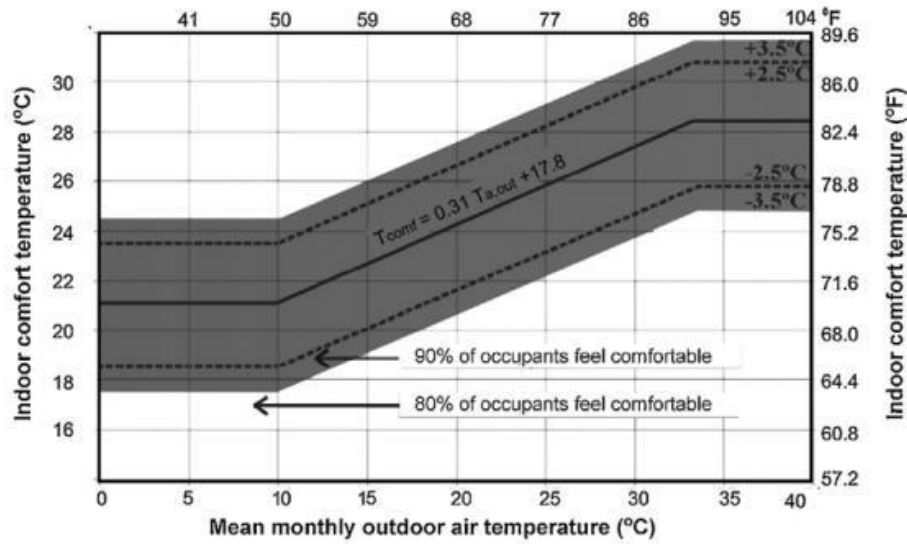


Figura 3-12. Rangos de temperatura operativa para espacios naturalmente ventilados basado en modelo adaptativo de ASHRAE.

Fuente: Attia y Carlucci (2015)

Los rangos de confort térmico y la temperatura neutral en el modelo de confort adaptativo se encuentran directamente relacionados con las temperaturas exteriores y, por tanto, presentará variaciones entre el clima actual y los escenarios futuros por lo que se requiere aplicar la metodología presentada a cada escenario climático a evaluar (clima actual, escenario B1 y A2).

3.4 Simulación

El análisis de desempeño del caso base y de los casos con mejoras, en condiciones de clima actual y futuros se realizó de forma experimental mediante simulación energética en el programa *DesignBuilder*, permitiendo obtener la demanda de calefacción y refrigeración, además de las temperaturas interiores de funcionamiento en oscilación libre durante todo el año.

3.4.1 Modelo de estudio

El modelo del caso base (características físicas, ocupación y usos) se configuró acorde a lo presentado en el apartado 3.1 los archivos climáticos utilizados se obtuvieron de acuerdo a lo presentado en el apartado 3.2.1 y las mejoras evaluadas se determinaron según lo desarrollado 3.2.2.

3.4.2 Indicadores de evaluación

El desempeño de los casos de estudio se determinó en base a dos indicadores que son demanda de energía (desempeño energético) y porcentaje de tiempo en confort térmico cuando la vivienda funciona en oscilación libre (desempeño térmico).

La demanda de energía para calefacción y refrigeración se estableció empleando las temperaturas de consigna del modelo estático de la norma EN 16798 para la Categoría II, resultando los límites de confort de temperatura operativa de 20,0 °C como límite inferior para la condición de invierno y de 26,0 °C como límite superior para la condición de verano, condición uniforme de temperatura en toda la casa. Esta consigna se mantiene constante para todos los escenarios climáticos evaluados.

El tiempo en que las viviendas permanecen dentro del rango de confort se evaluó de acuerdo al modelo de confort térmico adaptativo ASHRAE 55 (2017) según los rangos determinados para el clima de Montevideo en los distintos escenarios, ver apartado 3.3, el análisis se realizó para dos habitaciones con diferentes orientaciones y usos: Estar y Dormitorio 2.

Para obtener ambos indicadores se trabajó sobre el mismo modelo en *DesignBuilder* con dos configuraciones según el resultado esperado. Para estudiar demanda energética se configuró un sistema de climatización mecánico (HVAC por sus siglas en inglés) con energía eléctrica y un coeficiente de rendimiento (COP por sus siglas en inglés) igual a 1, de forma que el consumo de energía fuera igual a la demanda. El porcentaje de tiempo en confort se calculó a partir de las

temperaturas horarias en el interior de los locales obtenidas con la configuración del modelo en oscilación libre, dichas temperaturas se estudiaron mediante planilla *Excel* para evaluar los rangos de confort según la normativa.

3.4.3 Evaluación multivariable

De acuerdo al apartado 3.2.2, se determinan un conjunto de mejoras - variables a analizar- cada una con diversos rangos; con el objetivo de estudiar las múltiples combinaciones posibles entre las variables se utilizó el módulo de optimización del programa *DesignBuilder*, obteniendo como resultado, un conjunto de casos con diversas combinaciones de mejoras junto con la demanda de energía para calefacción y refrigeración correspondiente, a partir de la cual se calculó la demanda total por caso. Se realizó una corrida por cada escenario climático combinando todas las variables excepto la ventilación nocturna, la cual se estudió particularmente como mejora individual sobre el caso base y en combinación con otras mejoras en ciertos casos seleccionados que se explican a continuación.

A partir de todas las simulaciones ejecutadas y el conjunto de casos resultantes se seleccionaron un total de 15 casos para evaluar su desempeño térmico. Los casos seleccionados buscan abarcar tanto la aplicación de mejoras individuales como las mejoras combinadas con distintos niveles de desempeño, así como analizar los niveles alcanzables mediante la normativa actual y opciones materiales disponibles en el mercado nacional.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Aplicación del confort adaptativo para el clima de Montevideo

A continuación, se presenta la aplicación del modelo de confort adaptativo ASHRAE 55 a los diferentes escenarios climáticos a analizar: clima actual, escenarios futuros B1 y A2 en 2050. En primer lugar, se estudian los límites de aplicabilidad para luego determinar los rangos de confort en cada caso.

La Tabla 4-1 muestra para los distintos escenarios el porcentaje de tiempo en que las temperaturas promedio de funcionamiento exterior son inferiores o superiores a los límites de aplicación establecidos por la normativa, resultando que el porcentaje de horas anuales en el que $T_{pma(out)}$ es inferior a 10,0 °C varía entre 23,0% y 29,6 %.

Tabla 4-1. Porcentaje de tiempo por fuera de los límites de aplicación del modelo adaptativo ASHRAE 55

Escenario	T pma(out)	
	< 10,0 °C	> 33,5 °C
Actual	29,6 %	0,0 %
B1 - 2050	25,2 %	0,0 %
A2 - 2050	23,0 %	0,0 %

En la Figura 4-1, en la Figura 4-2 y en la Figura 4-3 se presenta gráficamente las variaciones del rango de confort para las condiciones de clima actual y futuro respectivamente, asimismo en la Tabla 4-2 se indican los rangos en los que varía cada categoría para los diferentes escenarios.

Como se pueden ver en las gráficas más abajo, el clima de Montevideo presenta 60,0 % de horas bajo los límites de confort para un 80,0 % de aceptabilidad térmica en el clima actual, 53,5 % para 2050 en el escenario B1 y 51,5 % para el escenario A2. El tiempo sobre el límite superior es mucho menor con un 6,9 % para la actualidad, 9,5 % para B1 y 10,2 % para A2. Por tanto, se puede prever que las problemáticas de desconfort térmico para las viviendas se encuentran asociadas principalmente a las bajas temperaturas.

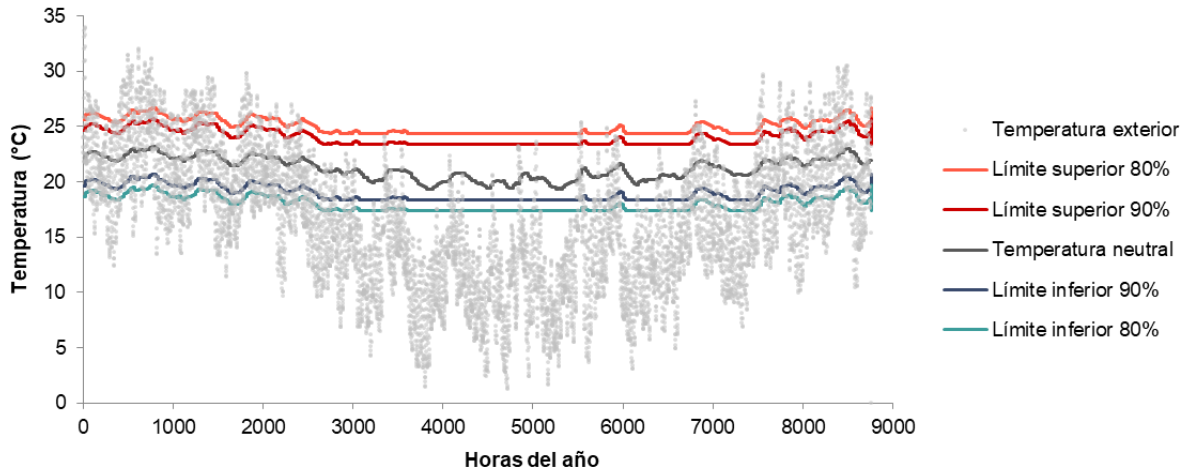


Figura 4-1. Rangos de confort adaptativo para clima actual basado en modelo ASHRAE 55.

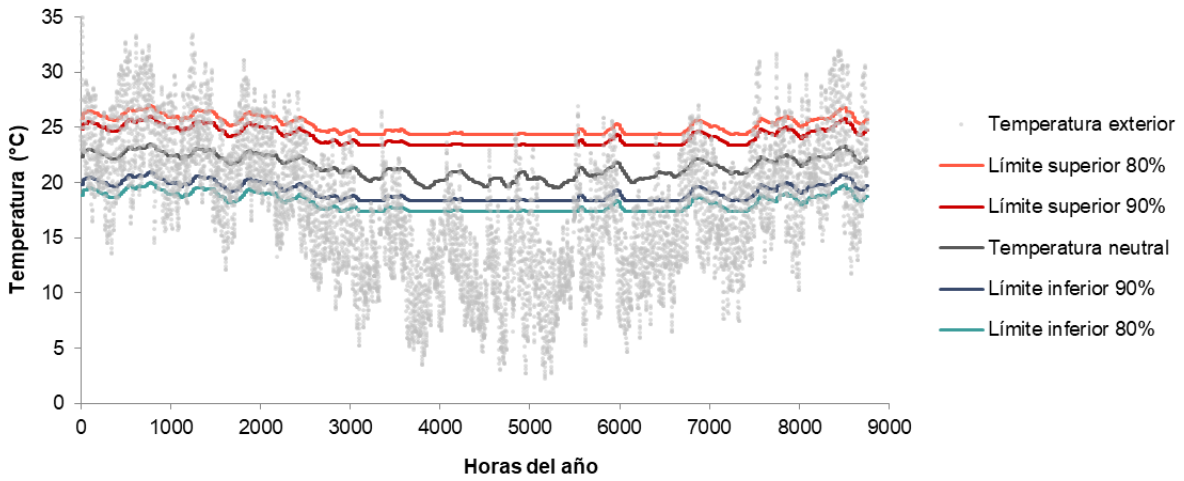


Figura 4-2. Rangos de confort adaptativo para escenario climático B1 2050 basado en ASHRAE 55.

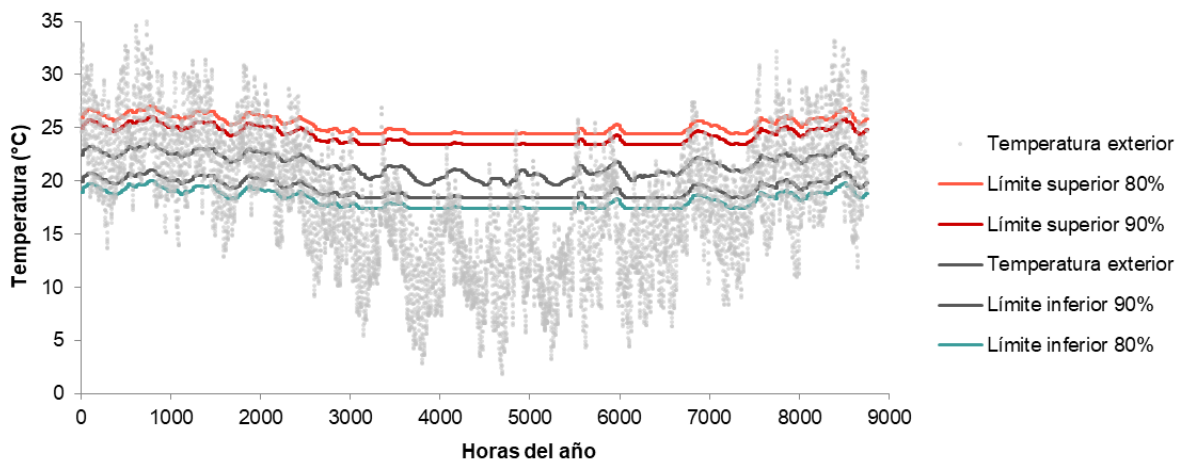


Figura 4-3. Rangos de confort adaptativo para escenario climático A2 2050 basado en ASHRAE 55.

Tabla 4-2. Temperaturas límite por rango de confort para los escenarios climáticos base, B1 2050 y A2 2050

Escenario	Año	Límite	Límite superior 80%	Límite superior 90%	Temperatura neutral	Límite inferior 90%	Límite inferior 80%
			°C	°C		°C	°C
ACTUAL	TMY	Max	26,7	25,7	21,2	20,7	19,7
		Min	24,4	23,4		18,4	17,4
B1	2050	Max	27,0	26,0	21,5	21,0	20,0
		Min	24,4	23,4		18,4	17,4
A2	2050	Max	27,1	26,1	21,5	21,1	20,1
		Min	24,4	23,4		18,4	17,4

4.2 Caracterización de un caso representativo

El estudio energético mediante simulación requiere de la construcción de un modelo lo más fiel posible a la realidad de modo que las variantes a estudiar arrojen resultados fiables. A continuación, se presentan los datos obtenidos que permitieron validar el modelo de estudio y los resultados de desempeño térmico y energético del caso base que determinan la línea base de la situación actual.

4.2.1 Validación del modelo

De acuerdo a lo presentado en 3.1 a partir de la configuración de la materialidad y parámetros de uso, se utilizó como variable de ajuste la configuración de las temperaturas del suelo y los niveles de infiltraciones para validar el modelo en relación a la monitorización de temperatura y humedad registrada *in situ*.

La hermeticidad al aire de la construcción se ajustó considerando el rango determinado en CITEC UBB (2013) para viviendas de albañilería en ladrillo. Se inició con 11,8 ACH n50, nivel medio para viviendas de estas características, y se verificó que disminuyendo el nivel de infiltraciones los valores obtenidos se fueron ajustando. Los resultados obtenidos para 8,2 ACH n50 (nivel inferior de la referencia) presentaron niveles levemente más justos entre lo simulado y lo medido (Ver Tabla 4-3).

La temperatura del suelo se configuró inicialmente utilizando los datos disponibles en el archivo *.epw* de temperatura del suelo, considerando como hipótesis que en una vivienda exenta en funcionamiento en oscilación libre el suelo bajo ésta se vería influenciado por las condiciones exteriores. La calibración obtenida se ajustaba a los parámetros esperados de validación, sin embargo, las primeras medidas de mejoramiento energético aplicadas presentaban incongruencias para el periodo caluroso. Finalmente se optó por utilizar la configuración de suelo incluida en el programa a través de la herramienta "*grounddomain*", obteniendo una calibración más ajustada logrando disminuir tanto el MBE como el CV, obteniendo valores que se encuentran de acuerdo a la ASHRAE por debajo del 10% y del 30% respectivamente (Ver Tabla 4-3). Un detalle de las temperaturas de suelo puede verse en ANEXO A.

Tabla 4-3. Resultados de calibración

Infiltraciones	Configuración de suelo	Error	Dormitorio 1	Distribuidor	Dormitorio 2
11,2 ACH	Datos epw	MBE	7,6%	6,9%	5,3%
		RMSE	1,7	1,6	1,1
		CV(RMSE)	9,0%	8,2%	5,9%
8,2 ACH	Datos epw	MBE	7,1%	6,8%	4,9%
		RMSE	1,6	1,5	1,1
		CV(RMSE)	9,1%	7,9%	6,0%
8,2 ACH	Ground domain	MBE	3,5%	-1,1%	-1,6%
		RMSE	1,2	0,9	0,7
		CV(RMSE)	6,7%	4,5%	3,9%

En la Figura 4-4, en la Figura 4-5 y en la Figura 4-6 se presentan gráficamente las temperaturas monitorizadas en relación a las simuladas para las diferentes habitaciones.

Los resultados obtenidos en todos los casos se encontraban dentro de los rangos establecidos por el estándar ASHRAE, sin embargo tanto la reducción de las infiltraciones como el cálculo de temperaturas del suelo a través del programa permitieron reducir las diferencias entre el caso simulado y el medido. Se identifica que esto se puede deber a que la monitorización de la vivienda se realizó únicamente en el período frío, evidenciando así la necesidad de contar con mediciones en los diferentes períodos en climas como el estudiado.

La configuración final de temperaturas de suelo e infiltraciones, en conjunto con las características físicas ya definidas, permitió obtener un modelo físico validado de acuerdo al estándar ASHRAE, que sirve de modelo para evaluar las condiciones iniciales de la vivienda y la incidencia de las mejoras térmicas y energéticas.

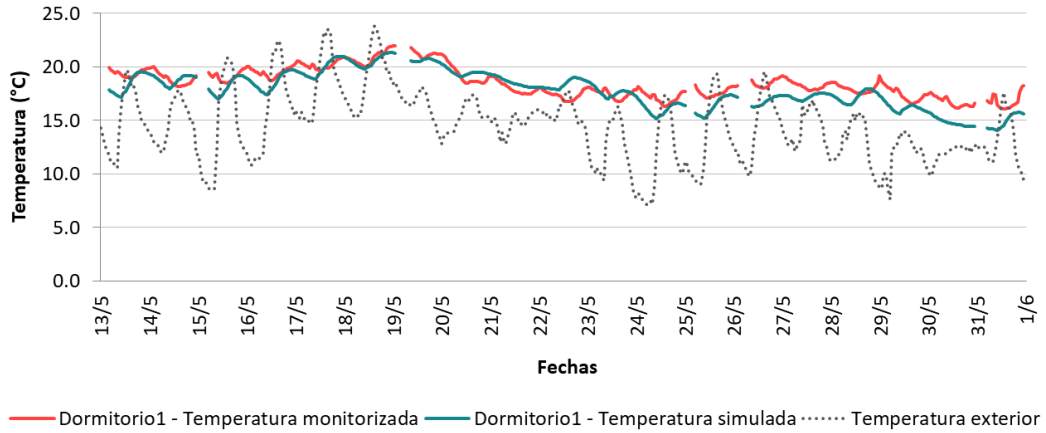


Figura 4-4. Dormitorio 1 - Gráfica de calibración

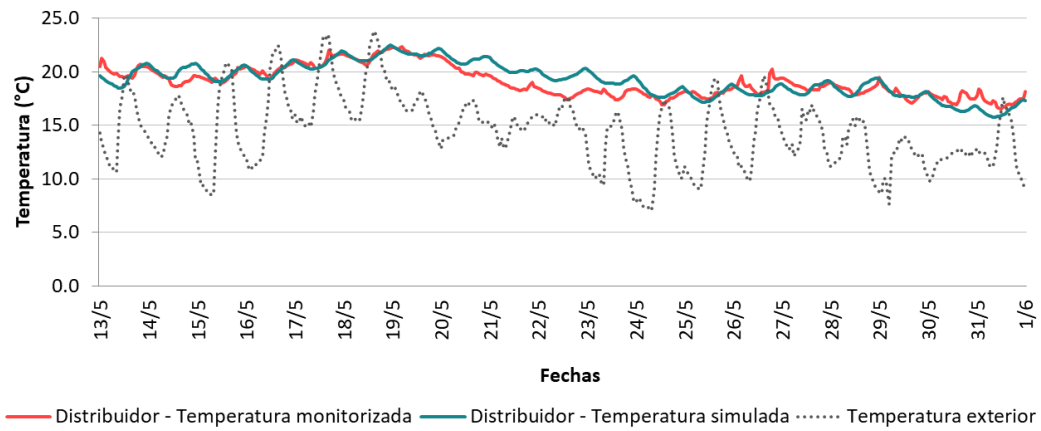


Figura 4-5. Distribuidor - Gráfica de calibración

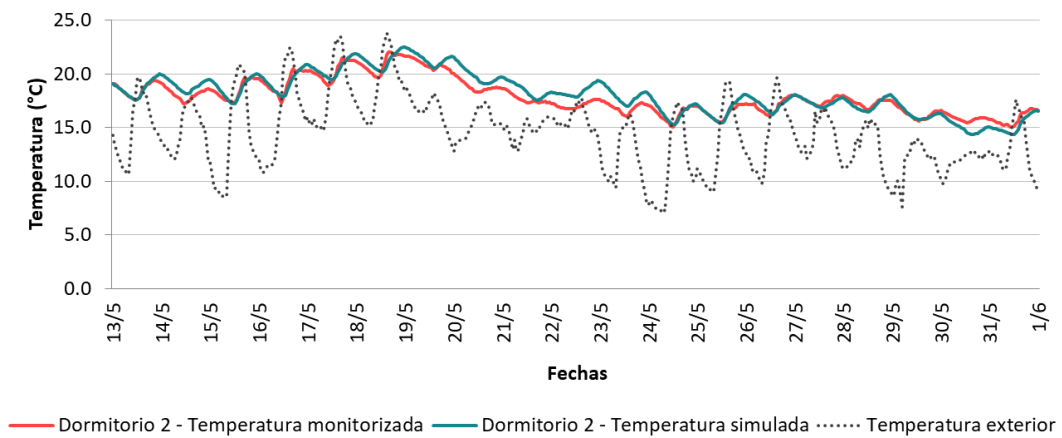


Figura 4-6. Dormitorio 2 - Gráfica de calibración

4.2.2 Desempeño térmico y energético del caso base

En este apartado se presentan los resultados de las simulaciones realizadas sobre el caso base (denominado “Caso A”) en condiciones de clima actual y escenarios futuros.

CASO BASE EN EL CLIMA ACTUAL

En la Tabla 4-4 se presentan los resultados obtenidos, para el caso base en el clima actual, de acuerdo a las categorías establecidas en ASHRAE 55. Considerando que el tiempo total en confort corresponde al tiempo en confort sumado al ligeramente fresco y ligeramente cálido, la vivienda presenta un porcentaje total de tiempo en confort de 45,8 % en la habitación estar (orientación sur) y un 48,9 % en el dormitorio 2 (orientación norte), con temperaturas mínimas de 9,8 °C y máximas entre 32,4 °C y 33,4 °C. En cuanto a la demanda de energía de climatización, para el total de la vivienda se alcanza una demanda anual de 12.184 KWh/año lo cual corresponde a 190 KWh/m²-año, ver Tabla 4-5.

Como se puede observar en el desglose, prevalece el disconfort por frío en el entorno del 30 % para ambas habitaciones, frente a un disconfort por calor en el entorno de 22 %, mientras que la demanda de calefacción es mayor que la de refrigeración, representando un 80,8 % de la demanda total.

Tabla 4-4. Análisis de tiempo en confort y temperaturas - Caso base clima actual

Caso	Hab	Frío	Ligera. Fresco	Confort	Ligera. Caluroso	Calor	Total confort	Tmin	Tmax
		%	%	%	%	%	%	°C	°C
A	Estar	31,3	5,9	31,9	8,0	22,9	45,8	9,8	33,4
	Dorm. 2	29,5	6,1	34,8	8,0	21,6	48,9	9,8	32,4

Tabla 4-5. Análisis de demanda anual de energía para calefacción y refrigeración - Caso base clima actual

Caso	Hab.	Demanda calefacción	Demanda refrigeración	Demanda Total
		KWh/año	KWh/año	KWh/año
A	Vivienda total	9.845	2.339	12.184

CASO BASE EN EL ESCENARIO FUTURO B1-2050

El escenario B1 en 2050 presenta un porcentaje total de tiempo en confort de 44,8 % en la habitación estar (orientación sur) y un 47,1 % en el dormitorio 2 (orientación norte) (Ver Tabla 4-6), con temperaturas mínimas de 10,6 °C y máximas entre 33,4 °C y 34,4 °C. En cuanto a la demanda para el total de la vivienda se alcanza una demanda anual de 11.799 KWh/año lo cual corresponde a 184 KWh/m² año (Ver Tabla 4-7).

Se observa que el desconfort por calor supera mínimamente al desconfort por frío en el entorno del 2,0 % en ambas habitaciones, mientras que la demanda de energía es mayor para calefacción que para refrigeración, representando la primera el 67,6 % de la demanda total.

Tabla 4-6. Análisis de tiempo en confort- Caso base - Escenario B1 2050

Caso	Hab	Frío	Ligera. Fresco	Confort	Ligera. Caluroso	Calor	Total confort	Tmin	Tmax
		%	%	%	%	%	%	°C	°C
A	Estar	26,4	6,2	31,6	7,0	28,8	44,8	10,6	34,4
	Dorm 2	25,3	6,6%	32,4	8,1	27,6	47,1	10,7	33,4

Tabla 4-7. Análisis de demanda anual de energía para acondicionamiento térmico- Caso base - Escenario B1 2050

Caso	Hab.	Demanda calefacción	Demanda refrigeración	Demanda Total
		KWh/año	KWh/año	KWh/año
A	Vivienda total	7.982	3.818	11.799

CASO BASE EN EL ESCENARIO FUTURO A2-2050

En el escenario A2 2050 el tiempo en confort representa el 44,1 % en la habitación estar (orientación sur) y un 47,2 % en el dormitorio 2 (orientación norte), con temperaturas mínimas de 11,2 °C y máximas entre 32,9 °C y 33,3 °C. En cuanto a la demanda para el total de la vivienda, se alcanza un valor anual de 11.466 KWh/año lo cual corresponde a 179 KWh/m² ·año (Ver Tabla 4-9).

Se observa que el desconfort por calor supera al desconfort por frío en un 10,0 % aproximadamente, mientras que para la demanda de energía, continúa siendo mayor la demanda de calefacción que de refrigeración, representando la primera el 62,2 % de la demanda total (Ver Tabla 4-8).

Tabla 4-8. Análisis de tiempo en confort- Caso base - Escenario A2 2050

Caso	Hab	Frío	Ligera. Fresco	Confort	Ligera. Caluroso	Calor	Total confort	Tmin	Tmax
		%	%	%	%	%	%	°C	°C
A	Estar	23,7	6,4	31,6	6,1	32,2	44,1	11,3	33,3
	Dorm 2	22,2	6,3	32,8	8,1	30,6	47,2	11,2	32,9

Tabla 4-9. Análisis de demanda anual de energía para acondicionamiento térmico- Caso base - Escenario A2 2050

caso	Hab.	Demanda calefacción	Demanda refrigeración	Demanda Total
		KWh/año	KWh/año	KWh/año
A	Vivienda total	7.137	4.330	11.466

Los resultados obtenidos permiten determinar la línea base para el estudio de mejoras, de ellos se desprende que es necesario estudiar medidas que respondan tanto a mejorar las condiciones en el período frío como en el período caluroso. Atendiendo al indicador de demanda de energía, la demanda de calefacción se presenta predominante, sin embargo, es necesario considerar mejoras que atiendan las condiciones del período caluroso siendo que la demanda de refrigeración presenta una tendencia en aumento en los escenarios futuros. Asimismo, el funcionamiento en oscilación libre de la vivienda impone la necesidad de considerar mejoras que atiendan al período caluroso en tanto el desconfort por calor superará el desconfort por frío en los escenarios futuros.

4.3 Mejoras térmicas y energéticas a evaluar

Se presentan a continuación la delimitación de las mejoras térmicas y energéticas a evaluar sobre el caso de estudio.

A partir de los resultados obtenidos en el apartado 4.1 y 4.2.2 y, atendiendo a la revisión bibliográfica presentada, se definieron las siguientes estrategias a estudiar: durante el invierno favorecer el ingreso de radiación al interior manteniendo libres de protecciones las ventanas y controlar las pérdidas de calor a través de la envolvente, aplicando mejoras en la transmitancia térmica (muros, cubierta y ventanas) y controlando las infiltraciones, es decir el ingreso de aire no controlado. Vale precisar que estas últimas se estudiaran sin afectar la calidad del aire interior para lo cual se considera siempre la ventilación mínima requerida para condiciones de salubridad (ASHRAE 2007).

Para el período caluroso, se consideró aplicar estrategias de sombreadamiento, limitando la radiación solar al interior y la ventilación, aplicando caudales de ventilación nocturna variable, como estrategia para disipar el calor acumulado en el interior.

Según la clasificación presentada las mejoras en la transmitancia y nivel de infiltraciones responden a la categoría de mejoras constructivas, mientras que la ventilación nocturna se consideró como estrategia operacional; el uso de protecciones solares si bien requiere de una mejora constructiva su efectividad depende de la operación por parte de los usuarios.

En todos los casos y debido a que la construcción inicial presenta un nivel de masa térmica que se considera favorable tanto para el período frío, asociándolo a estrategias de captación, como para el período caluroso, asociándolo al sombreadamiento, las intervenciones a realizar en la aislación de la envolvente se consideraron por el exterior de la vivienda dejando la masa térmica disponible. Adicionalmente se valoró que la aislación por el exterior permite una aislación continua con disminución de los puentes térmicos y disminución de ocurrencia de condensaciones, al mismo tiempo mejora las posibles fisuras que presenten las fachadas y evita tener que modificar las instalaciones (principalmente eléctricas que se encuentren en el paramento del lado interior), asimismo, no reduce los espacios interiores ni afecta al uso de los mismos durante la etapa de obra.

DELIMITACIÓN DE CASOS DE MEJORAS

Atendiendo a las estrategias anteriormente mencionadas se estudiaron los estándares y normativas en otros países con climas similares permitiendo identificar los parámetros de desempeño energético y niveles exigibles en cada una de ellas.

Los parámetros seleccionados para el análisis corresponden a los presentes en la normativa de Montevideo (transmitancia térmica de cerramientos opacos y vidriados) a los cuales se incorpora la permeabilidad al aire de ventanas o envolvente, según sea la normativa, de acuerdo a las estrategias seleccionadas. Además, se pudo constatar que las reglamentaciones relevadas presentan otros indicadores como ser transmitancia térmica de pisos, transmitancia térmica de cerramientos en contacto con el terreno, transmitancia térmica de particiones interiores, factor de exposición de radiación solar de huecos y lucernarios, límite de condensaciones superficiales e intersticiales. Destacándose en las normativas relevadas, la incorporación de indicadores de desempeño a través de niveles límite de la demanda de energía. En el caso del estándar chileno incorpora también un índice de masa térmica, y cálculo de puentes térmicos, garantizar el acceso de radiación directa en el solsticio de invierno y garantizar sombreadamiento en el solsticio de verano (Municipalidad de Rosario 2011; Código Técnico de la Edificación (CTE) 2017; MINVU 2016). En la Tabla 4-10, en la

Tabla 4-11 y en la Tabla 4-12 se presentan los rangos exigibles para los parámetros seleccionados.

Vale mencionar que las normativas citadas, incorporan en su alcance en mayor o menor medida construcciones existentes, aspecto que la normativa nacional al momento no contempla.

Tabla 4-10. Normativa Rosario-Argentina - En base a Municipalidad de Rosario (2011)

		NIVEL A			NIVEL B		
Transmitancia térmica (W/m ² K)	Muros y opacos	0,50			1,00		
	Cubiertas	0,32			0,48		
Transmitancia térmica Ventanas (W/m ² K)	% máx huecos por fachada	N	E/O	S	N	E/O	S
	0 a 20 %	4,0	3,5	4,0	5,7	5,0	5,7
	21 a 40 %	2,8	2,5	2,8	4,0	3,6	4,0
	41 a 60 %	2,0	1,8	2,0	3,0	2,8	3,0
Permeabilidad al aire (m ³ /h-m)	Ventanas	Mejorada: 3			Medio: 5		

Tabla 4-11. Estándar Chileno Código de Construcción Sustentable - En base a MINVU (2016)

		ZONA C			ZONA D		
Transmitancia térmica (W/m ² K)	muros y opacos	0,80			0.80		
	cubiertas	0,47			0.38		
Transmitancia térmica Ventanas (W/m ² K)	% máx huecos por fachada	N	E/O	S	N	E/O	S
		50%	30%	40%	50%	40%	30%
		3,6			3.6		
Permeabilidad al aire (n50 ACH)	Envolvente	5,00			5,00		

Tabla 4-12. Normativa Española. En base a Código Técnico de la Edificación (CTE) (2017)

		ZONA A	ZONA B
Transmitancia térmica (W/m ² K)	Muros	1,25	1.00
	Cubiertas	0,80	0.65
	Huecos (conjunto vidrio y marco)	5,70	4.2
Permeabilidad al aire (m ³ /h·m ² a 100Pa)	Ventanas	<50	<50

De las reglamentaciones presentadas se desprende que para el caso de cubiertas la transmitancia exigida en todos los casos es menor que la nacional, en cambio, en muros las exigencias son similares e incluso superiores a 0,85 W/m²K exigido en Montevideo, exceptuando la categoría más rigurosa de Rosario. La transmitancia térmica de ventanas y porcentaje de huecos por fachada varía según la normativa siendo la que presenta mayor exigencia y detalle la normativa argentina.

Basado en la normativa nacional y en reglamentaciones internacionales estudiadas se delimitó el rango de los niveles de mejora en la envolvente térmica a estudiar, ver Tabla 4-13. Para la evaluación se descartaron los niveles de transmitancia que superan los exigidos por la reglamentación vigente; los niveles de infiltraciones se consideraron en base al estándar de Chile que evalúa el conjunto de la hermeticidad de la envolvente y un nivel más exigente aún de 1,0 ACH.

El análisis de los períodos en que se produce desconfort por calor en el caso base y su estudio en relación a las condiciones exteriores de temperatura permitieron definir los niveles y períodos de ventilación, estableciendo como condición que exista una diferencia de al menos 2 °C entre exterior e interior. Como resultado se obtuvo que las horas con mayor capacidad de ventilación son entre las 22:00 hs y las 9:00 hs entre diciembre y marzo, los niveles a evaluar se fijaron en 2,7 l/s·m² y 5,3 l/s·m², para niveles superiores se constató que la reducción respecto a los 5,3 l/s·m² es despreciable.

De los criterios establecidos se desprenden las variables para cada mejora a considerar según se presenta en la Tabla 4-14.

Tabla 4-13. Rangos de mejoras a implementar sobre la envolvente del caso base.

		Min.	Máx.
Transmitancia térmica (W/m ² K)	Muros	0,50	0,85
	Cubiertas	0,32	0,85
	Ventanas	2,50	5,70
Permeabilidad al aire de la envolvente (n50 ACH)		1,0	8,2

Tabla 4-14. Mejoras constructivas y operacionales a evaluar

	Medidas de mejoramiento	Nivel	Características	Descripción
Mejoras constructivas	U Cubierta (W/m ² K)	3,40	Sin aislación	Caso base
		0,85	EPS 3,0 cm	Por normativa nacional, disponible en mercado nacional
		0,61	EPS 5,0 cm	Material disponible en el mercado nacional
		0,47	EPS 7,0 cm	Material disponible en el mercado nacional
		0,32	EPS 11,0 cm	Por normativa internacional
	Aislación de cerramientos U Muros (W/m ² K)	2,62	Sin aislación	Caso base
		0,85	EPS 3,0 cm	Por normativa nacional, disponible en mercado nacional
		0,61	EPS 5,0 cm	Por normativa nacional, disponible en mercado nacional
		0,50	EPS 6,5 cm	Por normativa internacional
		5,80	Vidrio simple Hierro	Caso base
	U Ventanas (W/m ² K)	5,80	Vidrio simple Perfilería de aluminio	Mantiene nivel de transmitancia pero mejora permeabilidad al aire
		2,70	DVH 5-12-4 Perfilería de aluminio / PVC	Por normativa nacional e internacional. Mejora transmitancia y permeabilidad al aire
		8,2	-	Caso base
	Hermeticidad de la envolvente (ACH)	5,0	Sustitución de ventanas	Por normativa internacional
1,0		Sustitución de ventanas y burletes	Referencia internacional	
0%		-	Caso base	
Mejoras operacionales	Sombreamiento de cerramientos transparentes	100%	Cortinas de enrollar de PVC exterior	Activos de noviembre a marzo cuando Text > 19°C y la radiación solar incidente > 120W/m ²
		2,5lt/s-persona + 0,3 l/s·m ²	Higiénica	Caso base. ANSI/ASHRAE 2007.
	Ventilación	2,7 l/s·m ²	4 ACH	Ventilación nocturna entre diciembre y marzo de 22:00 a 9:00 hs
		5,3 l/s·m ²	8 ACH	

4.4 Evaluación de desempeño térmico y energético de mejoras

En la presente sección se exponen en primer lugar los resultados de desempeño energético obtenidos de la combinación multivariable de las mejores determinadas en el apartado 4.3, para los tres escenarios climáticos analizados; en segundo lugar se selecciona un conjunto de casos, en base a los criterios establecidos, para analizar los mismos bajo el modelo de confort adaptativo en cada escenario. Finalmente, se evalúan comparativamente los resultados obtenidos por ambos indicadores considerando el periodo de uso de la vivienda.

4.4.1 Estudio multivariable de mejoras

Los resultados del proceso de combinación multivariable permitieron obtener las combinaciones posibles entre las variables estudiadas con sus respectivas demandas de refrigeración y de calefacción, a partir de ellas se calculó la demanda total para cada caso.

De los casos resultantes en todos los escenarios climáticos, se observó que ciertas soluciones presentaban diferencias mínimas entre sí (Ventana con marco de aluminio y DVH frente a las ventanas con marco de PVC y DVH; ventanas de hierro con vidrio simple frente a las de aluminio con vidrio simple). Con el objetivo de simplificar los casos se consideró descartar los casos de ventanas en aluminio con DVH debido a que las ventanas con perfilería en PVC presentan adicionalmente la ventaja de disminuir la condensación superficial, y en los casos con vidrio simple la perfilería se consideró según el caso modifique o no el nivel de infiltraciones, se asumieron ventanas de hierro con vidrio simple para los casos con infiltraciones de 8,2 ACH (n50), y de aluminio con vidrio simple para los casos en que se modifican las ventanas mejorando el nivel de infiltraciones. Además se descartaron las combinaciones con infiltraciones de 1,0 ACH (n50) con ventanas de hierro con vidrio simple; debido a que para lograr este nivel de infiltraciones será necesario ventanas con menores niveles de permeabilidad al aire que las instaladas, y los casos de ventanas de PVC/DVH con infiltraciones de 8,2 ACH (n50) puesto que este tipo de ventanas implican una reducción de las infiltraciones. La Figura 4-7, la Figura 4-8 y la Figura 4-9 presentan el conjunto de casos combinados para cada escenario climático donde se identifica en cada uno la proporción correspondiente de demanda de calefacción y demanda de refrigeración en el total de la demanda. En los mismos, también se incorporan los casos seleccionados que se detallan más adelante.

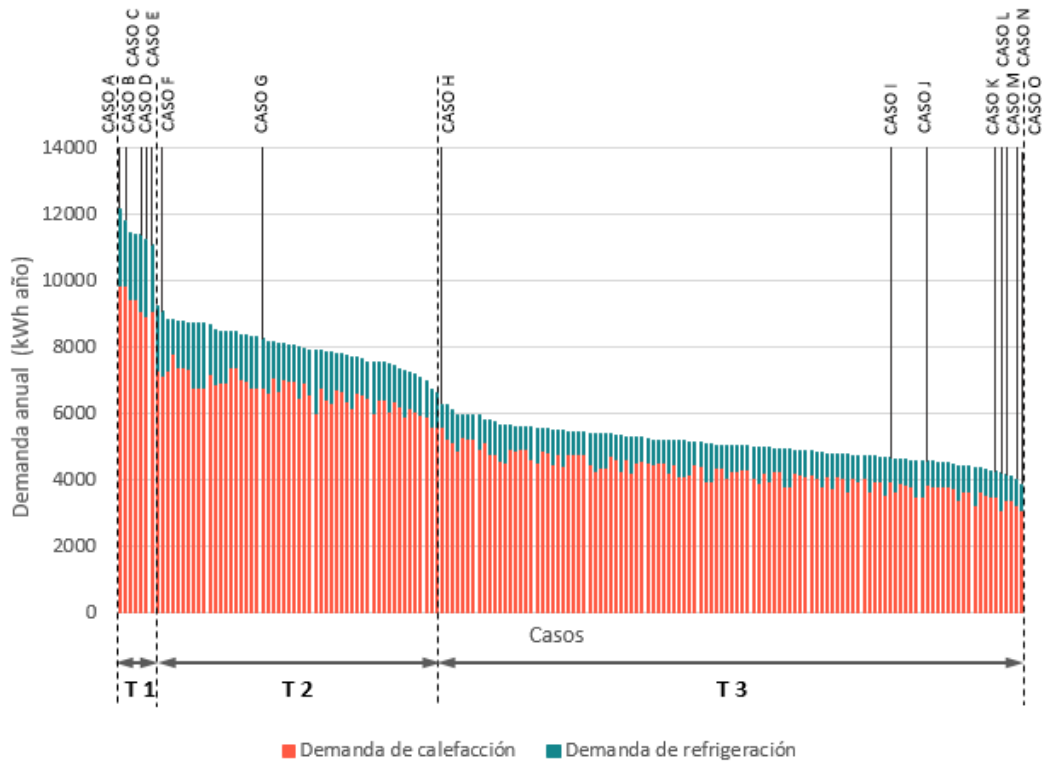


Figura 4-7. Demanda de refrigeración, calefacción y total para casos de mejoras. Clima actual

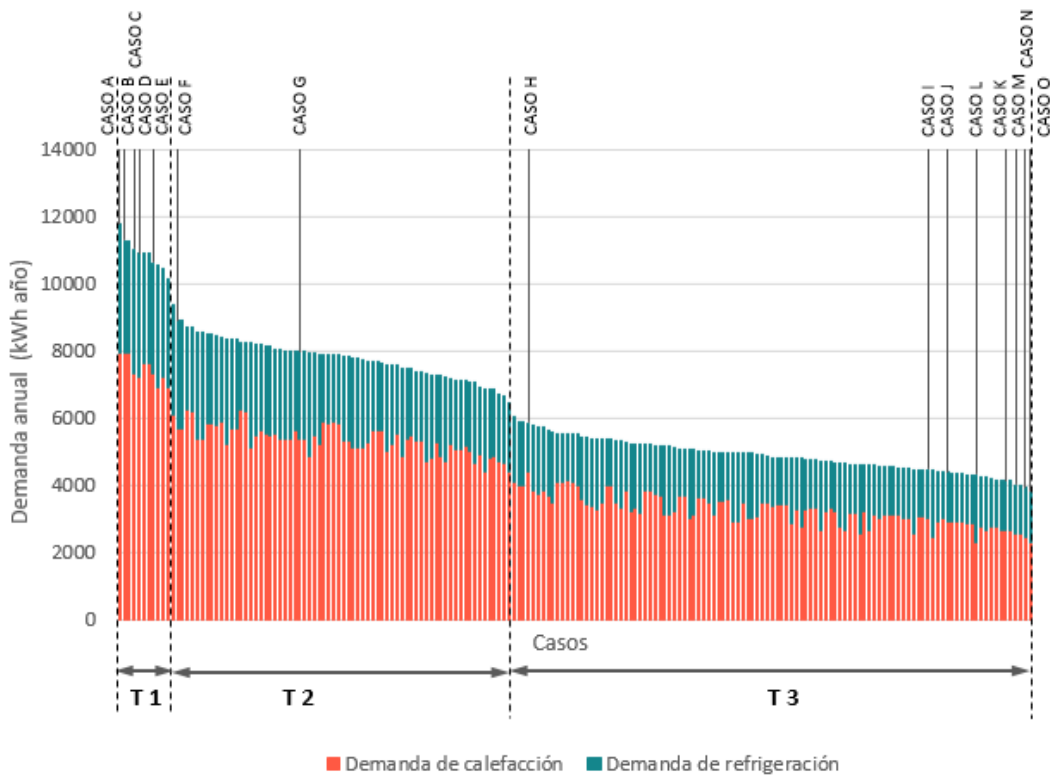


Figura 4-8. Demanda de refrigeración, calefacción y total para casos de mejoras. Escenario clima B1-2050

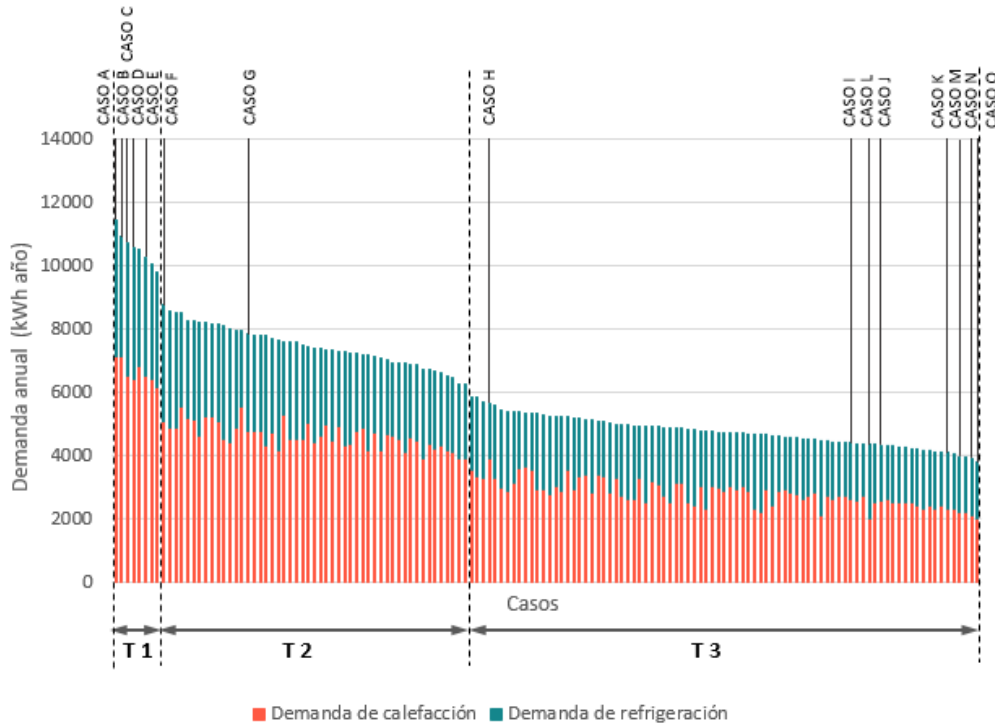


Figura 4-9. Demanda de refrigeración, calefacción y total para casos de mejoras. Escenario clima A2-2050

Se puede observar en los tres escenarios climáticos que las curvas de demanda de energía presentan tres “tramos” identificables por el cambio de curvatura los cuales responden en los tres escenarios a las siguientes características. El Tramo 1 (T1) presenta casos con cambio en el tipo de ventana, vidrio, protección solar y nivel de infiltraciones sin mejoras sobre los cerramientos opacos. El segundo tramo (T2), incorpora además de estas variables las mejoras sobre la envolvente opaca, en algunos casos en muros y en otros en techos, en ninguno de los casos se combinan mejoras sobre muros y techos simultáneamente. El Tramo 3 (T3) presenta la combinación de todas las variables, con valores de transmitancia térmica en muros entre 0,50 y 0,85 W/m²K y de cubiertas entre 0,32 y 0,85 W/m²K combinando las ventanas de marco de hierro, PVC o aluminio con vidrios simple o DVH, diferentes niveles de infiltraciones y protecciones solares inactivas durante todo el año o activas bloqueando el 100% frente a la radiación incidente frente a las condiciones establecidas.

La Figura 4-7, la Figura 4-8 y la Figura 4-9 permiten identificar también como la demanda de refrigeración y la de calefacción varían, por un lado, dentro de cada escenario los casos del T3 son los que presentan menores niveles de ambas demandas mientras que el T1 es el que mayores niveles presenta. Por otra parte, se identifica que en todos los casos la demanda de calefacción es mayor que la de refrigeración y que ésta última aumenta para los escenarios climáticos futuros B1 y A2.

En la Tabla 4-15 se presentan los rangos en la demanda anual que se obtuvieron para cada tramo según el escenario climático. Se puede observar que para el T1 en el escenario actual oscilan entre 11.075 y 12.184 KWh/año, para el B1 entre 10.183 y 11.799 KWh/año y, entre 9.822 y 11.466 KWh/año para el A2. En el caso del T2 en el escenario actual los niveles de demanda anual varían entre 6.749 y 9.253 KWh/año, entre 6.480 y 9.394 KWh/año para el B1 y 6.289 y 8.775 KWh/año para el A2. En los casos del T3 la demanda anual actual presenta un rango entre 3.877 y 6.624 KWh/año, para el B1 entre 3.831 y 6.095 KWh/año y en el A2 entre 3.804 y 5.870 KWh/año. En efecto, las mejoras individuales sin modificar transmitancia de opacos (T1) implican una reducción respecto al caso base de hasta un 9,1 % en el clima actual y hasta un 14,3 % en los escenarios futuros. Las mejoras que incluyen además intervenciones sobre los muros o cubierta (T2) alcanzan reducciones de entre 23,5 % y 45,2 % considerando todos los escenarios. Por último, en las mejoras que incorporan todas las variables en sus diferentes niveles (T3) las reducciones respecto al caso base oscilan en un mínimo entre 45,6 % y 48,8 %, y un máximo entre 66,8 % y 68,2 % dependiendo del escenario climático (ver Tabla 4-16).

Se puede indicar que por tanto, que las soluciones que presentan mejores resultados actuales y futuros se corresponden con las mejoras combinadas comprendidas en el T3.

Tabla 4-15. Rangos de demanda anual de energía para acondicionamiento térmico por tramos y escenarios climáticos.

	Límite	Escenario climático		
		Actual KWh/año	B1 kWh /año	A2 KWh/año
Tramo 1	Mín	11.075	10.183	9.822
	Máx	12.184	11.799	11.466
Tramo 2	Mín	6.749	6.480	6.289
	Máx	9.253	8.939	8.776
Tramo 3	Mín	3.877	3.831	3.804
	Máx	6.624	6.095	5.870

Tabla 4-16. Variación de la demanda anual de energía para acondicionamiento térmico respecto al caso base por tramos y escenarios climáticos.

		Escenario climático		
		Actual	B1	A2
Tramo 1	Máx reducción	- 9,1%	-13,7%	-14,3%
	Mín reducción	-24,1%	-24,2%	-23,5%
Tramo 2	Máx reducción	-44,6%	-45,1%	-45,2%
	Mín reducción	-45,6%	-48,3%	-48,8%
Tramo 3	Máx reducción	-68,2%	-67,5%	-66,8%

Del conjunto de posibles combinaciones de mejoras, en la Tabla 4-17 se presentan los casos seleccionados a estudiar indicando las características por las cuales se seleccionaron, estos casos también se identifican en la Figura 4-7, en la Figura 4-8 y en la Figura 4-9. El criterio general fue considerar casos con diferentes niveles de demanda, los que representan: las menores demandas, los materiales con mayor disponibilidad actual en el mercado nacional, las exigencias normativas y los casos de mejoras individuales. Este conjunto de casos permite evaluar de forma conjunta el potencial que se puede obtener y el nivel del cual se parte. Sobre el caso individual y a los casos con medidas combinadas del T3 se les aplicó como mejora adicional un incremento en la ventilación con valores de 2,7 l/s·m² y 5,3 l/s·m² con el objetivo de reducir el sobrecalentamiento.

Tabla 4-17. Identificación de casos de estudio

Casos		U	U	Ventanas marco/vidrio	Inf. ACH n50	Prot. Solares	Ventilación tipo	Criterio de selección	
		muro (W/m²K)	techo (W/m²K)						
Base	A	2,62	3,40	Hierro / VS	8,2	-	2,5lt/s-persona + 0,3 l/s·m²	caso base	
Mejoras individuales	T 1	B	2,62	3,40	Hierro / VS	8,2	100%	2,5lt/s-persona + 0,3 l/s·m²	Incorpora protección solar
		C	2,62	3,40	PVC / DVH	5	-		Cambio de ventanas
		D	2,62	3,40	Aluminio / VS	1	-		Reducción de infiltraciones
	T 2	E	2,62	3,40	PVC / DVH	5	100%	2,5lt/s-persona + 0,3 l/s·m²	Cambio integral de ventana
		F	0,50	3,40	Hierro / VS	8,2	-		Incorpora aislación en muro
		G	2,62	0,32	Hierro / VS	8,2	-		Incorpora aislación en techo
Mejoras combinación	T 3	H	0,85	0,85	Hierro / VS	8,2	100%	2,5lt/s-persona + 0,3 l/s·m²	Niveles normativa vigente
		I	0,61	0,47	PVC / DVH	5	100%		Mayor disponibilidad en el mercado actual
	J	0,50	0,32	PVC / DVH	8,2	100%	Menor demanda con mayores infiltraciones		
	K	0,50	0,32	PVC / DVH	5	100%	Menor demanda con nivel medio de infiltraciones		
	L	0,50	0,32	PVC / DVH	1	-	Menor demanda sin uso de protecciones solares		
	M	0,50	0,32	Aluminio / VS	1	100%	Baja demanda - 3er lugar menor demanda		
	N	0,61	0,32	PVC / DVH	1	100%	Baja demanda - 2do lugar menor demanda		
	O	0,50	0,32	PVC / DVH	1	100%	Menor demanda total y DC		
Mejoras combinadas con un incremento de ventilación nocturna de 4 ACH (*)									
Base	A1	2,62	3,4	Hierro / VS	8,2	-	2,7 l/s·m²		
Mejoras combinación + ventilación (4ACH)		H 1	0,85	0,85	Hierro / VS	8,2	100%	2,7 l/s·m²	
		I 1	0,61	0,47	PVC / DVH	5	100%	2,7 l/s·m²	
		J 1	0,50	0,32	PVC / DVH	8,2	100%	2,7 l/s·m²	
		K 1	0,50	0,32	PVC / DVH	5	100%	2,7 l/s·m²	
		L 1	0,50	0,32	PVC / DVH	1	-	2,7 l/s·m²	
		M 1	0,50	3,40	Hierro / VS	8,2	-	2,7 l/s·m²	
		N 1	0,61	0,32	PVC / DVH	1	100%	2,7 l/s·m²	
		O 1	2,62	3,40	PVC / DVH	5	100%	2,7 l/s·m²	
Mejoras combinadas con un incremento de ventilación nocturna de 8 ACH(*)									
base	A2	2,62	3,40	Hierro / VS	8,2	-	5,3 l/s·m²		
Mejoras combinación + ventilación (8ach)		H 2	0,85	0,85	Hierro / VS	8,2	100%	5,3 l/s·m²	
		I 2	0,61	0,47	PVC / DVH	5	100%	5,3 l/s·m²	
		J 2	0,50	0,32	PVC / DVH	8,2	100%	5,3 l/s·m²	
		K 2	0,50	0,32	PVC / DVH	5	100%	5,3 l/s·m²	
		L 2	0,50	0,32	PVC / DVH	1	-	5,3 l/s·m²	
		M 2	0,61	0,32	PVC / DVH	1	100%	5,3 l/s·m²	
		N 2	0,61	0,32	PVC / DVH	1	100%	5,3 l/s·m²	
		O 2	0,50	0,32	PVC / DVH	5	100%	5,3 l/s·m²	

(*) Ventilación nocturna entre diciembre y marzo de 22:00 a 9:00 hs

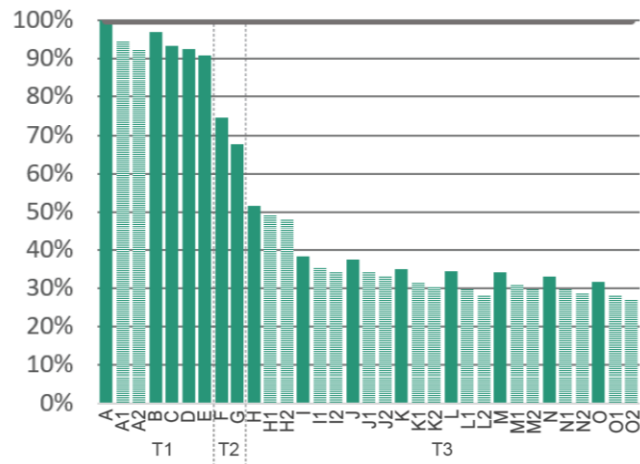
4.4.2 Análisis de casos por demanda de energía para acondicionamiento térmico

Este apartado corresponde al análisis comparativo de los casos de mejoras seleccionados en Tabla 4-17 bajo el indicador de demanda de energía para acondicionamiento térmico. Se analizó la demanda total y, la demanda para calefacción y refrigeración de forma independiente para cada uno de los escenarios climáticos definidos en 3.2.1, basadas en las temperaturas de consigna establecidas en la EN 16798.

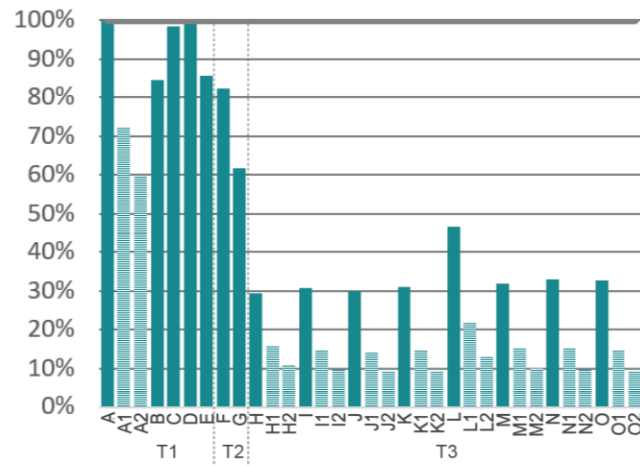
En la Figura 4-10 y en la Figura 4-11, más adelante, se presentan los resultados obtenidos en cada caso en relación al base “Caso A”. Se asume que el 100% de la demanda en cada situación corresponde al caso base y cada caso de mejora se expresa en relación a este, de forma de identificar fácilmente la incidencia de las mismas, en el ANEXO B se adjunta el detalle de los resultados.

En las mejoras individuales, T1 y T2 casos del A al G, se destaca que la que tiene mayor incidencia es la mejora de la transmitancia del techo ($U=0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ - Caso G) obteniendo una reducción de la demanda total del 32,0% en todos los escenarios. En segundo lugar, la mejora en la transmitancia de muros ($U=0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$ - Caso F) alcanza una reducción de entre 23,5 % y 25,4 % dependiendo del escenario climático. En relación a la mejora de ventanas se observa, que si el cambio es completo (Caso E), es decir afecta la transmitancia, las infiltraciones e incorpora protección solar, se obtiene una reducción entre el 9,1 % y el 10,2 % de la demanda total dependiendo del escenario. Por su parte, las infiltraciones (Caso D), presentan una reducción media de 7,5 % de la demanda total en todos los escenarios (Ver Figura 4-10(a) y Figura 4-11 (a y d)).

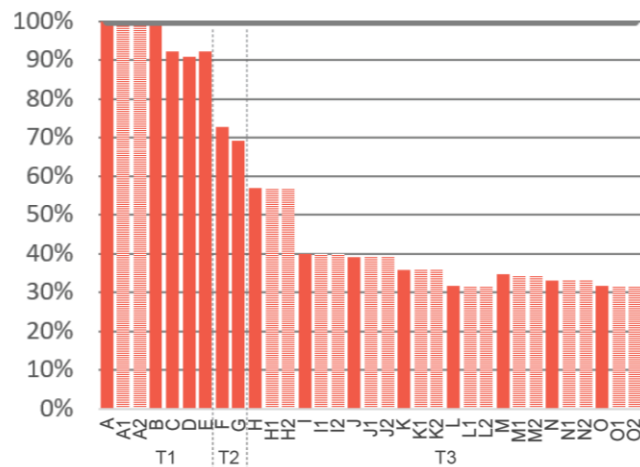
La descomposición por tipo de demanda, indicó que el caso G presentó un comportamiento variable según el escenario, en el clima actual tiene mayor incidencia en la reducción de la demanda de refrigeración (38,3 %) que sobre la calefacción (30,8 %), en escenarios futuros disminuye la diferencia, revirtiendo la tendencia en el A2 (con una reducción del 32,7 % en calefacción y del 29,5 % en refrigeración). El caso F tiene mayor incidencia en la reducción de la demanda de calefacción (entre 27,2 % y 28,7 %) que de refrigeración (entre 14,8 % y 17,8 %) en todos los escenarios. El caso E presentó mayor incidencia sobre la demanda de refrigeración (entre 13,3 % y 14,5 %) que sobre la de calefacción (entre 7,8 % y 8,3 %) en todos los escenarios. Y el Caso D para el clima actual solo tiene incidencia en la reducción de la demanda de calefacción (9,5 %) mientras que en los escenarios futuros introduce además una leve disminución en la demanda de refrigeración (entre 3,0 % y 4,0%), (Ver Figura 4-10(b y c) y Figura 4-11 (b,c,e y f)).



(a)



(b)



(c)

Figura 4-10. Demanda por caso de estudio en relación al caso base, Clima actual: (a) Demanda total (b) Demanda de refrigeración (c) Demanda de calefacción



Figura 4-11. Demanda por caso de estudio en relación al caso base, Escenario B1: (a) Demanda total (b) Demanda de refrigeración (c) Demanda de calefacción, Escenario A2: (d) Demanda total (e) Demanda de refrigeración (f) Demanda de calefacción

En las mejoras combinadas (T3), casos de la H a la O sin ventilación nocturna, se distingue el caso H (niveles de normativa actual) por ser el que presenta peor desempeño, generando una reducción de la demanda global respecto al Caso A de entre 48,3 % y 50,4 % según el escenario, mientras que el resto de los casos de este tramo alcanzan reducciones de entre 61,4 % y 68,2 % (Ver Figura 4-10(a) y Figura 4-11 (a y d)).

Disgregando la información, en términos de refrigeración alcanzan todos los casos del T3 una reducción de la demanda similar respecto al Caso A (con variaciones entre ellas de 4,0 % en clima actual y 1,0 % en escenarios futuros A2 y B1); el Caso L (sin protecciones solares) representa la excepción donde la demanda de refrigeración es mayor (Ver Figura 4-10(b) y Figura 4-11 (b y e)). En cambio, la demanda de calefacción presenta más variación siendo el Caso H el de mayor demanda de los casos de mejoras combinadas y el Caso O el de menor demanda, las diferencias entre ellos en relación al caso base se encuentran entre 25% y 27% dependiendo del escenario (Ver Figura 4-10(c) y Figura 4-11 (c) y (f)).

El uso de ventilación nocturna con un caudal de 2,7 l/s·m² puede suponer una reducción de la demanda total si se considera como mejora individual (Caso A1) del 5,2 % en el clima actual y B1 y del 8,3 % en el A2; en combinación con otras mejoras las reducciones alcanzan entre 50,9 % y 71,6 % en el clima actual, entre 52,7 % y 71,0 % en B1 y, entre 56,1 % y 73,6 % en A2. Respecto a un caudal de 5,3 l/s·m² se obtienen reducciones como mejora individual (Caso A2) de 6,8 % en el clima actual, del 7,6 % en el B1 y del 12,1 % en el A2; en combinación con otras mejoras, las reducciones varían entre 51,8 % y 72,7 % en el clima actual, entre 54,2 % y 72,8 % en B1 y entre 58,2 % y 75,9 % en A2. En ambos niveles de ventilación y en todos los escenarios climáticos el Caso O es el que presenta mejores resultados.

Si ahora se comparan los casos con ventilación nocturna con los mismos casos sin ventilación, se observan reducciones, con un caudal de 2,7 l/s·m², de entre 5,0 % y 13,9 % para clima actual y B1, y entre 11,3 % y 21,7 % en el A2; para un caudal de 5,3 l/s·m² de ventilación nocturna disminuye entre 7,6 % y 18,5 %, entre 6,8 % y 16,2 % y entre 15,8 % y 30,3 % en cada escenario respectivamente.

De estos resultados se desprende que las mejoras combinadas disminuyen tanto los niveles de demanda de refrigeración como los de calefacción respecto al caso base, identificando que las medidas de aislación y hermeticidad de la envolvente tienen mayor incidencia sobre la demanda de calefacción que sobre la demanda de refrigeración. A partir de cierto nivel (en los casos

seleccionados corresponde al caso H) se constata que mayores niveles de aislación (en muros, techos y ventanas) y hermeticidad generan una menor demanda de calefacción, en cambio no suponen una reducción de la demanda de refrigeración; y que frente a estos casos las protecciones solares destacan por ser la variable con mayor incidencia sobre la demanda de refrigeración (Caso L).

Por otra parte, se constató que el uso de la vivienda en modo mixto, refrigeración diurna -ventilación nocturna, logra reducir significativamente la demanda de refrigeración en todos los escenarios, sin embargo, por la incidencia del período de refrigeración en el total de la demanda, la incidencia sobre la demanda total es menor.

Estos resultados concuerdan con las observaciones realizadas en estudios anteriores para climas similares, Pérez-Andreu et al, (2018a) concluyó que para un clima mediterráneo como el de Valencia (aún con niveles iniciales más exigentes que los estudiados en esta investigación), las protecciones solares, el aumento del aislamiento térmico y las reducciones en las infiltraciones son las estrategias con mayor incidencia en la demanda global mientras que los marcos de las ventanas y el tipo de vidrios juegan una incidencia menor. En otro estudio realizado en Santa Rosa -Argentina con un clima en la transición entre Cfa y Bsk, Filippín et al, (2017) mostraron que el incremento de la aislación en paredes y techos tiene incidencia directa sobre la reducción de la demanda en invierno y en verano, y que asociado a la mejora en la aislación las mayores reducciones se logran con sombra completa y ventilación nocturna, concluyendo que esta última es la de mayor importancia. Una diferencia encontrada con esta última investigación, es la incidencia del incremento de la aislación en paredes sin incluir aislación en techos, de acuerdo a esta autora la incorporación individual de esta mejora repercute en un aumento de consumo de energía debido a las altas temperaturas alcanzadas en el techo en verano; los resultados obtenidos en la presente investigación demostraron que el incremento individual de la aislación en muros (Caso F) presenta una reducción en la demanda de energía tanto de refrigeración como de calefacción.

4.4.3 Análisis de casos por confort térmico

La presente sección expone los resultados de los casos seleccionados (ver Tabla 4-17) bajo el modelo de confort adaptativo ASHRAE 55-2017, aplicando los rangos de confort determinados en el apartado 4.1.

En la Figura 4-12, en la Figura 4-13 y en la Figura 4-14 presentadas a continuación, se comparan los datos obtenidos de tiempo en confort, disconfort por calor y por frío de los casos estudiados en relación al caso base, en el ANEXO C se adjunta el detalle de los resultados.

Las mejoras individuales sin considerar la ventilación nocturna (Casos del A al G), presentaron aumentos inferiores al 5,0 % del tiempo en confort respecto al caso base, en todos los casos y escenarios climáticos. Por su parte, la ventilación nocturna aplicada sobre el Caso A destaca con un incremento del tiempo en confort de entre 5,5 % y 7,2 % para 2,7 l/s-m² y entre 10,3 y 12,0 % para 5,3 l/s-m², según el escenario (Ver Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14: a y b).

Disgregando el análisis para las mejoras individuales, se obtuvo para todos los escenarios un leve aumento del tiempo en disconfort por calor para los casos C, D y F (inferiores a 2,5 %) y una disminución en los casos B, E y G (menores a 4,5 %); por tanto aumentó el disconfort en casos sin protecciones solares y aislación en muros, y mejoró en casos con protecciones solares y aislación en techos. La incorporación de ventilación nocturna en el caso base logró reducir el disconfort por calor entre 5,5 % y 8,0 % para un nivel de 2,7 l/s-m² y entre 9,7 % y 12,4 % para un nivel de 5,3 l/s-m², según el escenario (Ver Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14: b y d). El disconfort por frío, por su parte, presentó para todos estos casos niveles iguales o menores que el caso base (entre 0% y -4,2 %), esto se debe principalmente a que se reducen las ganancias solares (Ver Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14: c y f).

Las mejoras combinadas (T3), sin considerar la ventilación nocturna, presentaron un incremento del tiempo en confort para los tres escenarios y ambas habitaciones; resultando en aumentos entre 6,2 % y 8,4 % en el estar y entre 11,3 % y 20,2 % en el dormitorio; el caso L (mejora en la aislación y hermeticidad de la envolvente, sin protecciones solares) fue la excepción, con un menor incremento entre 2,5 % y 7,6 % según el escenario y habitación (Ver Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14: a y b).

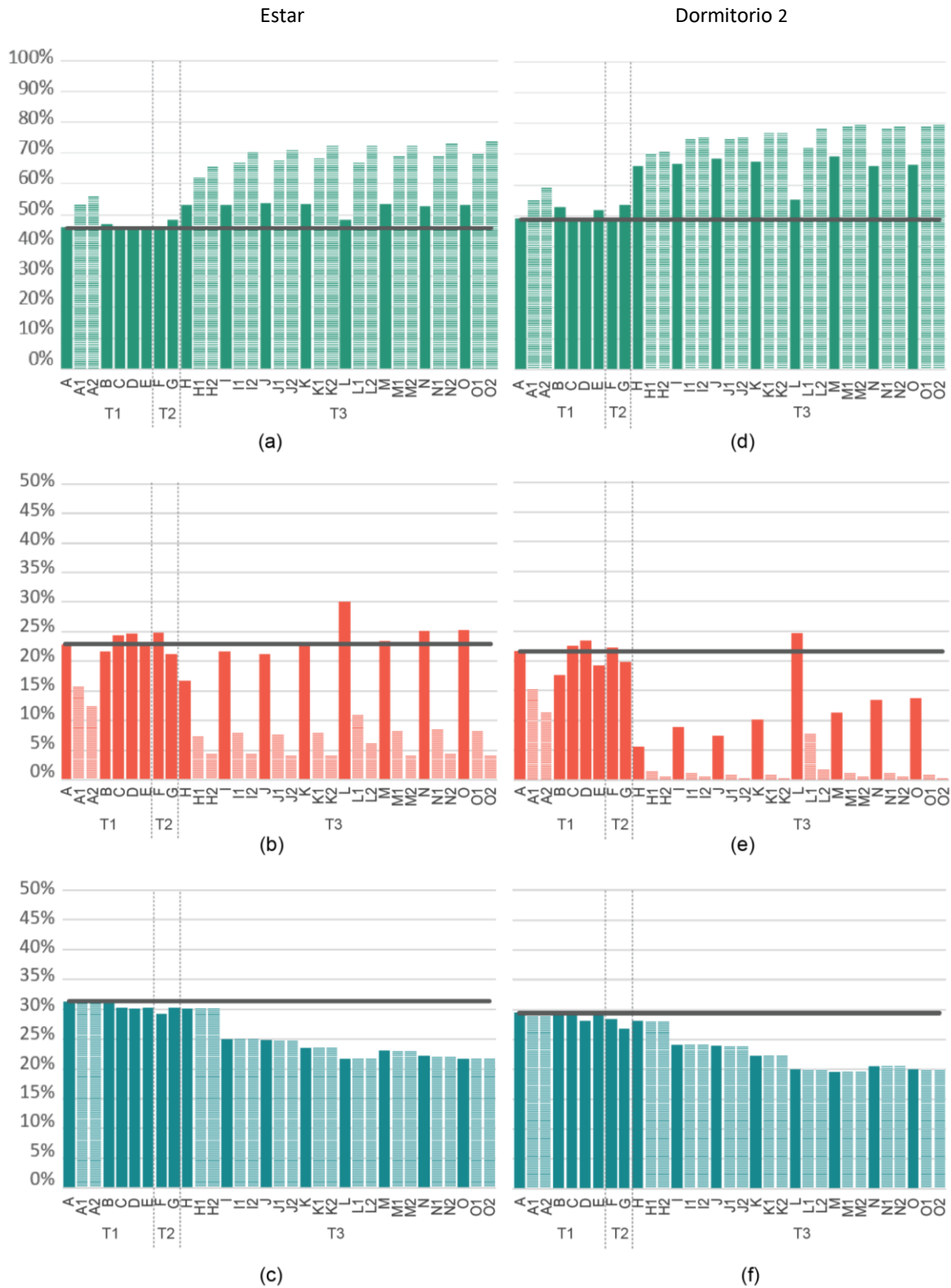


Figura 4-12. Porcentaje de tiempo en confort o desconfort por caso de estudio en relación al caso base, Escenario clima actual, Estar: (a) Tiempo total en confort (b) Tiempo en desconfort por calor (c) Tiempo en desconfort por frío, Dormitorio 2: (d) Tiempo total en confort (e) Tiempo en desconfort por calor (f) Tiempo en desconfort por frío.



Figura 4-13. Porcentaje de tiempo en confort o desconfort por caso de estudio en relación al caso base, Escenario clima B1 2050, Estar: (a) Tiempo total en confort (b) Tiempo en desconfort por calor (c) Tiempo en desconfort por frío, Dormitorio 2: (d) Tiempo total en confort (e) Tiempo en desconfort por calor (f) Tiempo en desconfort por frío.

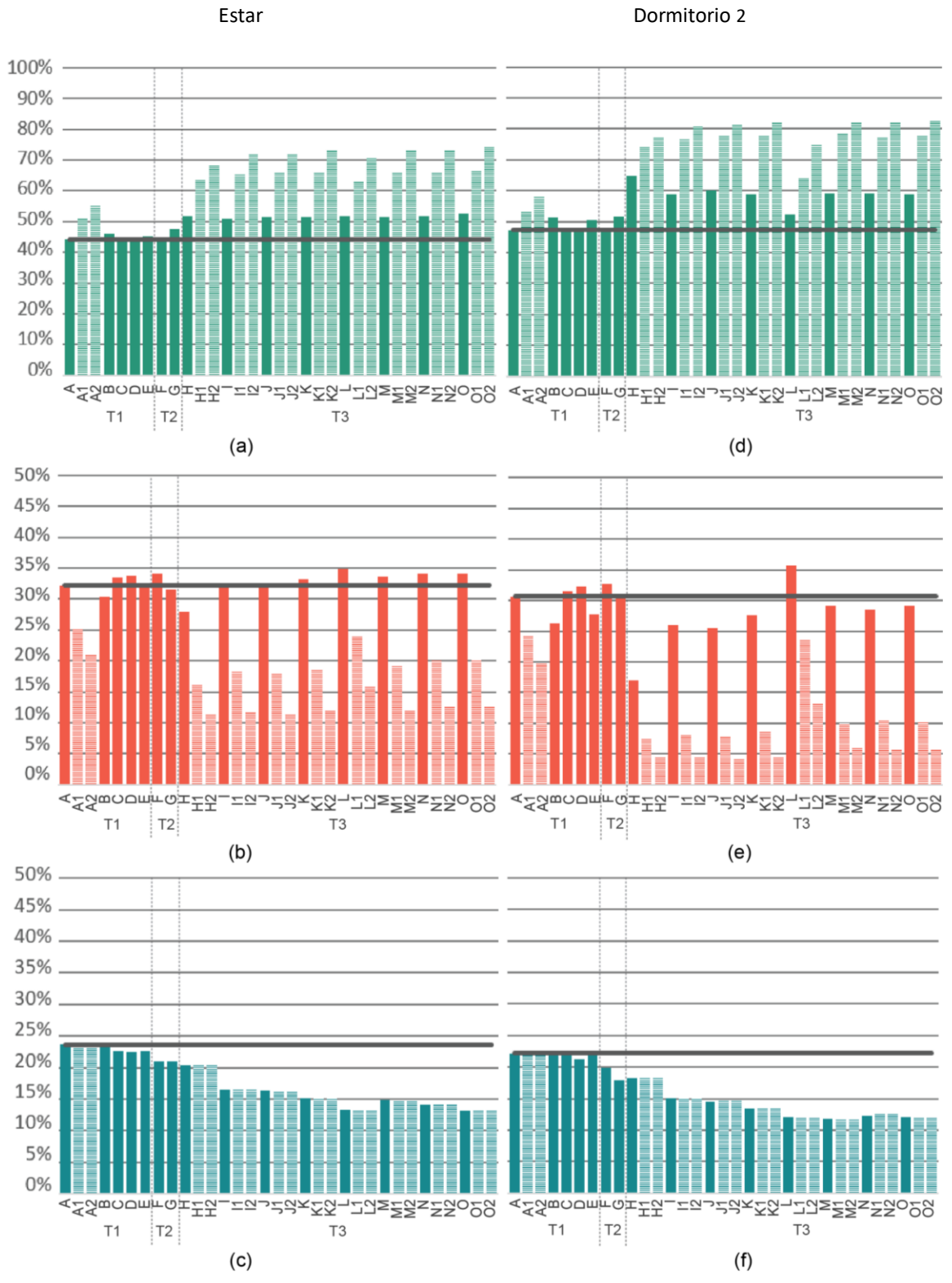


Figura 4-14. Porcentaje de tiempo en confort o discomfort por caso de estudio en relación al caso base, Escenario clima A2 2050, Estar: (a) Tiempo total en confort (b) Tiempo en discomfort por calor (c) Tiempo en discomfort por frío, Dormitorio 2: (d) Tiempo total en confort (e) Tiempo en discomfort por calor (f) Tiempo en discomfort por frío.

En los resultados obtenidos para el tiempo en discomfort por calor de los casos del T3, se constató que el caso H (representativo de la normativa actual) se destaca por ser el de menores niveles para ambas habitaciones, con una reducción entre 3,6 % y 16,0 % respecto al Caso A; por el contrario, el caso L (mejora en la aislación y hermeticidad, sin uso de protecciones solares) distingue por ser el de mayor aumento entre 2,7 % y 7,0 %. En el estar, según el escenario, los casos I y J, varían entre +1,0 % y -1,6 % respecto al caso A, y los casos K,M,N y O entre + 0,1 % y +3,8 %; mientras que para el dormitorio, todos estos casos, significan una disminución del tiempo en discomfort por calor respecto al caso base, entre 1,5% y 14,2 % dependiendo del caso y el escenario (Ver Figura 4-12, y Figura 4-14: b y e).

Los datos observados del tiempo en discomfort por frío para los casos del T3, indican que el caso H presenta el peor desempeño en todos los escenarios, con resultados similares a los casos de T2 con reducciones entre 1,2 % y 3,9 % respecto al Caso A. El resto de los casos, alcanzan una reducción de entre 9,6 % y 10,4 %, dependiendo del escenario y la habitación (Ver Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14: c y f).

En relación a las mejoras del T3 con ventilación nocturna (caudales de 2,7 l/s·m² y 5,3 l/s·m²) se puede observar que tanto en el estar como en el dormitorio alcanzan incrementos del tiempo en confort muy significativos: entre 16,7 % y 31,0 % en el clima actual, entre 18,2 % y 33,7 % para el B1 y entre 17,2 % y 35,3 % ((Ver Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14: a y b). Además, se identifica que logran reducir al mínimo el discomfort por calor en el dormitorio, con niveles inferiores al 1 % en el clima actual y menores al 6,0 % en escenarios futuros, en todos los casos excepto los casos A y L que presentan reducciones menores (Ver Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14: c y d).

A modo de resumen, se presentan los rangos obtenidos de tiempo en confort, dentro de cada "Tramo" según el escenario climático, a través de los casos seleccionados. Se identifica que los casos pertenecientes a los T1 y T2, sin considerar la ventilación nocturna, mostraron tener baja influencia sobre el tiempo total en confort con variaciones inferiores al 5,0 % respecto al caso base en todos los escenarios. Por su parte, los pertenecientes al T3 reflejaron incrementos significativos: para el clima actual varían entre 2,5 % y 20,2 % dependiendo de la habitación, para el B1 entre 5,1 % y 16,2 %, y para el A2 entre 5,1 % y 17,6 % (Ver Tabla 4-18)

Tabla 4-18: Variación del tiempo en confort respecto al caso base, por tramo y escenario climático,

Casos			Escenario climático					
			Actual		B1		A2	
			Estar	Dorm 2	Estar	Dorm 2	Estar	Dorm 2
Tramo 1	A,B,C,D,E	Mín	-0,7%	-0,6%	-0,2%	-0,4%	-0,4%	-0,7%
		Máx	1,1%	3,9%	1,2%	3,7%	1,8%	4,3%
Tramo 2	F,G	Mín	0,2%	0,3%	0,5%	-0,5%	0,8%	0,3%
		Máx	2,7%	4,5%	3,6%	3,8%	3,3%	4,4%
Tramo 3	H,I,J,K,L M,N,O	Mín	2,5%	6,5%	5,1%	5,9%	6,7%	5,1%
		Máx	8,0%	20,2%	7,5%	16,2%	8,4%	17,6%

Es interesante observar que en la evaluación de confort y disconfort se identificaron diferencias en los resultados entre las dos habitaciones, siendo en el disconfort por calor y frente al conjunto de mejoras del T3 donde dichas diferencias se acentúan. Esta disparidad podría explicarse por las diferencias en la orientación y ocupación de las habitaciones, variables no analizadas en la presente investigación.

En consecuencia, los casos con mejoras más exigentes de aislación e infiltraciones (T3) presentan mayor cantidad de tiempo dentro de los rangos de confort para las condiciones de clima actual y futuras. Si de estos casos excluimos el caso L (mejora en la aislación y hermeticidad sin protecciones solares), los casos restantes del T3 presentan entre ellos diferencias entre 1,1 % y 6,1 % del tiempo total en confort, dependiendo de la habitación y el escenario. Adicionalmente se constató que sobre casos con cierto nivel de aislación y hermeticidad (de los casos estudiados el caso H) las mejoras más exigentes de aislación y hermeticidad disminuyen el tiempo en disconfort por frío, pero incrementan el tiempo en disconfort por calor. En relación al caso base, esto último se traduce en menores reducciones del disconfort por calor e incluso, dependiendo de la habitación, se producen incrementos del mismo.

Adicionalmente, fue posible constatar que tanto la ventilación nocturna como el uso adecuado de protecciones solares inciden favorablemente en la reducción del tiempo en disconfort por calor; y que las diferentes habitaciones reflejaron distintos niveles. Estos resultados concuerdan con las observaciones realizadas por Fosas et al. (2018) que mostraron que el riesgo de sobrecalentamiento está asociado a múltiples parámetros de diseño y operación de la vivienda, y no únicamente al nivel de aislación; y confirman la importancia del comportamiento de los usuarios frente a la ventilación y correcto uso de protecciones solares en la línea que desarrolla Van Hooff et al (2014).

4.4.4 Estudio demanda de energía y tiempo en confort en 30 años

La presente sección integra los resultados presentados en los apartados anteriores, evaluando los casos de mejoras durante un período de uso de 30 años. Para ello se consideró la demanda de energía y las horas en confort como una función con el tiempo como variable, obteniendo como resultado el total de la demanda y del tiempo en confort durante el periodo 2020-2050 afectados por el cambio de clima.

A modo de ejemplo, se presenta la Figura 4-15, la cual muestra para el caso base, la variación de la demanda de energía y las horas en confort durante el período. Los resultados presentados más adelante son el equivalente a la suma de cada indicador durante los 30 años estudiados.

Se realizó la proyección considerando el escenario A2 por ser la condición más crítica entre los escenarios estudiados.

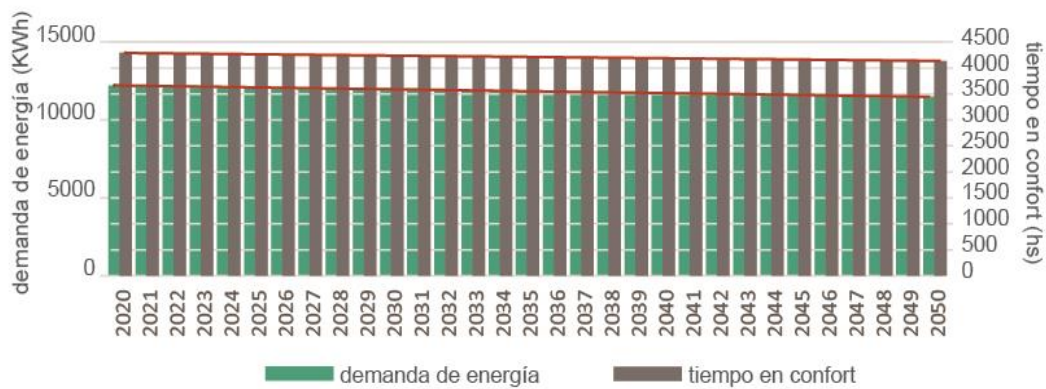


Figura 4-15. Variación anual de la demanda y horas en confort proyectado a 30 años en el caso base

La Figura 4-16 permite identificar para cada caso la relación entre demanda total y el tiempo total en confort, durante todo el periodo estudiado. De los casos sin ventilación, es posible identificar para ambas habitaciones, un conjunto de casos que cumplen con la doble condición de menor demanda y mayor tiempo en confort: los casos I, J, K, M, N y O (todos pertenecientes al T3). Entre estos casos, el caso O presenta la mayor reducción en demanda total 67,5 % respecto al Caso A y el Caso I la menor reducción con el 61,6%. En términos de confort estos casos logran resultados similares, incrementando el tiempo en confort respecto al caso base, en un 7,5 % en el estar y entre un 14,2 % y 16,3 % en el dormitorio. Si se considera la diferencia entre casos en valores absolutos (sin establecer la relación con el caso A) entre los mismos casos hay una diferencia de hasta 18 % en demanda de energía y de hasta 2 % en tiempo en confort. Los mismos casos representan las mejores soluciones si se incorpora como variable la ventilación nocturna.

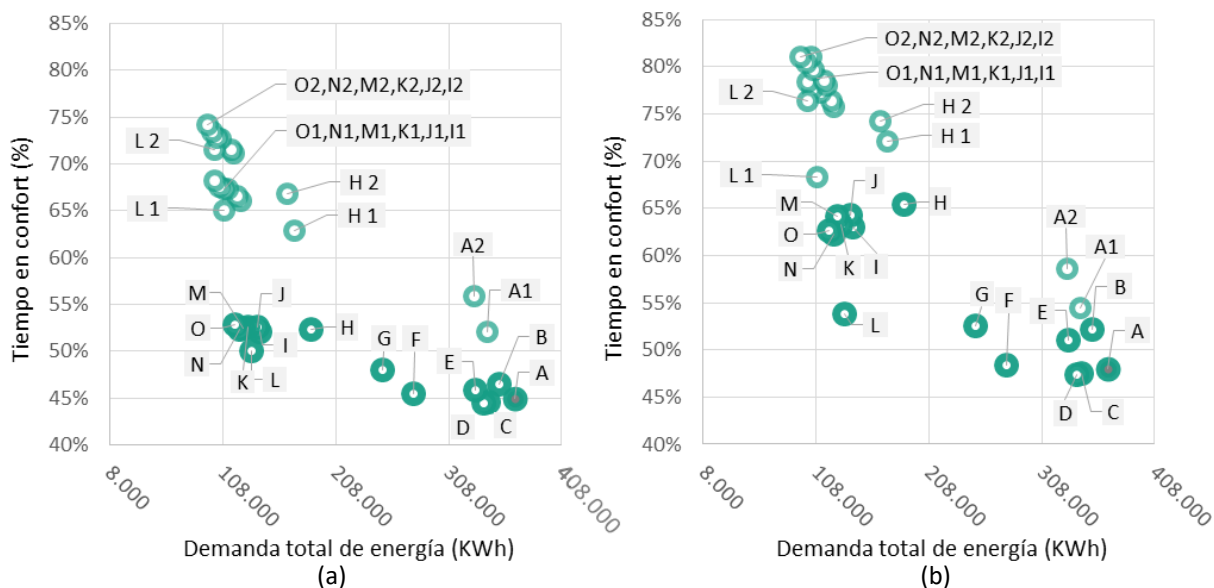


Figura 4-16. Evaluación de casos por tiempo total en confort y demanda total de climatización período de 2020-2050, (a) Estar (b) Dormitorio 2

Resulta particular el caso H (nivel de normativa actual), que se encuentra en el mismo rango de tiempo en confort que el grupo mencionado, y sin embargo muestra una diferencia significativa de la demanda de energía (un 56,0 % más respecto al caso O); también el caso L (incremento de aislación y hermeticidad, sin uso de protecciones solares) el cual en el estar presenta niveles similares de demanda y de tiempo en confort, y en el dormitorio se aleja por presentar menor cantidad de tiempo en confort (14,0% menos respecto al caso O).

La Figura 4-17 presenta la relación entre el tiempo en disconfort por calor y la demanda de energía para refrigeración para cada habitación, donde los casos óptimos estarán determinados por una menor demanda y un menor tiempo en disconfort. Se observa que a los casos óptimos identificados anteriormente se incorpora el caso H, el cual presenta incluso un mejor desempeño en términos de confort con una reducción de la demanda de refrigeración de 63,1 % y del tiempo en disconfort de 5,2% en el estar y 15,0 % en el dormitorio. Sin embargo, en el estar hay dentro de estos casos el O, M y N presentan un leve aumento del tiempo en disconfort, hasta un 2,2 %.

Al igual que en la demanda total se identifica que estos mismos casos alcanzan aún mejores desempeños si se considera como mejora la ventilación nocturna.

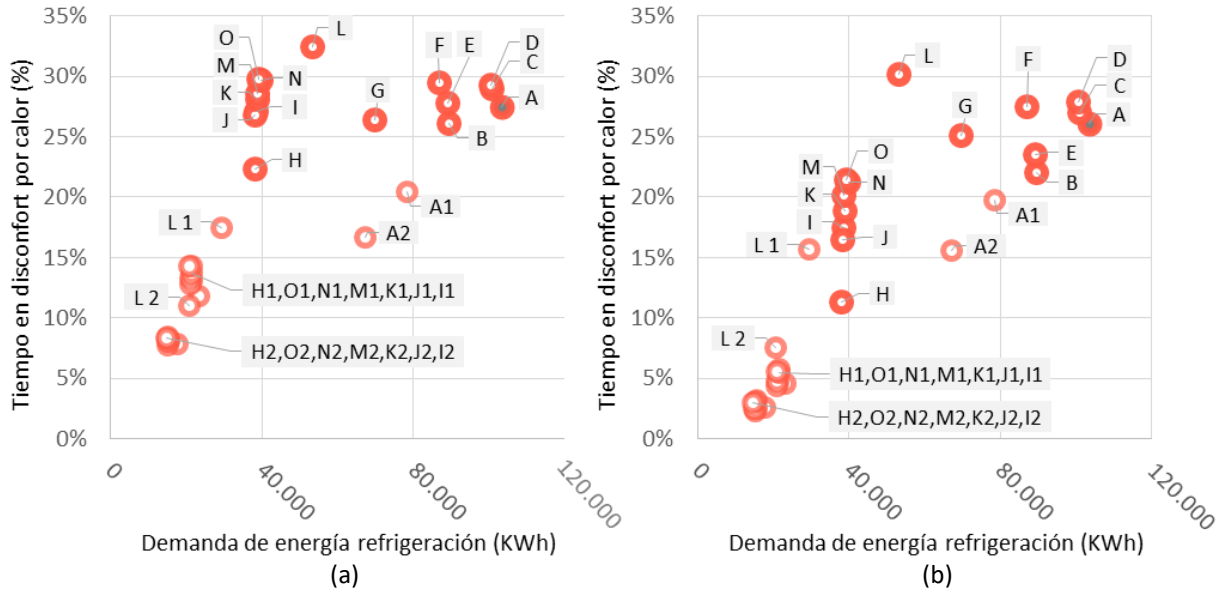


Figura 4-17. Evaluación de casos por disconfort por calor y demanda de refrigeración período de 2020-2050, (a) Estar (b) Dormitorio 2

Por último, se presenta la relación caso a caso entre la demanda de energía para calefacción y el porcentaje en disconfort por frío evaluadas a lo largo del período (Ver Figura 4-18). Los casos que presentan menor demanda de calefacción y menor tiempo en disconfort por frío coinciden con los casos anteriormente identificados a los cuales se suma el caso L. La reducción de la demanda respecto al caso A es de entre 61.1% y 69.7 % y del tiempo en disconfort entre 6,2% y 10,0%.

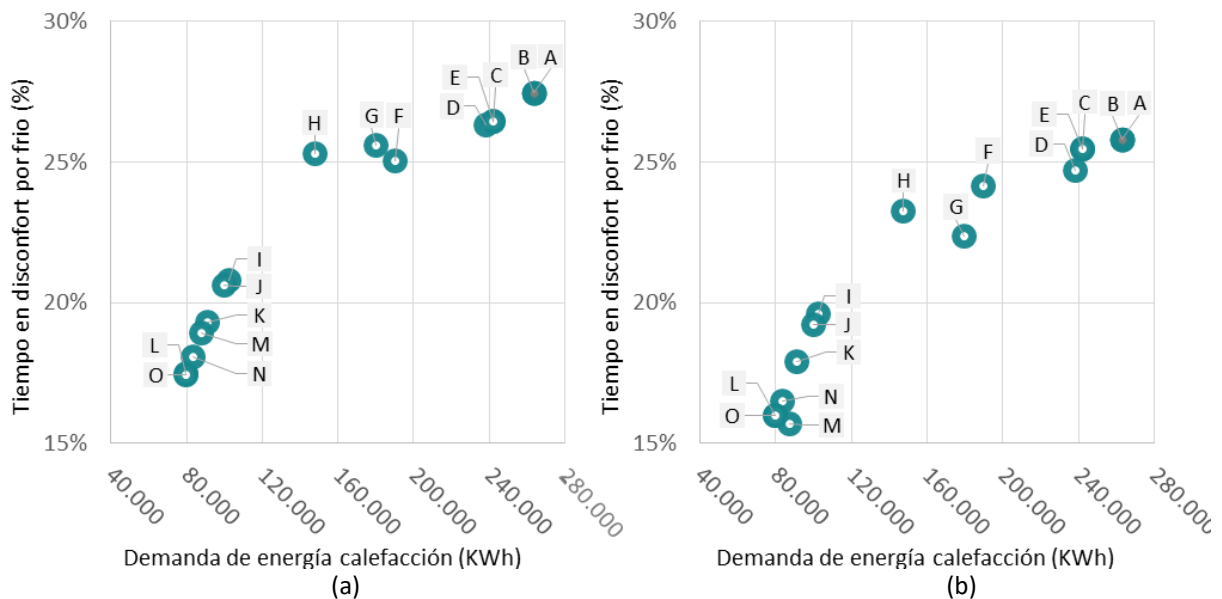


Figura 4-18. Evaluación de casos por disconfort por frío y demanda de calefacción en un período de 2020-2050, (a) Estar (b) Dormitorio 2

En los resultados presentados se identifica claramente lo ya mencionado en el estudio disgregado por demanda de energía y por confort, el conjunto de mejoras del T3 presenta los mejores desempeños para ambos indicadores y por ende las mayores reducciones respecto al caso base; a su vez la ventilación nocturna en los dos niveles estudiados verifica su efectividad incrementando el desempeño en todos los casos y, de forma opuesta el no uso de protecciones solares la afecta negativamente. Asimismo, se identificó que duplicar el nivel de ventilación de $2,7 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ a $5,3 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ no implica una reducción proporcional sobre el tiempo en disconfort por calor.

El estudio comparativo resalta las diferencias entre ambos indicadores, destacándose que mientras todas las mejoras reducen la demanda de energía para refrigeración, algunas de ellas aumentan el tiempo en disconfort por calor; también se destaca que el incremento de aislación y reducción de las infiltraciones tiene mayor incidencia sobre la demanda de energía global que sobre el tiempo total en confort y que el uso de protecciones solares incide de forma inversa.

4.4.5 Proyecciones en la demanda y el confort en escenarios futuros

Esta sección presenta un análisis de las proyecciones sobre la demanda de energía y el tiempo en confort en las condiciones de clima futuro B1 y A2, realizado a partir de los casos seleccionados.

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA DEMANDA EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS

A partir de los resultados obtenidos para cada caso, se estudió cómo variará la demanda - total de climatización, de calefacción y de refrigeración- en los futuros escenarios climáticos B1 y A2 con respecto al clima actual.

La Figura 4-19 indica que la demanda total presenta en los escenarios futuros al 2050 una disminución respecto al clima actual entre 1,2 % y 8,8 % en el escenario B1, y entre 1,9 % y 18,5 % en el A2, con mayores niveles en ambos escenarios en los casos con ventilación.

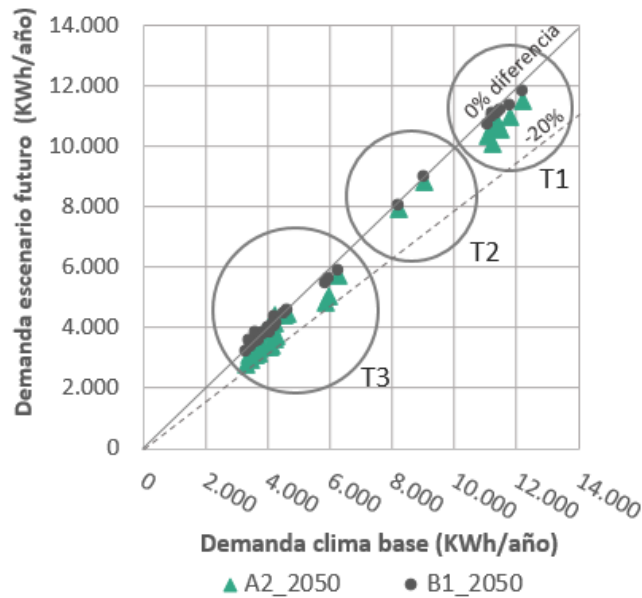


Figura 4-19. Relación entre la de demanda total para climatización en las condiciones de clima actual y las condiciones de escenarios futuros para cada caso

En relación a la demanda de refrigeración, excluyendo los casos con ventilación nocturna, se observa que la misma aumenta en todos los casos con un mayor incremento en el escenario A2 (entre 78,5 % y 157,4 %) que en el B1 (entre 58,9 % y 112,5 %) para el 2050 respecto al clima actual (ver Figura 4-20).

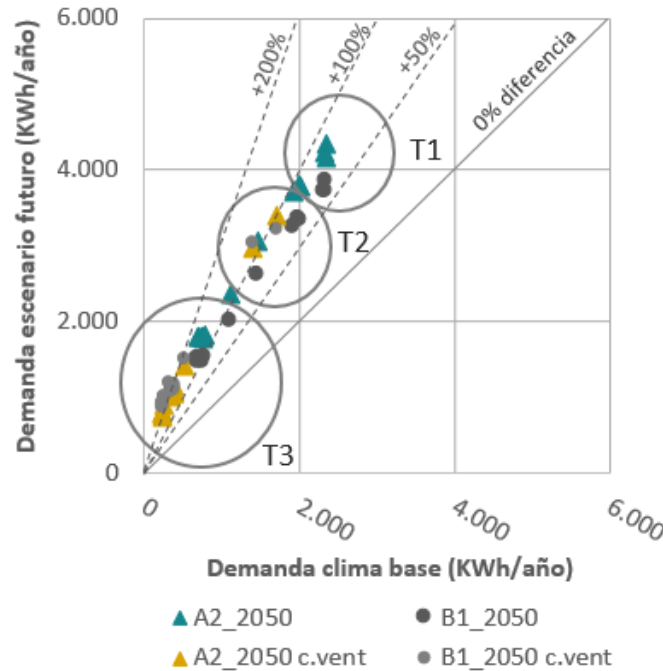


Figura 4-20. Relación entre la de demanda de refrigeración en las condiciones de clima actual y las condiciones de escenarios futuros para cada caso

Los casos estudiados en que se incorpora ventilación nocturna, presentan un aumento para ambos escenarios en relación al clima actual, sin embargo, se revierte la tendencia, el aumento esperado es levemente mayor en el escenario B1 (entre 89,6 % y 300,0 %) que en el escenario A2 (entre 100,2 % y 256,6 %). A pesar de que se confirma un aumento en la demanda de refrigeración en todos los casos estudiados, en los casos con uso mixto -refrigeración diurna y ventilación nocturna- se obtiene una reducción significativa en todos los escenarios respecto al mismo caso sin ventilación.

Por su parte, el estudio de la demanda de calefacción, Figura 4-21, muestra para ambos escenarios una reducción respecto a la situación de clima actual, siendo mayor en el escenario A2 (entre 27,5 % y 34,8 %) que en el B1 (entre 18,9 % y 24,6 %) para el 2050.

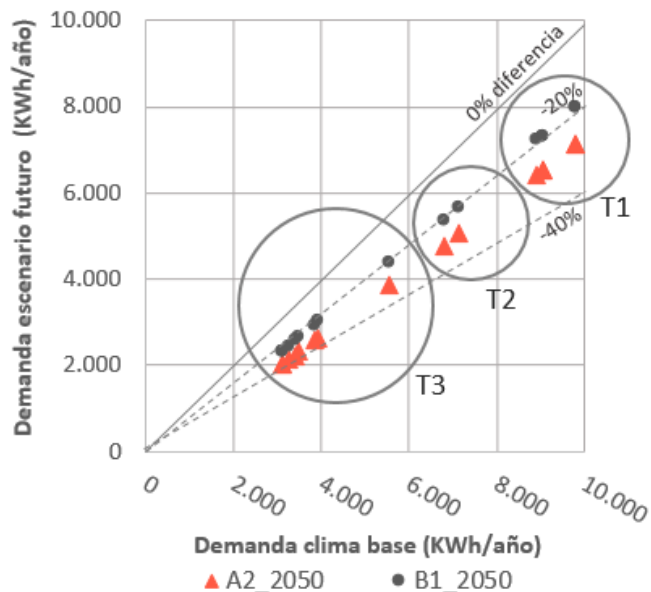


Figura 4-21. Relación entre la de demanda de calefacción en las condiciones de clima actual y las condiciones de escenarios futuros para cada caso

En las tres condiciones de demanda se observa que todos los casos mantienen la misma tendencia y que el escenario A2 presentará una variación mayor en magnitud que el escenario B1 respecto al clima actual, excepto por los casos de ventilación detallados. A su vez se identifica que el caso base y los casos de mejoras individuales (T1 y T2) presentan menor variación en la demanda que los casos con mejoras integrales tanto en el aumento de la demanda de refrigeración como en la reducción de la demanda de calefacción.

Las tendencias identificadas por tipo de demanda y para la demanda total, son coherentes con las tendencias registradas por Flores-Larsen, Filippín y Barea (2019) para regiones con climas similares en Argentina en el escenario A2, quienes además han encontrado una relación lineal entre la variación del consumo de energía y la variación de la temperatura media del aire exterior para invierno y verano.

ESTUDIO COMPARATIVO DE CONFORT EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS

A partir de los resultados obtenidos se estudió la tendencia que tendrá el tiempo en confort y el tiempo en disconfort por frío y por calor en los futuros escenarios climáticos B1 y A2 con respecto al clima actual.

Según se observa en la Figura 4-22, el tiempo en confort total presenta un comportamiento muy similar en ambos escenarios futuros. Se identifica en el estar un comportamiento en todos los casos con mínimas variaciones en los escenarios futuros respecto al escenario base (entre 2,4 % y -3,4 % en el B1, y entre 3,5 % y -4,4 % en el A2), con una leve tendencia a la disminución en la mayoría de los casos; en cambio en el dormitorio se confirma una tendencia a la disminución del tiempo en confort (entre 0,7 % y 7,0 % en el B1 y entre 1,0 y 10,0 % en el A2) con una reducción mayor en los casos con combinación de mejoras (T3), en los casos en que se estudia ventilación se identifica que excepto los casos A1, A2, L1, L2, M1, N1 y O1, todos los demás presentan un leve aumento (hasta 3,8 % en el B1 y 6,2 % en el B2).

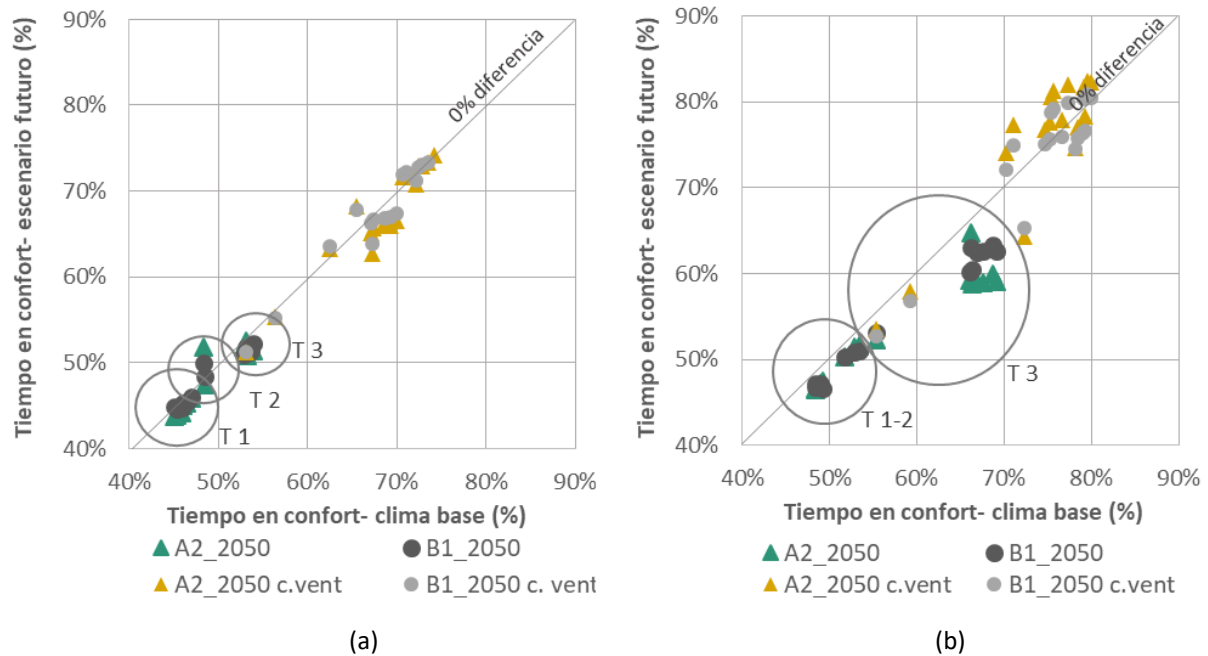


Figura 4-22. Relación entre el tiempo en confort en las condiciones de clima actual y las condiciones de escenarios futuros para cada caso (a) Estar (b) Dormitorio 2

El estudio disgregado del tiempo en disconfort por frío y por calor para ambas habitaciones, indican para los dos escenarios futuros en todos los casos, una disminución del tiempo en disconfort por frío (hasta 9,9 %) y un aumento del disconfort por calor (hasta 18,1 %), presentando mayor variación el escenario A2 que el B1. (Ver Figura 4-23y Figura 4-24).

En cuanto al desconfort por calor se observa que en el caso del dormitorio las mejoras combinadas (T3) presentan mayor incremento respecto al clima actual que las de T1 y T2, lo cual puede explicarse por los niveles de aislación que presentan estos casos. Para el desconfort por frío se observa que la tendencia para los tres tramos es uniforme.

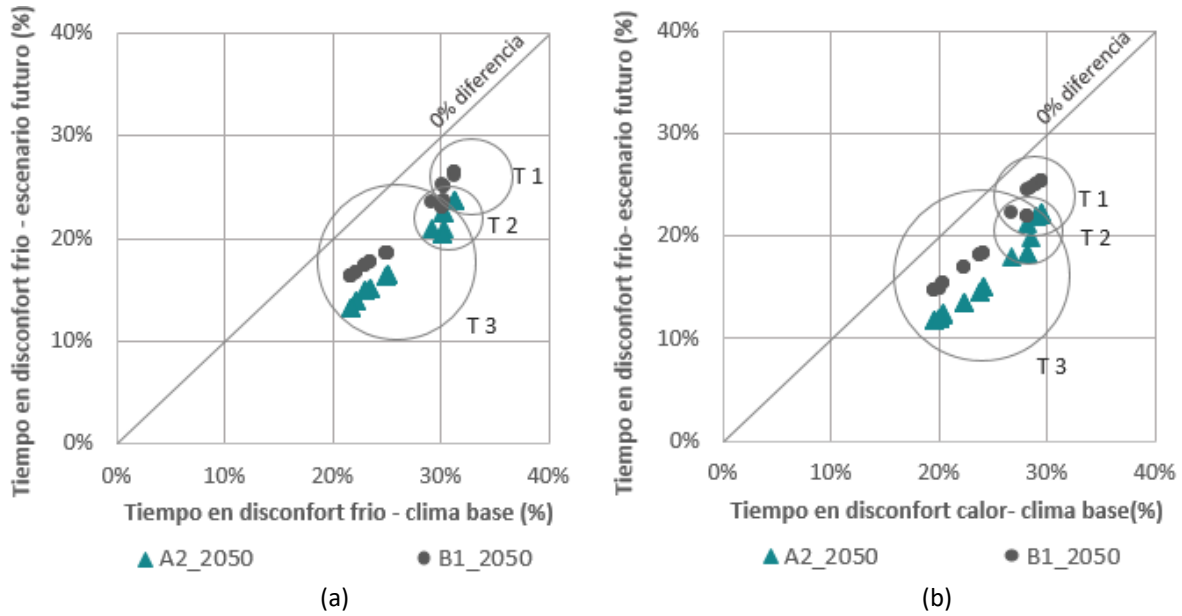


Figura 4-23. Relación entre el tiempo en desconfort por frío en las condiciones de clima actual y las condiciones de escenarios futuros para cada caso (a) Estar (b) Dormitorio 2

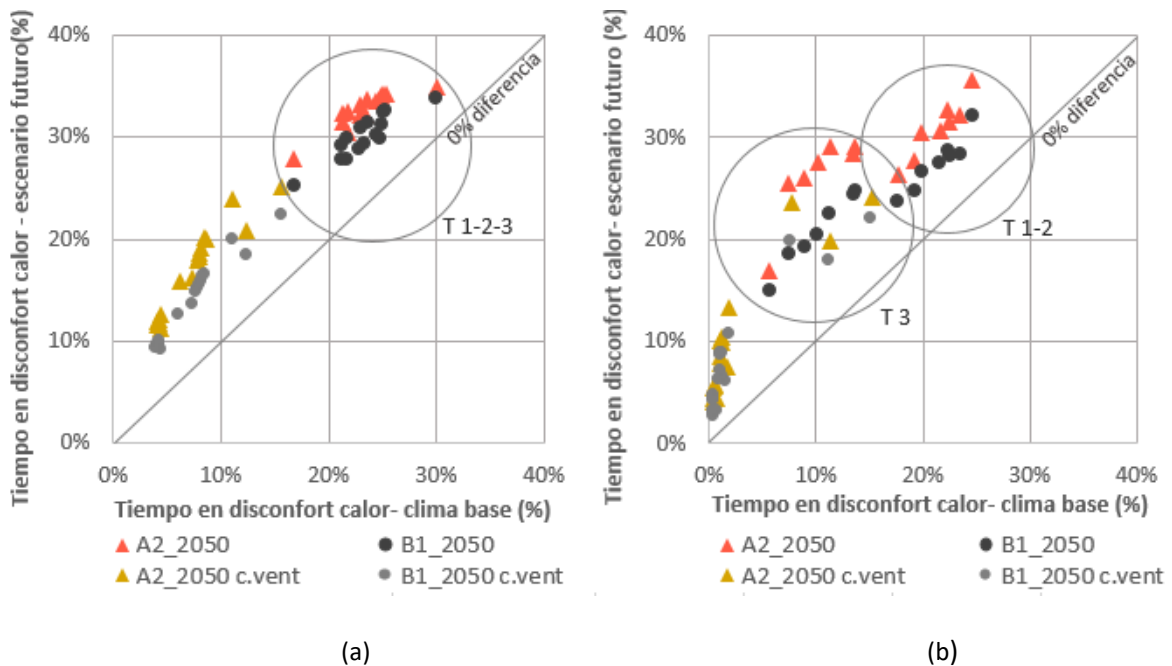


Figura 4-24. Relación entre el tiempo en desconfort por calor en las condiciones de clima actual y las condiciones de escenarios futuros para cada caso (a) Estar (b) Dormitorio 2

En un análisis general del impacto de las condiciones climáticas proyectadas, en el periodo de tiempo estudiado, sobre la demanda de energía y el tiempo en confort térmico, se puede identificar que para ambos indicadores se presenta una tendencia leve a la reducción del tiempo total en confort y demanda total de energía, con un cambio en la distribución de su composición. La demanda de energía de acuerdo a los casos estudiados sin ventilación, pasará de una distribución promedio de 82%-18% en clima actual, a 66%-34% en el B1 y 59%-41% en el A2, porcentaje de calefacción y refrigeración respectivamente. La distribución en el confort variará de acuerdo al promedio de los casos estudiados sin ventilación, de una composición 26%-20%-54% en el clima actual, a 21%-27%-51% en el B1 y 18%-31%-51% en el A2, tiempo en desconfort por frío, tiempo en desconfort por calor y tiempo total en confort, respectivamente; se puede identificar que se proyecta una variación levemente mayor del desconfort por calor que del desconfort por frío siendo la causa de la tendencia en la disminución del tiempo total en confort. En los casos que incorporan ventilación la distribución promedio entre los casos estudiados es 24%-5%-71% en el clima actual, 18%-11%-71% en el B1 y 16%-13%-71% en el A2, tiempo en desconfort por frío, tiempo en desconfort por calor y tiempo total en confort, respectivamente.

Capítulo 5. Conclusiones

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos en el estudio de mejoras energéticas sobre una tipología representativa de las viviendas sociales existentes en la ciudad de Montevideo, evaluadas a través de su desempeño térmico y energético de forma independiente y comparativa. Además, se consideró la influencia del cambio climático para el cálculo de ambos indicadores.

Las mejoras analizadas demostraron el potencial que tiene el parque habitacional existente para incrementar los niveles de confort y/o reducir la demanda de energía para acondicionamiento térmico, lo que permite verificar los niveles de mejora planteados en la hipótesis.

La evaluación de los casos con el modelo de confort adaptativo (ASHRAE 55) requirió, en primer lugar, determinar su aplicabilidad al clima local. El análisis realizado permite concluir que dicho modelo presenta sus limitaciones durante el período frío, donde las temperaturas promedio de funcionamiento exterior son inferiores a los 10 °C; con este resultado, el modelo es aplicable para el 71 % del año en el clima actual, incrementando su aplicabilidad en climas futuros, hasta alcanzar un 77 % en el escenario A2, debido al aumento de temperaturas proyectadas. Bajo este modelo, se puede concluir que para todos los escenarios predomina el tiempo en disconfort por frío y que los límites de disconfort por calor son superados en períodos menores.

La caracterización del parque habitacional permitió la selección de un caso representativo, estableciendo una línea base sobre la cual evaluar las mejoras a través de un modelo calibrado que reproduce, de manera ajustada, las condiciones monitorizadas *in situ*. Asimismo, el proceso de calibración permitió identificar la incidencia de la configuración del suelo para edificios en contacto con el terreno, lo que resultó ser un factor determinante de ajuste del modelo de simulación.

A partir del análisis de normativas y estándares en climas similares, se pudo determinar un rango de nivel de mejoras a evaluar y constatar que todas ellas incorporan, además de los requerimientos prescriptivos, evaluación por niveles de desempeño energético basados en el indicador de demanda de energía, aspecto que hasta el momento no contempló la normativa local. De este análisis se identificó que la normativa local vigente presenta, en todos los casos, menores exigencias en la transmitancia de techos y, de transmitancia de muros en algunos casos, y ausencia de requerimientos de hermeticidad presente en las demás normativas estudiadas.

La evaluación de mejoras sobre el caso en estudio permitió analizar su impacto, considerando las condiciones de clima actual y las condiciones climáticas futuras, identificando, mediante la comparación de los resultados obtenidos con cada indicador, aquellos casos que mejor desempeño térmico y energético tendrán a lo largo del periodo estudiado.

Se puede afirmar que existe una relación entre el desempeño de los casos en el clima actual y en los dos escenarios futuros B1 y A2, aunque, variando en magnitud, se mantienen las soluciones óptimas para todos los escenarios. Estos resultados permiten ser optimistas en relación a que la implementación de mejoras adecuadas no condicionará la calidad térmica y energética en las condiciones climáticas proyectadas.

La estrategia de selección de casos utilizada permitió evaluar las mejoras aplicadas de forma individual y de forma combinada. Los resultados demuestran que las mejoras individuales estudiadas (transmitancia de opacos y ventanas, protecciones solares, nivel de hermeticidad) tienen bajo impacto sobre el tiempo total de confort y que estos resultados difieren del impacto sobre la demanda de energía, donde la mejora individual de aislación en techos y muros redundaba en una disminución considerable de la demanda.

Con respecto a la normativa local, se logró constatar que una vivienda construida según la línea base establecida puede incrementar el tiempo de confort, de acuerdo con el modelo térmico adaptativo de la ASHRAE 55, en un 7 % o un 17 %, dependiendo de la habitación, y reducir la demanda de energía en un 49 %.

Sin embargo, la evaluación de mejoras combinadas demostró que existe un conjunto de casos, con combinación variadas, que presentan un mejor desempeño para ambos indicadores, disminuyen la demanda total de energía respecto al caso base y presentan poca variación en el tiempo total en confort de sus habitantes, superando los desempeños alcanzados con la normativa actual. Dichas mejoras permiten incrementar el tiempo en confort entre un 14 % y un 16 % en el dormitorio y entre un 7 % y 8 % en la sala de estar, y reducir la demanda de energía entre 62 % y 68 % para el total de la vivienda, considerando la proyección climática del escenario A2 en el período 2020-2050. Al incorporar, sobre estas mejoras constructivas, estrategias de ventilación, se obtienen reducciones aún mayores (entre 66 % y 74 % en la demanda de energía) y se incrementa el tiempo de confort entre 21 % y 29 % en la sala de estar y entre 26 % y 33 % en el dormitorio; de esta forma, los resultados obtenidos verifican ampliamente la hipótesis planteada.

Por lo tanto, se puede señalar que, de los casos evaluados, el nivel de mejoras establecido por el caso I ($U_{\text{muros}}=0,61 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $U_{\text{techo}}=0,47 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $U_{\text{ventanas}}=2,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, 5 ACH de infiltraciones y uso de protecciones solares⁸) indica el mínimo nivel adecuado para que las viviendas ofrezcan un buen desempeño, más allá de que su uso se haga con sistemas activos o con funcionamiento en oscilación libre. Vale puntualizar que la selección de casos empleada no evaluó la combinación de los niveles de transmitancia de opacos para el caso I con otros niveles de transmitancia en ventanas e infiltraciones; por lo tanto, no se puede concluir si con menores niveles de estas mejoras se pueden alcanzar grados similares de desempeño.

Asimismo, los resultados permiten relativizar la necesidad de incrementar la aislación y los niveles de hermeticidad, a los más exigentes, para aquellas viviendas sin uso de refrigeración y calefacción, constatándose que, con las mejoras aplicadas al caso H (normativa actual- $U_{\text{opacos}} 0,85 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $U_{\text{ventanas}}=5,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, 8,2 ACH de infiltraciones y uso de protecciones solares⁹), la diferencia en el tiempo total en confort, evaluado a través del período de análisis, presenta una diferencia de 2 % con el caso O (máxima aislación y hermeticidad evaluadas) y aumenta los riesgos de sobrecalentamiento si no se consideran medidas de ventilación adecuada. En viviendas con uso de climatización, las medidas más exigentes permitirán menor demanda de energía, constatando que el caso O presenta un 18 % menos de demanda total en relación al caso I y un 54% menos en relación al caso H.

Por otra parte, los resultados obtenidos en la investigación confirmaron la incidencia positiva de las estrategias catalogadas como operacionales (protecciones solares y ventilación nocturna), resultando estrategias claves sobre todo en las condiciones de confort, tanto en el escenario actual como en los futuros. Esto indica la necesidad de orientar a los habitantes sobre las buenas prácticas de uso para mejorar sus condiciones de confort. Además, permite subrayar el potencial que tienen los dispositivos de sombreado incorporados como elementos en el diseño arquitectónico; así, como en el caso de la ventilación, atender desde el diseño los aspectos que faciliten y/o permitan la ventilación natural y también considerar la posible incorporación de dispositivos de *free cooling* que garanticen niveles de ventilación adecuados para reducir la temperatura interior, con un

⁸⁻⁹ Período de uso de protecciones solares de noviembre a marzo cuando $T_{\text{ext}} > 19^\circ\text{C}$ y la radiación solar incidente $> 120 \text{ W/m}^2$

mínimo consumo de energía, y eviten problemas de privacidad, ruido y contaminación por tener las ventanas abiertas.

El estudio del conjunto de casos permitió, además, verificar que el aumento de las temperaturas, proyectadas por el cambio climático en el clima estudiado, disminuirá levemente la demanda total de energía para climatización, con una tendencia a disminuir el consumo por calefacción y a aumentar el consumo por refrigeración. En cambio, las viviendas que funcionan en oscilación libre se verán afectadas por una tendencia a disminuir el tiempo total de confort por un mayor incremento del tiempo de disconfort por calor. Estas tendencias se verifican en todos los casos estudiados, exceptuando algunos en los que se aplicó ventilación nocturna.

Es preciso puntualizar que, en términos de mitigación en relación a los efectos del consumo energético, este desplazamiento hacia una mayor demanda de refrigeración supone un corrimiento de energías basadas en recursos no renovables y contaminantes (gas y leña) a energía eléctrica (refrigeración y ventilación), al día de hoy producida en un 98 % por fuentes de origen renovables en el contexto nacional (MIEM 2018).

El aumento del disconfort por calor afectará directamente las condiciones de los habitantes que no puedan afrontar el consumo de energía para acondicionamiento térmico; sin embargo, es posible identificar que la ventilación será una medida efectiva, tanto en las condiciones actuales como en las futuras.

La investigación presenta ciertas limitaciones: el caso seleccionado, si bien es representativo de las viviendas existentes, no es generalizable en sus resultados, pues requiere una mayor cantidad de casos a estudiar. A pesar de que este trabajo incluye el análisis de escenarios climáticos futuros, hay que considerar las incertidumbres que los modelos de predicción climática presentan y, adicionalmente, las limitaciones que los archivos climáticos utilizados tienen, lo que lleva a considerar los resultados obtenidos en términos de tendencias posibles.

El presente trabajo permitió ejemplificar niveles de desempeños alcanzables mediante mejoras energéticas sobre la vivienda existente, incorporando el clima como variable; asimismo, procuró orientar en criterios a considerar para la implementación de políticas locales.

Líneas futuras de investigación

A continuación, se identifican posibles líneas para profundizar la investigación aquí presentada.

La selección de casos de estudio fue acotada producto del alcance de la investigación, resultando interesante profundizar en un análisis de sensibilidad de las variables estudiadas y la incorporación de nuevas opciones de mejoras.

Por otro lado, el análisis de confort adaptativo se basó en la aplicación de una normativa internacional a cada escenario climático, los rangos obtenidos asumen una cierta adaptabilidad del ser humano a las futuras temperaturas, lo cual se presenta con incertidumbre. Por tanto, es necesario profundizar en el estudio de un modelo de confort adaptativo ajustado al contexto local y de cambio climático se presenta como una línea a desarrollar para una mejor evaluación de las condiciones de habitabilidad en las viviendas.

En relación a este indicador, se identificó además como posible análisis complementario al porcentaje de tiempo en confort y discomfort, el análisis de la severidad del discomfort en base al estudio de las temperaturas, es decir que permita determinar cuan alejadas se encuentran las temperaturas interiores de la zona de confort.

La metodología implementada permitió contrastar dos indicadores para la evaluación de estrategias de mejoras durante la etapa de uso de las viviendas, un análisis integral requiere integrar otras variables que inciden en la toma de decisiones, resultando de interés profundizar desde un estudio económico que permita evaluar la rentabilidad de los casos considerados y desde un análisis de emisiones que considere el ciclo de vida de las mejoras.

Referencias bibliográficas

- ANDRIĆ, I., KOC, M. y AL-GHAMDI, S.G., 2019. A review of climate change implications for built environment: Impacts, mitigation measures and associated challenges in developed and developing countries. *Journal of Cleaner Production*, vol. 211, pp. 83-102. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.11.128.
- ASHRAE, 2007. *ANSI/ASHRAE Estandar 62.1-2007: Ventilacion para una Calidad Aceptable de Aire Interior*. 2007. Estados Unidos: s.n.
- ASHRAE, 2014. *ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. S.I.:
- ASHRAE, 2017. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. 2017. S.I.: https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_55-2017.
- ATTIA, S. y CARLUCCI, S., 2015. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy and Buildings*, vol. 102, pp. 117-128. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2015.05.017.
- BALLARINI, I., CORGNATI, S.P. y CORRADO, V., 2014. Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. *Energy Policy*, vol. 68, pp. 273-284. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2014.01.027.
- BARBOSA, R., VICENTE, R. y SANTOS, R., 2015. Climate change and thermal comfort in Southern Europe housing: A case study from Lisbon. [en línea], [Consulta: 27 julio 2019]. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.05.019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.019>.
- BENTANCUR, V. y MOLINARI, M., 2019. Proyecciones climáticas mediante reducción estadística de escala para Uruguay. [en línea]. S.I.: Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/proyecciones-climaticas-reduccion-estadistica>.
- BHU, 2000. *Manual del supervisor de obra*. . Montevideo:
- BIG LADDER SOFTWARE y ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE, 2016. *Elements* [en línea]. 2016. S.I.: s.n. 1.0.6. Disponible en: <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>.
- BOBADILLA, A., OSSIO, F., FIGUEROA, R., GONZÁLEZ, A., DÍAZ, M. y ARRIAGADA, R., 2014. The energy impact of envelope leakage. The Chilean Case. *Revista de la Construcción*, pp. 25-35.
- BRAGER, G.S. y DE DEAR, R.J., 1998. Thermal adaptation in the built environment: A literature review. *Energy and Buildings*, vol. 27, no. 1, pp. 83-96. ISSN 03787788. DOI 10.1016/s0378-7788(97)00053-4.
- CARPIO, M., GARCÍA-MARAVÉ, A., RUIZ, D.P. y MARTÍN-MORALES, M., 2014. Impact of the envelope design of residential buildings on their acclimation energy demand, CO2 emissions and energy rating. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 186, no. December, pp. 387-398. ISSN 17433541. DOI 10.2495/ESUS140331.
- CASTILLO, A.E., PEÑA, L.S. y DELGADO, S.G., 2017. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, vol. 32, no. 3, pp. 669-693. ISSN 24486515. DOI 10.24201/edu.v32i3.1684.
- CELLURA, M., GUARINO, F., LONGO, S. y MISTRETTA, M., 2014. Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 72, pp. 371-381. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.12.046. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.046>

- CEN, 2017. EN 16798: Indoor Environmental Input Parameters For Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air quality, Thermal environment, Lighting and Acoustics. . Brussels:
- CHAUVIE, V. y PICCIÓN, A., 2005. Patologías de condensación: diseño y uso del edificio. [en línea]. S.l.: Disponible en: http://udelar.edu.uy/eduper/publicacion_generica/patologias-de-condensacion-diseno-y-uso-del-edificio-cd/.
- CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE), 2017. *Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE)* [en línea]. 2017. España: s.n. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf>.
- D'AMBROSIO ALFANO, F.R., DELL'ISOLA, M., FICCO, G., PALELLA, B.I. y RICCIO, G., 2016. Experimental air-tightness analysis in mediterranean buildings after windows retrofit. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 8, no. 10, pp. 1-9. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su8100991.
- DE DEAR, R.J. y BRAGER, G.S., 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 6, pp. 549-561. ISSN 03787788. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00005-1.
- DE WILDE, P. y COLEY, D., 2012. The implications of a changing climate for buildings. *Building and Environment* [en línea], vol. 55, pp. 1-7. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.03.014. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132312001060>.
- DINAVI / MVOTMA, 2011. *Bases del sistema de otorgamiento de aptitud técnica a sistemas constructivos no tradicionales, Sección II.- Estándares de desempeño para la vivienda*. 2011. Uruguay: s.n.
- DNE/MIEM, 2014. Plan Solar. [en línea]. [Consulta: 5 mayo 2019]. Disponible en: <http://www.energiasolar.gub.uy/index.php/medidas-promocionales/medidas-promocionales-solar-termica/plan-solar-familias>.
- DNE/MIEM, 2015. Plan Nacional De Eficiencia Energética – 2014-2024. [en línea]. Montevideo: Disponible en: <http://dmee.com.ec/plan-nacional-de-eficiencia-energetica/>.
- ESCANDÓN, R., SUÁREZ, R., SENDRA, J.J., ASCIONE, F., BIANCO, N. y MAURO, G.M., 2019. Predicting the Impact of Climate Change on Thermal Comfort in A Building Category: The Case of Linear-type Social Housing Stock in Southern Spain. *Energies* [en línea], vol. 12, no. 12, pp. 2238. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en12122238. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/12/2238>.
- FANGER, P.O., 1970. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. [en línea]. S.l.: Copenhagen: Danish Technical Press. Disponible en: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19501100562>.
- FIGUS, G., TURNER, K., MCGREGOR, P. y KATRIS, A., 2017. Making the case for supporting broad energy efficiency programmes: Impacts on household incomes and other economic benefits. *Energy Policy*, vol. 111, no. September, pp. 157-165. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2017.09.028.
- FILIPPÍN, C., RICARD, F., FLORES LARSEN, S. y SANTAMOURIS, M., 2017. Retrospective analysis of the energy consumption of single-family dwellings in central Argentina. Retrofitting and adaptation to the climate change. *Renewable Energy* [en línea], vol. 101, pp. 1226-1241. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2016.09.064. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.064>.
- FLORES-LARSEN, S., FILIPPÍN, C. y BAREA, G., 2019. Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 184, pp. 216-229. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.12.015. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>.

- FOSAS, D., COLEY, D.A., NATARAJAN, S., HERRERA, M., FOSAS DE PANDO, M. y RAMALLO-GONZALEZ, A., 2018. Mitigation versus adaptation: Does insulating dwellings increase overheating risk? *Building and Environment* [en línea], vol. 143, pp. 740-759. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2018.07.033. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.033>.
- GARCÍA DE DIEGO, M.D.L., GÓMEZ MUÑOZ, G. y ROMÁN LÓPEZ, E., 2015. Cuentas energéticas no habituales en edificación residencial. En: 6 citas, *Informes de la Construcción* [en línea], vol. 67, no. Extra-1, pp. m028. ISSN 1988-3234. DOI 10.3989/ic.14.059. Disponible en: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4089/4697>.
- GIEE, 2016. Energía y equidad en Uruguay. Abordaje interdisciplinario del consumo de energía en el sector residencial de Montevideo. . Montevideo:
- GUILLÉN-LAMBEA, S., RODRÍGUEZ-SORIA, B. y MARÍN, J.M., 2017. Comfort settings and energy demand for residential nZEB in warm climates. *Applied Energy*, vol. 202, pp. 471-486. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2017.05.163.
- IM, 1972. *De la higiene de la vivienda. Digesto Municipal. Volumen XV, Libro XV, Título II, Capítulo I*. 1972. S.l.: <http://normativa.montevideo.gub.uy/armado/82697>.
- IM, 2004. *Decreto 30.952 «Nuevas normas para la construcción, ampliación o regularización de viviendas populares»*. 2004. Montevideo: s.n.
- IM, 2009. *Normas para edificios destinados a vivienda. De la reducción de la demanda de energía para acondicionamiento térmico. Digesto Municipal. Volumen XV, Libro XVI, Título III.I, Capítulo Único*. [en línea]. 2009. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.montevideo.gub.uy/aplicacion/resolucion?parametro=2928-09>.
- IM y MIEM, 2017. Oficina de rehabilitación de apoyo a la eficiencia energética. [en línea]. Disponible en: <https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ciudad-y-urbanismo/tierras-y-habitat/oficina-de-rehabilitacion-de-apoyo-a-la-eficiencia-energetica>.
- INE, 2011. Censo Nacional 2011. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.ine.gub.uy/censos-2011>.
- INUMET, 2019a. Datos horarios de temperatura y humedad. Estación meteorológica del Prado. Periodo Mayo-Junio 2019. . Montevideo:
- INUMET, 2019b. Estadística climatológica para Montevideo. Estación Prado. [en línea]. [Consulta: 1 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.inumet.gub.uy/index.php/clima/estadisticas-climatologicas>.
- INVIDIATA, A. y GHISI, E., 2016. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 130, no. 2016, pp. 20-32. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.07.067. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.067>.
- IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *IPCC* [en línea]. Ginebra, Suiza: Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1256/004316502320517344%5Cnhttp://www.nature.com/doifinder/10.1038/446727a>.
- IPCC, 2014. *Informe de síntesis* [en línea]. 2014. S.l.: s.n. ISBN 9789291693436. Disponible en: https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/ar5_wg1_headlines_es.pdf.
- IPCC / YPERSELE J.VAN, 2010. *Update on Scenario Development: from SRES to RCPs* [en línea]. 2010. S.l.: s.n. ISBN 047125391X. Disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/ipcc_van_ypersele.pdf.

- ISO 7730, 1994. Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, Moderate Thermal Environments. . Geneva:
- JENTSCH, M.F., BAHAJ, A.S. y JAMES, P.A.B., 2013. CCWorldWeatherGen, University of Southampton. [en línea]. [Consulta: 1 agosto 2019]. Disponible en: <http://www.energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>.
- LAUREIRO, P., 2018. *Determinantes del consumo de energía eléctrica del sector residencial en Uruguay*. 2018. S.l.: Serie Documentos de investigación estudiantil, DIE 05/18. Instituto de Economía, Facultad de Ciencias Económicas y Administración, Universidad de la República, Uruguay.
- LES/UDELAR, 2019. Datos horarios de Radiación global horizontal. Estación FING-UdelAR. Periodo Mayo-Junio 2019. . S.l.:
- LOGA, T., STEIN, B. y DIEFENBACH, N., 2016. TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 132, pp. 4-12. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.06.094. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.094>.
- LÓPEZ, M.N. y PICCIÓN, A., 2016. Simulación cambio climático y edificación: evaluación ambiental estratégica aplicada a un programa habitacional en Montevideo. *XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Contruído* [en línea]. Sao Paulo: s.n., Disponible en: http://www.infohab.org.br/entac/entac2016_artigos.html.
- MIDES, 2017. Observatorio Social. Tamaño medio de hogares particulares según quintiles de ingreso. Total país. [en línea]. Disponible en: <http://observatoriosocial.mides.gub.uy/portal/indicadores.php#>.
- MIEM, 2013. Características de sector residencial. Datos 2013. [en línea]. Uruguay: Disponible en: <https://www.miem.gub.uy/energia/encuesta-sobre-consumo-y-usos-de-la-energia-en-el-sector-residencial-datos-2013>.
- MIEM, 2018. Balance Energético Nacional 2017. [en línea]. [Consulta: 7 mayo 2019]. Disponible en: <https://ben.miem.gub.uy/>.
- MINVU, 2016. *Estándares de Construcción Sustentable para viviendas de Chile. Tomo II Energía*. 2016. Chile: s.n. ISBN 978-956-9432-53-8.
- MUNICIPALIDAD DE ROSARIO, 2011. *Ordenanza N°8757* [en línea]. 2011. Argentina: s.n. Disponible en: <https://www.rosario.gob.ar/normativa/ver/visualExterna.do?accion=verNormativa&idNormativa=75004>.
- NICOL, J.F. y HUMPHREYS, M.A., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 6, pp. 563-572. ISSN 03787788. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00006-3.
- O'NEILL, B.C., TEBALDI, C., VAN VUUREN, D.P., EYRING, V., FRIEDLINGSTEIN, P., HURTT, G., KNUTTI, R., KRIEGLER, E., LAMARQUE, J.F., LOWE, J., MEEHL, G.A., MOSS, R., RIAHI, K. y SANDERSON, B.M., 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 9, pp. 3461-3482. ISSN 19919603. DOI 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- OECD/IEA, 2008. Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings. [en línea]. Paris: Disponible en: http://www.iea.org/g8/2008/Building_Codes.pdf.
- ONU, 1992. Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. . Nueva York:
- ONU, 1998. Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. . Kyoto:

- ONU, 2014. Informe del Grupo de Trabajo Abierto a la Asamblea General sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible. *ONU* [en línea], vol. 68, no. 970, pp. 1-24. DOI 14-59106. Disponible en:
http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/68/970&referer=/english/&Lang=S.
- ONU, 2015. Acuerdo de París Naciones Unidas 2015. [en línea]. Paris: Disponible en:
https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf.
- PARLAMENTO EUROPEO, 2012a. *Directrices que acompañan al Reglamento Delegado (UE) n° 244/2012 de la Comisión, de 16 de enero de 2012*. 2012. Unión Europea: s.n.
- PARLAMENTO EUROPEO, 2012b. *Reglamento Delegado (UE) 244/2012 de la Comisión, de 16 de enero de 2012*. 2012. Unión Europea: s.n.
- PÉREZ-ANDREU, V., APARICIO-FERNÁNDEZ, C., MARTÍNEZ-IBERNÓN, A. y VIVANCOS, J.L., 2018. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate., *Energy*, vol. 165, pp. 63-74. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2018.09.015.
- PÉREZ-FARGALLO, A., PULIDO-ARCAS, J.A., RUBIO-BELLIDO, C., TREBILCOCK, M., PIDERIT, M.B. y ATTIA, S., 2018. Development of a new adaptive comfort model for low income housing in the central-south of chile. *Energy and Buildings*, vol. 178, pp. 94-106. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.08.030.
- PÉREZ-FARGALLO, A., RUBIO-BELLIDO, C., PULIDO-ARCAS, J.A., GALLEGO-MAYA, I. y GUEVARA-GARCÍA, F.J., 2018. Influence of adaptive comfort models on energy improvement for housing in cold areas. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 3, pp. 1-15. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su10030859.
- PICCIÓN, A., CAMACHO, M., CHEIRASCO, G., LÓPEZ, M.N. y MILICUA, S., 2011. Zonas variables de confort térmico para edificios naturalmente acondicionados en Uruguay. *VII Encuentro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construido*. Buzios: s.n., pp. 1-10.
- PICCIÓN, A., CAMACHO, M., LÓPEZ, M. y MILICUA, S., 2009. Pautas de diseño bioclimático para optimizar condiciones de confort y uso de energía en el sector residencial financiado por organismos públicos , para Uruguay, caso de clima complejo. . Montevideo:
- PNUD, 2018. NAP - Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. [en línea]. Montevideo: Disponible en:
<https://www.uy.undp.org/content/uruguay/es/home/projects/napciudades.html>.
- QUANTE, M. y BJØRNÆS, C., 2016. *North Sea Region Climate Change Assessment* [en línea]. Cham: Springer International Publishing. Regional Climate Studies. ISBN 978-3-319-39743-6. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-39745-0>.
- REMUND, J., MÜLLER, S.C., SCHILTER, C. y RIHM, B., 2011. The use of Meteorological weather generator for climate change studies. *EMS Annual Meeting Abstracts*, vol. 7, no. October 2014, pp. 46625.
- RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ, C.E., CARRETERO-AYUSO, M.J. y CLARO-PONCE, J.C., 2018. Influencia de las infiltraciones en la rehabilitación energética de la envolvente. El caso del plan de actuaciones en el parque público residencial de Andalucía. *Informes de la Construcción* [en línea], vol. 70, no. 551, pp. 271. ISSN 1988-3234. DOI 10.3989/ic.60450. Disponible en:
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/5922>.
- RUBIO-BELLIDO, C., PÉREZ-FARGALLO, A. y PULIDO-ARCAS, J.A., 2016. Optimization of annual energy demand in office buildings under the influence of climate change in Chile. *Energy*, vol. 114, pp. 569-585. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2016.08.021.

- RUBIO-BELLIDO, C., PÉREZ-FARGALLO, A., PULIDO-ARCAS, J.A. y TREBILCOCK, M., 2017. Application of adaptive comfort behaviors in Chilean social housing standards under the influence of climate change. *Building Simulation* [en línea], vol. 10, no. 6, pp. 933-947. ISSN 1996-3599. DOI 10.1007/s12273-017-0385-9. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s12273-017-0385-9>.
- RUBIO-BELLIDO, C., PULIDO, J. y URETA-GRAGERA, M., 2015. Aplicabilidad de estrategias genéricas de diseño pasivo en edificaciones bajo la influencia del cambio climático en concepción y santiago, chile. *Revista Hábitat Sustentable* [en línea], vol. 5(2), pp. 32-41. Disponible en: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2106>.
- RUPP, R.F., VÁSQUEZ, N.G. y LAMBERTS, R., 2015. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, vol. 105, pp. 178-205. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2015.07.047.
- SÁNCHEZ-GARCÍA, D., BIENVENIDO-HUERTAS, D., TRISTANCHO-CARVAJAL, M. y RUBIO-BELLIDO, C., 2019. Adaptive Comfort Control Implemented Model (ACCIM) for Energy Consumption Predictions in Dwellings under Current and Future Climate Conditions: A Case Study Located in Spain. *Energies*, vol. 12, no. 8, pp. 1498. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en12081498.
- SANTAMOURIS, M., 2016. Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy* [en línea], vol. 128, pp. 61-94. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2016.01.021. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.021>.
- SKULLESTAD, J.L., BOHNE, R.A. y LOHNE, J., 2016. High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure – A Comparative LCA of Structural System Alternatives. *Energy Procedia* [en línea], vol. 96, no. June 2017, pp. 112-123. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2016.09.112. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>.
- SUÁREZ, R.A., ABAL, G., MUSÉ, P. y SIRI, R., 2014. Satellite-derived Solar Irradiation Map for Uruguay. *Energy Procedia* [en línea], vol. 57, pp. 1237-1246. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2014.10.072. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214014398>.
- TRIANA, M.A., LAMBERTS, R. y SASSI, P., 2018. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 158, pp. 1379-1392. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.11.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.003>.
- UNIT, 1999. *NORMA UNIT 1026:1999. Aislamiento térmico de edificios. Zonificación climática*. 1999. S.l.: s.n.
- UNIT, 2010. *UNIT 1050:2010. Desempeño térmico de los edificios de uso residencial. Diseño de la envolvente. Parámetros y guías para el cálculo*. 2010. S.l.: s.n.
- VAN HOOFF, T., BLOCKEN, B., HENSEN, J.L.M. y TIMMERMANS, H.J.P., 2014. On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. *Building and Environment* [en línea], vol. 82, pp. 300-316. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.10.006. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.006>.
- VAN HOOFF, T., BLOCKEN, B., TIMMERMANS, H.J.P. y HENSEN, J.L.M., 2016. Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. *Energy*, vol. 94, pp. 811-820. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2015.11.036.

- WEBB, A.L., 2017. Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 77, no. April 2016, pp. 748-759. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2017.01.145. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>.
- WEGERTSEDER, P., 2014. Integración de criterios de desempeños en el mejoramiento energético-ambiental de viviendas existentes Chile Autora : Paulina Wegertseder Martínez. , pp. 356 p.
- YANG, L., YAN, H. y LAM, J.C., 2014. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. *Applied Energy*, vol. 115, no. C, pp. 164-173. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.10.062.

Anexos

ANEXO A- Calibración del suelo

En este apartado se presentan las temperaturas medias de suelo obtenidas mensualmente mediante la herramienta *grounddomain*; las mismas se muestran en comparación con las temperaturas de suelo que figuran en el archivo *epw*, Es posible identificar que las mayores diferencias entre ambos datos se producen en el período caluroso, Adicionalmente, se presenta la temperatura configurada por defecto en el programa, temperatura constante de 18°C para todo el año, Los valores presentados subrayan la necesidad de una correcta configuración de este elemento para las simulaciones en edificios en oscilación libre y en contacto con el terreno.

	Clima actual			B1-2050			A2-2050		
	Temp. por defecto	Temp. Suelo epw	Temp. Suelo Calculada	Temp. Por defecto	Temp. Suelo epw	Temp. Suelo Calculada	Temp. por defecto	Temp. Suelo epw	Temp. Suelo Calculada
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Enero	18,0	18,2	25,6	18,0	19,4	26,6	18,0	19,7	26,6
Febrero	18,0	19,4	26,0	18,0	20,6	27,0	18,0	20,9	27,2
Marzo	18,0	19,8	24,8	18,0	21,1	25,7	18,0	21,4	26,3
Abril	18,0	19,4	22,5	18,0	20,6	23,5	18,0	20,9	23,8
Mayo	18,0	18,2	18,7	18,0	19,4	19,6	18,0	19,7	20,0
Junio	18,0	16,6	15,8	18,0	17,7	16,6	18,0	18,0	17,1
Julio	18,0	15,0	14,4	18,0	16,0	15,1	18,0	16,4	15,4
Agosto	18,0	13,8	14,7	18,0	14,8	15,4	18,0	15,1	15,5
Setiembre	18,0	13,4	16,6	18,0	14,3	17,6	18,0	14,7	17,9
Octubre	18,0	13,8	18,6	18,0	14,8	19,5	18,0	15,1	19,9
Noviembre	18,0	15,0	20,6	18,0	16,0	21,7	18,0	16,4	21,9
Diciembre	18,0	16,6	23,9	18,0	17,7	24,7	18,0	18,0	25,2

ANEXO B - Resultados demanda de energía por caso

En el presente anexo se muestran los resultados obtenidos para cada caso estudiado desglosando la demanda de calefacción (DC), demanda de refrigeración (DR) y demanda total (DT) y las variaciones en cada una respecto al caso base; para clima actual, escenario B1 y escenario A2.

anda anual: clima actual

Casos		Demanda anual			Reducción respecto al caso base			
		DC	DR	DT	DC	DR	DT	
		KWh/año	KWh/año	KWh/año	%	%	%	
Base	A	9845	2339	12184				
Mejoras individuales	T1	B	9846	1973	11820	0.0%	-15.6%	-3.0%
		C	9075	2303	11378	-7.8%	-1.5%	-6.6%
		D	8944	2330	11273	-9.2%	-0.4%	-7.5%
		E	9076	1999	11075	-7.8%	-14.5%	-9.1%
		F	7171	1922	9093	-27.2%	-17.8%	-25.4%
	T2	G	6809	1444	8253	-30.8%	-38.3%	-32.3%
		H	5611	688	6299	-43.0%	-70.6%	-48.3%
Mejoras combinación	T3	I	3947	721	4668	-59.9%	-69.2%	-61.7%
		J	3865	701	4566	-60.7%	-70.0%	-62.5%
		K	3529	730	4258	-64.2%	-68.8%	-65.1%
		L	3115	1094	4209	-68.4%	-53.2%	-65.5%
		M	3409	748	4156	-65.4%	-68.0%	-65.9%
		N	3256	773	4029	-66.9%	-66.9%	-66.9%
		O	3115	762	3877	-68.4%	-67.4%	-68.2%
Base	A1	9847	1687	11534	0.0%	-27.9%	-5.3%	
Mejoras combinación + Ventilación (4ach)		H 1	5611	373	5984	-43.0%	-84.0%	-50.9%
		I 1	3947	347	4294	-59.9%	-85.2%	-64.8%
		J 1	3865	333	4198	-60.7%	-85.7%	-65.5%
		K 1	3529	341	3869	-64.2%	-85.4%	-68.2%
		L 1	3115	508	3623	-68.4%	-78.3%	-70.3%
		M 1	3409	361	3770	-65.4%	-84.6%	-69.1%
		N 1	3256	356	3612	-66.9%	-84.8%	-70.4%
		O 1	3115	346	3461	-68.4%	-85.2%	-71.6%
Base	A2	9865	1394	11258	0.2%	-40.4%	-7.6%	
Mejoras combinación + Ventilación (8ach)		H 2	5614	263	5877	-43.0%	-88.8%	-51.8%
		I 2	3947	227	4174	-59.9%	-90.3%	-65.7%
		J 2	3865	215	4080	-60.7%	-90.8%	-66.5%
		K 2	3529	217	3746	-64.2%	-90.7%	-69.3%
		L 2	3115	314	3429	-68.4%	-86.6%	-71.9%
		M 2	3409	231	3640	-65.4%	-90.1%	-70.1%
		N 2	3256	228	3484	-66.9%	-90.3%	-71.4%
		O 2	3115	217	3332	-68.4%	-90.7%	-72.7%

Demanda anual: Clima Escenario B1 _ 2050

Casos		Demanda anual			Reducción respecto al caso base			
		DC	DR	DT	DC	DR	DT	
		KWh/año	KWh/año	KWh/año	%	%	%	
Base	A	7982	3818	11799				
Mejoras individuales	T1	B	7983	3328	11311	0.0%	-12.8%	-4.1%
		C	7342	3715	11057	-8.0%	-2.7%	-6.3%
		D	7239	3702	10941	-9.3%	-3.0%	-7.3%
		E	7342	3309	10651	-8.0%	-13.3%	-9.7%
	T2	F	5726	3213	8939	-28.3%	-15.8%	-24.2%
		G	5425	2598	8022	-32.0%	-32.0%	-32.0%
	Mejoras combinación	T3	H	4417	1462	5879	-44.7%	-61.7%
		I	3031	1466	4498	-62.0%	-61.6%	-61.9%
		J	2958	1456	4414	-62.9%	-61.9%	-62.6%
		K	2684	1472	4156	-66.4%	-61.4%	-64.8%
		L	2350	1986	4336	-70.6%	-48.0%	-63.3%
		M	2590	1460	4050	-67.5%	-61.8%	-65.7%
		N	2465	1502	3967	-69.1%	-60.7%	-66.4%
	O	2350	1481	3830	-70.6%	-61.2%	-67.5%	
Mejoras combinación + ventilación (4ach)	A1	7982	3198	11180	0.0%	-16.2%	-5.2%	
	H 1	4417	1158	5575	-44.7%	-69.7%	-52.7%	
	I 1	3031	1097	4128	-62.0%	-71.3%	-65.0%	
	J 1	2958	1051	4009	-62.9%	-72.5%	-66.0%	
	L 1	2684	1063	3747	-66.4%	-72.2%	-68.2%	
	K 1	2350	1482	3832	-70.6%	-61.2%	-67.5%	
	M 1	2590	1086	3676	-67.5%	-71.5%	-68.8%	
	N 1	2465	1106	3572	-69.1%	-71.0%	-69.7%	
	O 1	2350	1075	3424	-70.6%	-71.9%	-71.0%	
Mejoras combinación + ventilación (8ach)	A2	7986	3015	11001	0.0%	-21.0%	-6.8%	
	H 2	4417	985	5402	-44.7%	-74.2%	-54.2%	
	I 2	3031	901	3932	-62.0%	-76.4%	-66.7%	
	J 2	2958	860	3818	-62.9%	-77.5%	-67.6%	
	L 2	2684	863	3548	-66.4%	-77.4%	-69.9%	
	K 2	2350	1173	3522	-70.6%	-69.3%	-70.1%	
	M 2	2590	881	3471	-67.5%	-76.9%	-70.6%	
	N 2	2465	894	3359	-69.1%	-76.6%	-71.5%	
	O 2	2350	859	3209	-70.6%	-77.5%	-72.8%	

Demanda anual: Clima Escenario A2 _ 2050

		Demanda anual			Reducción respecto al caso base			
		DC	DR	DT	DC	DR	DT	
		KWh/año	KWh/año	KWh/año	%	%	%	
Base	A	7137	4330	11466				
Mejoras individuales	T1	B	7138	3793	10931	0.0%	-12.4%	-4.7%
		C	6543	4201	10743	-8.3%	-3.0%	-6.3%
		D	6443	4158	10602	-9.7%	-4.0%	-7.5%
	T2	E	6543	3753	10296	-8.3%	-13.3%	-10.2%
		F	5086	3689	8775	-28.7%	-14.8%	-23.5%
		G	4802	3051	7853	-32.7%	-29.5%	-31.5%
		H	3912	1771	5683	-45.2%	-59.1%	-50.4%
Mejoras combinación	T3	I	2650	1771	4421	-62.9%	-59.1%	-61.4%
		J	2583	1771	4354	-63.8%	-59.1%	-62.0%
		K	2335	1781	4117	-67.3%	-58.9%	-64.1%
		L	2032	2345	4377	-71.5%	-45.8%	-61.8%
		M	2246	1751	3997	-68.5%	-59.6%	-65.1%
		N	2134	1797	3931	-70.1%	-58.5%	-65.7%
		O	2032	1773	3804	-71.5%	-59.1%	-66.8%
Mejoras combinación + ventilación (4ach)	A1	7137	3377	10514	0.0%	-22.0%	-8.3%	
	H 1	3912	1127	5039	-45.2%	-74.0%	-56.1%	
	I 1	2650	1034	3684	-62.9%	-76.1%	-67.9%	
	J 1	2583	1029	3612	-63.8%	-76.2%	-68.5%	
	L 1	2335	1019	3354	-67.3%	-76.5%	-70.7%	
	K 1	2032	1395	3427	-71.5%	-67.8%	-70.1%	
	M 1	2246	1027	3273	-68.5%	-76.3%	-71.5%	
	N 1	2134	1028	3163	-70.1%	-76.2%	-72.4%	
O 1	2032	999	3031	-71.5%	-76.9%	-73.6%		
Mejoras combinación + ventilación (8ach)	A2	7137	2943	10080	0.0%	-32.0%	-12.1%	
	H 2	3912	876	4788	-45.2%	-79.8%	-58.2%	
	I 2	2650	774	3424	-62.9%	-82.1%	-70.1%	
	J 2	2583	767	3350	-63.8%	-82.3%	-70.8%	
	L 2	2335	756	3092	-67.3%	-82.5%	-73.0%	
	K 2	2032	1020	3051	-71.5%	-76.5%	-73.4%	
	M 2	2246	767	3013	-68.5%	-82.3%	-73.7%	
	N 2	2134	758	2892	-70.1%	-82.5%	-74.8%	
O 2	2032	734	2766	-71.5%	-83.0%	-75.9%		

ANEXO C - Resultados de categorías de confort adaptativo por caso

En el presente anexo se muestran los resultados obtenidos para cada caso estudiado bajo el modelo de confort adaptativo ASHRAE 55 para clima actual, escenario B1 y A2, Se disgrega la información según las categorías que el modelo establece: frío, ligeramente fresco, confort, ligeramente caluroso y calor, adicionalmente se incorporan las temperaturas mínimas y máximas alcanzadas en cada caso, Se presentan también las variaciones en cada una respecto al caso base.

Desempeño térmico: Clima actual - estar

Casos		Frío %	Ligera. fresco %	Confort %	Ligera. caluroso %	Calor %	Total confort %	Tmin °C	Tmax °C	Diferencia caso base			
										Confort	Tmin	Tmax	
										%	°C	°C	
base	A	31,3%	5,9%	31,8%	8,0%	22,9%	45,8%	9,8	33,4				
mejoras individuales	T1	B	31,3%	5,9%	32,8%	8,2%	21,8%	46,9%	9,8	33,0	1,1%	0,0	-0,4
		C	30,3%	6,1%	31,0%	8,2%	24,4%	45,3%	10,1	33,4	-0,5%	0,3	0,0
		D	30,2%	6,1%	30,9%	8,1%	24,7%	45,1%	10,1	33,5	-0,7%	0,3	0,1
		E	30,3%	6,1%	32,0%	8,3%	23,3%	46,3%	10,1	33,1	0,5%	0,3	-0,3
	T2	F	29,2%	6,2%	31,2%	8,6%	24,9%	46,0%	11,0	32,8	0,2%	1,2	-0,6
		G	30,3%	6,0%	33,3%	9,2%	21,2%	48,5%	11,2	31,8	2,7%	1,4	-1,6
		H	30,1%	6,1%	35,7%	11,4%	16,7%	53,1%	11,9	30,3	7,3%	2,1	-3,0
		I	25,1%	8,1%	33,6%	11,5%	21,7%	53,2%	13,2	30,1	7,4%	3,4	-3,3
mejoras combinación	T3	J	24,9%	8,1%	34,3%	11,5%	21,3%	53,8%	13,3	30,0	8,0%	3,5	-3,4
		K	23,5%	8,5%	34,0%	11,0%	23,0%	53,6%	13,6	30,0	7,8%	3,8	-3,3
		L	21,7%	8,7%	34,3%	5,2%	30,0%	48,3%	14,0	30,6	2,5%	4,2	-2,7
		M	23,0%	8,7%	34,0%	10,7%	23,6%	53,4%	13,6	30,1	7,6%	3,8	-3,3
		N	22,2%	8,7%	34,7%	9,4%	25,1%	52,8%	13,8	30,1	7,0%	4,0	-3,2
		O	21,7%	8,7%	34,9%	9,4%	25,3%	53,0%	14,0	30,0	7,2%	4,2	-3,3
base	A1	31,3%	5,9%	38,3%	8,8%	15,7%	53,0%	9,8	32,8	7,2%	0,0	-0,6	
Mejoras combinación + ventilación (4ach)		H 1	30,1%	6,1%	48,0%	8,4%	7,4%	62,5%	11,9	29,8	16,7%	2,1	-3,5
		I 1	25,1%	8,1%	48,7%	10,2%	7,9%	67,0%	13,2	29,5	21,2%	3,4	-3,9
		J 1	24,9%	8,1%	49,2%	10,1%	7,7%	67,4%	13,3	29,4	21,6%	3,5	-4,0
		K 1	23,5%	8,5%	49,2%	10,8%	8,0%	68,5%	13,6	29,4	22,7%	3,8	-4,0
		L 1	21,7%	8,7%	45,9%	12,5%	11,1%	67,2%	14,0	29,9	21,4%	4,2	-3,5
		M 1	23,0%	8,7%	49,0%	11,1%	8,2%	68,8%	13,6	29,4	23,0%	3,8	-3,9
		N 1	22,2%	8,7%	49,0%	11,6%	8,6%	69,3%	13,8	29,4	23,5%	4,0	-3,9
		O 1	21,7%	8,7%	49,3%	11,8%	8,4%	69,9%	14,0	29,4	24,1%	4,2	-4,0
base	A2	31,3%	6,0%	42,5%	7,9%	12,4%	56,3%	9,8	32,3	10,5%	0,0	-1,1	
Mejoras combinación + ventilación (8ach)		H 2	30,1%	6,1%	52,9%	6,5%	4,4%	65,5%	11,9	29,6	19,7%	2,1	-3,8
		I 2	25,1%	8,1%	55,1%	7,4%	4,3%	70,7%	13,2	29,2	24,9%	3,4	-4,1
		J 2	24,9%	8,1%	55,5%	7,5%	4,1%	71,0%	13,3	29,1	25,2%	3,5	-4,2
		K 2	23,5%	8,5%	56,1%	7,8%	4,1%	72,4%	13,6	29,1	26,6%	3,8	-4,3
		L 2	21,7%	8,7%	53,9%	9,5%	6,1%	72,2%	14,0	29,6	26,4%	4,2	-3,8
		M 2	23,0%	8,7%	56,1%	8,0%	4,2%	72,8%	13,6	29,1	27,0%	3,8	-4,2
		N 2	22,2%	8,7%	56,5%	8,3%	4,4%	73,5%	13,8	29,1	27,7%	4,0	-4,2
		O 2	21,7%	8,7%	57,0%	8,4%	4,2%	74,1%	14,0	29,1	28,3%	4,2	-4,3

Desempeño térmico: Clima actual – Dormitorio 2

Casos		Frío %	Ligera. fresco %	- Confort %	Ligera. caluroso %	Calor %	Total confort %	Tmin °C	Tmax °C	Diferencia caso base				
										Confort %	Tmin °C	Tmax °C		
base	A	29,5%	6,1%	34,9%	8,0%	21,6%	48,9%	9,8	32,4					
mejoras individuales	T1	B	29,5%	6,1%	38,0%	8,8%	17,7%	52,8%	9,8	31,9	3,9%	0,0	-0,5	
		C	29,1%	6,2%	34,3%	8,0%	22,5%	48,4%	10,1	32,3	-0,5%	0,2	0,0	
		D	28,2%	6,2%	34,3%	7,8%	23,5%	48,3%	10,1	32,4	-0,6%	0,3	0,1	
		E	29,1%	6,2%	37,1%	8,4%	19,2%	51,7%	10,1	31,9	2,8%	0,2	-0,4	
	T2	F	28,5%	7,0%	33,5%	8,7%	22,3%	49,2%	11,2	31,3	0,3%	1,4	-1,1	
		G	26,7%	7,2%	37,1%	9,1%	19,8%	53,4%	11,2	30,6	4,5%	1,3	-1,8	
		H	28,2%	7,2%	45,9%	13,1%	5,6%	66,2%	12,0	28,2	17,3%	2,2	-4,2	
		I	24,1%	9,0%	42,2%	15,8%	8,9%	66,9%	13,2	27,8	18,0%	3,4	-4,6	
mejoras combinación	T3	J	23,9%	9,1%	42,8%	16,7%	7,4%	68,7%	13,3	27,6	19,8%	3,5	-4,8	
		K	22,3%	9,7%	40,3%	17,6%	10,1%	67,6%	13,6	27,7	18,6%	3,8	-4,7	
		L	20,0%	10,2%	33,0%	12,1%	24,6%	55,4%	14,0	28,5	6,5%	4,2	-3,9	
		M	19,6%	10,3%	40,1%	18,7%	11,3%	69,2%	13,8	27,6	20,2%	3,9	-4,7	
		N	20,4%	10,1%	39,1%	16,9%	13,5%	66,1%	13,8	27,7	17,2%	4,0	-4,6	
		O	20,0%	10,2%	39,1%	17,0%	13,7%	66,4%	14,0	27,6	17,4%	4,2	-4,8	
		base	A1	29,5%	6,1%	40,1%	9,1%	15,2%	55,3%	9,8	31,8	6,4%	0,0	-0,6
		Mejoras combinación + ventilación (4ach)	H 1	28,2%	7,2%	56,8%	6,2%	1,7%	70,2%	12,0	27,7	21,2%	2,2	-4,6
I 1	24,1%		9,0%	58,1%	7,5%	1,2%	74,6%	13,2	27,3	25,7%	3,4	-5,1		
J 1	23,9%		9,1%	58,8%	7,2%	0,9%	75,2%	13,3	27,2	26,3%	3,5	-5,2		
K 1	22,3%		9,7%	58,6%	8,3%	1,0%	76,7%	13,6	27,1	27,8%	3,8	-5,3		
L 1	20,0%		10,2%	45,6%	16,5%	7,7%	72,3%	14,0	27,8	23,4%	4,2	-4,6		
M 1	19,6%		10,3%	58,9%	10,1%	1,1%	79,3%	13,8	27,1	30,4%	3,9	-5,3		
N 1	20,4%		10,1%	57,6%	10,6%	1,2%	78,4%	13,8	27,2	29,4%	4,0	-5,2		
O 1	20,0%		10,2%	58,1%	10,7%	1,0%	79,0%	14,0	27,0	30,0%	4,2	-5,3		
base	A2		29,5%	6,1%	44,6%	8,6%	11,3%	59,2%	9,8	31,3	10,3%	0,0	-1,1	
Mejoras combinación + ventilación (8ach)	H 2	28,2%	7,2%	60,2%	3,7%	0,8%	71,1%	12,0	27,5	22,1%	2,2	-4,9		
	I 2	24,1%	9,0%	62,5%	3,9%	0,5%	75,4%	13,2	27,0	26,4%	3,4	-5,4		
	J 2	23,9%	9,1%	62,8%	3,8%	0,4%	75,7%	13,3	26,9	26,8%	3,5	-5,5		
	K 2	22,3%	9,7%	63,0%	4,5%	0,4%	77,3%	13,6	26,8	28,3%	3,8	-5,5		
	L 2	20,0%	10,2%	56,2%	11,8%	1,9%	78,2%	14,0	27,4	29,2%	4,2	-5,0		
	M 2	19,6%	10,3%	63,4%	6,2%	0,5%	79,9%	13,8	26,8	31,0%	3,9	-5,6		
	N 2	20,4%	10,1%	63,0%	5,9%	0,5%	79,1%	13,8	26,9	30,2%	4,0	-5,5		
	O 2	20,0%	10,2%	63,3%	6,0%	0,4%	79,6%	14,0	26,7	30,7%	4,2	-5,6		

Desempeño térmico: Escenario B1 2050 - Estar

Casos		Frío	Ligera. fresco	Confort	Ligera. caluroso	Calor	Total confort	Tmin	Tmax	Diferencia caso base			
										Confor t	Tmin	Tmax	
										%	°C	°C	
base	A	26,4%	6,2%	31,6%	7,0%	28,8%	44,8%	10,6	34,4				
mejoras individuales	T1	B	26,1%	6,3%	32,3%	7,4%	27,9%	46,0%	10,7	34,0	1,2%	0,0	-0,4
		C	25,1%	6,5%	31,3%	6,8%	30,3%	44,6%	11,0	34,4	-0,2%	0,3	0,0
		D	25,3%	6,6%	31,6%	6,8%	29,9%	44,9%	10,9	34,4	0,1%	0,3	0,1
		E	25,1%	6,5%	31,8%	7,2%	29,4%	45,5%	11,0	34,0	0,7%	0,3	-0,3
	T2	F	23,5%	6,7%	31,6%	7,0%	31,2%	45,3%	11,8	33,8	0,5%	1,1	-0,6
		G	23,8%	7,3%	33,3%	7,7%	27,8%	48,4%	12,1	32,8	3,6%	1,5	-1,6
		H	23,0%	8,3%	34,5%	9,1%	25,2%	51,8%	12,8	31,3	7,1%	2,2	-3,1
		I	18,6%	7,5%	37,2%	6,8%	29,9%	51,5%	14,0	31,1	6,7%	3,4	-3,3
mejoras combinación	T3	J	18,5%	7,5%	37,4%	7,4%	29,2%	52,3%	14,1	31,0	7,5%	3,4	-3,4
		K	17,7%	7,1%	37,9%	6,5%	30,8%	51,5%	14,3	31,0	6,7%	3,7	-3,4
		L	16,3%	6,7%	36,6%	6,6%	33,8%	49,9%	14,6	31,6	5,1%	4,0	-2,8
		M	17,3%	7,0%	38,0%	6,3%	31,5%	51,2%	14,2	31,0	6,4%	3,6	-3,3
		N	16,7%	6,8%	38,0%	6,2%	32,4%	50,9%	14,5	31,0	6,2%	3,9	-3,3
		O	16,3%	6,7%	38,1%	6,3%	32,6%	51,1%	14,6	31,0	6,3%	4,0	-3,4
		base	A1	26,4%	6,2%	36,6%	8,4%	22,4%	51,2%	10,6	33,8	6,4%	0,0
Mejoras combinación + ventilación (4ach)		H 1	23,0%	8,3%	43,6%	11,7%	13,5%	63,5%	12,8	30,8	18,7%	2,2	-3,5
		I 1	18,6%	7,5%	45,3%	13,5%	15,1%	66,3%	14,0	30,5	21,5%	3,4	-3,9
		J 1	18,5%	7,5%	45,7%	13,5%	14,8%	66,6%	14,1	30,4	21,8%	3,4	-4,0
		K 1	17,7%	7,1%	45,8%	13,9%	15,5%	66,8%	14,3	30,4	22,0%	3,7	-4,0
		L 1	16,3%	6,7%	41,9%	15,2%	19,9%	63,8%	14,6	30,9	19,0%	4,0	-3,5
		M 1	17,3%	7,0%	45,6%	14,3%	15,8%	66,9%	14,2	30,4	22,1%	3,6	-4,0
		N 1	16,7%	6,8%	45,2%	15,0%	16,4%	66,9%	14,5	30,4	22,1%	3,9	-4,0
		O 1	16,3%	6,7%	45,3%	15,3%	16,4%	67,3%	14,6	30,3	22,5%	4,0	-4,0
base	A2	26,4%	6,2%	40,4%	8,6%	18,4%	55,2%	10,6	33,3	10,4%	0,0	-1,0	
Mejoras combinación + ventilación (8ach)		H 2	23,0%	8,3%	49,5%	10,2%	9,2%	67,9%	12,8	30,6	23,1%	2,2	-3,8
		I 2	18,6%	7,5%	52,3%	12,2%	9,4%	72,0%	14,0	30,2	27,2%	3,4	-4,1
		J 2	18,5%	7,5%	52,8%	11,9%	9,3%	72,2%	14,1	30,1	27,4%	3,4	-4,2
		K 2	17,7%	7,1%	52,9%	12,7%	9,6%	72,7%	14,3	30,1	27,9%	3,7	-4,3
		L 2	16,3%	6,7%	49,1%	15,4%	12,5%	71,2%	14,6	30,6	26,4%	4,0	-3,8
		M 2	17,3%	7,0%	53,0%	13,1%	9,7%	73,0%	14,2	30,1	28,2%	3,6	-4,2
		N 2	16,7%	6,8%	52,6%	14,0%	10,0%	73,4%	14,5	30,1	28,6%	3,9	-4,2
		O 2	16,3%	6,7%	52,9%	14,2%	9,8%	73,9%	14,6	30,1	29,1%	4,0	-4,3

Desempeño térmico: Escenario B1 2050 – Dormitorio 2

Casos		Frío %	Ligera. fresco %	Confort %	Ligera. caluroso %	Calor %	Total confort %	Tmin °C	Tmax °C	Diferencia caso base					
										Confort %	Tmin °C	Tmax °C			
base	A	25,3%	6,6%	32,4%	8,2%	27,6%	47,1%	10,6	33,4						
mejoras individuales	T1	B	25,4%	6,6%	34,6%	9,6%	23,7%	50,8%	10,6	32,9	3,7%	0,0	-0,5		
		C	25,0%	6,7%	31,9%	8,1%	28,2%	46,8%	10,7	33,4	-0,4%	0,1	0,0		
		D	24,4%	6,9%	32,2%	8,0%	28,4%	47,2%	10,8	33,5	0,0%	0,2	0,1		
		E	25,0%	6,7%	33,9%	9,6%	24,7%	50,3%	10,7	33,0	3,1%	0,1	-0,5		
	T2	F	24,7%	6,1%	32,1%	8,4%	28,7%	46,6%	11,7	32,3	-0,5%	1,1	-1,1		
		G	22,3%	7,3%	34,8%	8,9%	26,7%	51,0%	11,8	31,6	3,8%	1,2	-1,8		
		mejoras combinación	T3	H	21,9%	7,7%	40,1%	15,3%	15,0%	63,0%	12,8	29,2	15,9%	2,3	-4,2
				I	18,3%	7,5%	38,9%	16,1%	19,3%	62,5%	13,9	28,9	15,3%	3,3	-4,6
J	18,1%			7,4%	39,5%	16,4%	18,6%	63,3%	14,0	28,7	16,2%	3,4	-4,7		
K	16,9%			7,3%	39,0%	16,4%	20,5%	62,6%	14,2	28,7	15,4%	3,7	-4,8		
L	14,9%			7,2%	37,3%	8,6%	32,1%	53,1%	14,6	29,5	5,9%	4,0	-4,0		
M	14,8%			7,0%	40,2%	15,4%	22,6%	62,6%	14,3	28,6	15,4%	3,7	-4,8		
N	15,4%			7,0%	38,3%	14,9%	24,3%	60,3%	14,4	28,7	13,1%	3,8	-4,7		
O	14,9%			7,2%	38,3%	14,9%	24,7%	60,5%	14,6	28,6	13,3%	4,0	-4,9		
Mejoras combinación + ventilación (4ach)	base	A1	25,3%	6,6%	36,5%	9,5%	22,1%	52,7%	10,6	32,9	5,5%	0,0	-0,6		
	H 1	21,9%	7,7%	50,9%	13,4%	6,0%	72,1%	12,8	28,8	24,9%	2,2	-5,5			
	I 1	18,3%	7,5%	50,7%	16,8%	6,6%	75,1%	13,9	28,3	28,0%	3,3	-6,0			
	J 1	18,1%	7,4%	51,2%	17,1%	6,2%	75,7%	14,0	28,2	28,6%	3,4	-6,2			
	K 1	16,9%	7,3%	51,3%	17,4%	7,1%	76,0%	14,2	28,1	28,8%	3,6	-6,2			
	L 1	14,9%	7,2%	43,5%	14,6%	19,8%	65,3%	14,6	28,8	18,2%	4,0	-5,6			
	M 1	14,8%	7,0%	53,0%	16,6%	8,6%	76,6%	14,3	28,1	29,5%	3,7	-6,3			
	N 1	15,4%	7,0%	51,5%	17,3%	8,8%	75,8%	14,4	28,2	28,7%	3,8	-6,2			
	O 1	14,9%	7,2%	52,1%	17,1%	8,8%	76,4%	14,6	28,1	29,2%	4,0	-6,3			
Mejoras combinación + ventilación (8ach)	base	A2	25,3%	6,6%	40,5%	9,8%	17,9%	56,8%	10,6	32,4	9,7%	0,0	-1,9		
	H 2	21,9%	7,7%	57,7%	9,4%	3,2%	74,9%	12,8	28,6	27,8%	2,2	-5,8			
	I 2	18,3%	7,5%	58,8%	12,5%	2,9%	78,8%	13,9	28,1	31,7%	3,3	-6,3			
	J 2	18,1%	7,4%	59,3%	12,5%	2,7%	79,2%	14,0	28,0	32,1%	3,4	-6,4			
	K 2	16,9%	7,3%	59,8%	12,8%	3,2%	79,9%	14,2	27,9	32,7%	3,6	-6,5			
	L 2	14,9%	7,2%	51,4%	15,8%	10,7%	74,5%	14,6	28,5	27,3%	4,0	-5,9			
	M 2	14,8%	7,0%	61,8%	11,8%	4,7%	80,5%	14,3	27,9	33,4%	3,7	-6,5			
	N 2	15,4%	7,0%	60,3%	12,9%	4,3%	80,3%	14,4	27,9	33,1%	3,8	-6,4			
	O 2	14,9%	7,2%	61,1%	12,6%	4,3%	80,9%	14,6	27,8	33,7%	4,0	-6,6			

Desempeño térmico: Escenario A2 2050 – Estar

Casos		Frío %	Ligera. fresco %	Confort %	Ligera. caluroso %	Calor %	Total confort %	Tmin °C	Tmax °C	Diferencia caso base				
										Confort %	Tmin °C	Tmax °C		
base	A	23,7%	6,4%	31,6%	6,1%	32,2%	44,2%	11,3	33,3					
mejoras individuales	T1	B	23,7%	6,4%	32,4%	7,1%	30,4%	45,9%	11,2	32,8	1,8%	-0,1	-0,5	
		C	22,6%	6,4%	31,5%	6,0%	33,6%	43,8%	11,4	33,3	-0,3%	0,2	0,0	
		D	22,5%	6,3%	31,6%	5,8%	33,8%	43,8%	11,5	33,4	-0,4%	0,2	0,1	
		E	22,6%	6,4%	32,2%	6,7%	32,2%	45,3%	11,4	32,9	1,1%	0,2	-0,4	
	T2	F	20,9%	6,8%	32,2%	6,1%	34,1%	45,0%	12,3	32,7	0,8%	1,0	-0,6	
		G	21,0%	7,6%	33,7%	6,1%	31,6%	47,5%	12,6	32,3	3,3%	1,3	-1,0	
		T3	H	20,4%	7,9%	36,1%	7,7%	27,9%	51,6%	13,2	30,6	7,5%	2,0	-2,7
			I	16,6%	7,0%	38,1%	5,8%	32,6%	50,9%	14,5	30,7	6,7%	3,2	-2,6
J	16,4%		7,0%	38,3%	6,0%	32,3%	51,4%	14,5	30,6	7,2%	3,3	-2,7		
K	15,2%		7,1%	38,4%	6,2%	33,2%	51,6%	14,8	30,6	7,4%	3,5	-2,7		
L	13,3%		7,3%	36,4%	8,1%	34,9%	51,8%	15,1	31,2	7,6%	3,8	-2,1		
M	14,9%		6,8%	38,5%	6,2%	33,7%	51,4%	14,7	30,7	7,3%	3,5	-2,6		
N	14,0%	7,0%	38,2%	6,6%	34,2%	51,8%	15,0	30,7	7,6%	3,7	-2,6			
O	13,3%	7,5%	38,2%	7,0%	34,2%	52,6%	15,0	30,4	8,4%	3,8	-2,9			
base	A1	23,7%	6,4%	36,1%	8,7%	25,1%	51,2%	11,3	32,9	7,0%	0,0	-0,4		
Mejoras combinación + ventilación (4ach)	H 1	20,4%	7,9%	43,0%	12,4%	16,3%	63,3%	13,2	30,5	19,2%	1,9	-2,8		
	I 1	16,6%	7,0%	43,9%	14,3%	18,2%	65,2%	14,5	30,3	21,0%	3,2	-3,0		
	J 1	16,4%	7,0%	44,2%	14,6%	17,9%	65,7%	14,5	30,2	21,6%	3,3	-3,1		
	K 1	15,2%	7,1%	43,8%	15,4%	18,6%	66,2%	14,5	30,2	22,0%	3,2	-3,1		
	L 1	13,3%	7,3%	39,4%	16,1%	23,9%	62,8%	15,1	30,7	18,6%	3,8	-2,6		
	M 1	14,9%	6,8%	43,8%	15,4%	19,2%	65,9%	14,7	30,2	21,8%	3,5	-3,1		
	N 1	14,0%	7,0%	42,8%	16,3%	20,0%	66,0%	15,0	30,2	21,8%	3,7	-3,1		
	O 1	13,3%	7,3%	42,7%	16,5%	20,2%	66,5%	15,0	30,2	22,4%	3,7	-3,1		
base	A2	23,7%	6,4%	40,1%	8,9%	20,9%	55,4%	11,3	32,6	11,2%	0,0	-0,7		
Mejoras combinación + ventilación (8ach)	H 2	20,4%	7,9%	49,0%	11,3%	11,3%	68,3%	13,2	30,3	24,1%	1,9	-3,0		
	I 2	16,6%	7,0%	50,9%	13,8%	11,7%	71,7%	14,5	30,1	27,5%	3,2	-3,2		
	J 2	16,4%	7,0%	51,3%	13,8%	11,5%	72,1%	14,5	30,0	27,9%	3,3	-3,3		
	K 2	15,2%	7,1%	51,2%	14,6%	12,0%	72,9%	14,8	30,0	28,7%	3,5	-3,3		
	L 2	13,3%	7,3%	46,3%	17,2%	15,9%	70,8%	15,1	30,5	26,7%	3,8	-2,8		
	M 2	14,9%	6,8%	51,3%	14,8%	12,2%	72,9%	14,7	30,1	28,8%	3,5	-3,2		
	N 2	14,0%	7,0%	50,4%	16,1%	12,6%	73,4%	15,0	30,1	29,2%	3,7	-3,2		
	O 2	13,3%	7,3%	50,5%	16,4%	12,6%	74,1%	15,0	30,0	30,0%	3,7	-3,3		

Desempeño térmico: Escenario A2 2050 – Dormitorio 2

Casos		Frío	Ligera. fresco	Confort	Ligera. caluroso	Calor	Total confort	Tmin	Tmax	Diferencia caso base					
										Confort	Tmin	Tmax			
										%	°C	°C			
base	A	22,2%	6,3%	32,8%	8,1%	30,6%	47,2%	11,2	32,9						
mejoras individuales	T1	B	22,2%	6,4%	35,0%	10,1%	26,3%	51,5%	11,1	32,3	4,3%	-0,1	-0,6		
		C	21,9%	6,2%	32,5%	7,9%	31,5%	46,7%	11,3	32,9	-0,5%	0,1	-0,1		
		D	21,3%	6,0%	32,8%	7,7%	32,2%	46,5%	11,4	32,9	-0,7%	0,2	0,0		
		E	21,9%	6,2%	34,4%	9,7%	27,8%	50,3%	11,3	32,3	3,2%	0,1	-0,6		
	T2	F	19,8%	7,2%	33,5%	6,8%	32,7%	47,5%	12,4	31,5	0,3%	1,2	-1,4		
		G	18,0%	6,8%	37,0%	7,8%	30,4%	51,6%	12,5	31,2	4,4%	1,3	-1,7		
		mejoras combinación	T3	H	18,3%	7,1%	40,7%	16,9%	17,0%	64,7%	13,4	28,7	17,6%	2,2	-4,2
				I	15,0%	6,7%	39,4%	12,9%	26,0%	59,0%	14,4	28,6	11,8%	3,3	-4,3
J	14,6%			6,8%	39,6%	13,5%	25,5%	59,9%	14,5	28,5	12,8%	3,3	-4,4		
K	13,5%			6,4%	40,2%	12,4%	27,6%	59,0%	14,8	28,5	11,8%	3,6	-4,4		
L	12,0%			6,0%	40,7%	5,6%	35,7%	52,3%	15,1	29,4	5,1%	3,9	-3,5		
M	11,8%			6,0%	41,5%	11,6%	29,1%	59,1%	14,9	28,5	12,0%	3,7	-4,4		
N	12,3%			6,2%	40,8%	12,2%	28,5%	59,2%	14,9	28,4	12,1%	3,7	-4,5		
O	12,0%			6,0%	41,1%	11,7%	29,1%	58,8%	15,1	28,5	11,7%	3,9	-4,4		
base	A1	22,2%	6,3%	36,3%	11,0%	24,2%	53,6%	11,2	32,4	6,4%	0,0	-0,6			
Mejoras combinación + ventilación (4ach)		H 1	18,3%	7,1%	51,4%	15,7%	7,6%	74,1%	13,4	28,5	27,0%	2,2	-4,4		
		I 1	15,0%	6,7%	50,2%	19,9%	8,2%	76,8%	14,4	28,2	29,6%	3,3	-4,8		
		J 1	14,6%	6,8%	50,5%	20,2%	7,9%	77,6%	14,5	28,1	30,4%	3,3	-4,9		
		K 1	13,5%	6,4%	50,7%	20,8%	8,6%	77,9%	14,8	28,0	30,7%	3,6	-4,9		
		L 1	12,0%	6,0%	43,8%	14,5%	23,6%	64,3%	15,1	28,7	17,2%	3,9	-4,2		
		M 1	11,8%	6,0%	51,7%	20,5%	9,9%	78,3%	14,9	28,0	31,1%	3,7	-4,9		
		N 1	12,5%	5,8%	50,3%	21,0%	10,4%	77,1%	15,0	28,1	29,9%	3,8	-4,8		
		O 1	12,0%	6,0%	50,4%	21,3%	10,2%	77,8%	15,1	28,0	30,6%	3,9	-4,9		
base	A2	22,2%	6,3%	41,0%	10,6%	19,8%	58,0%	11,2	32,0	10,8%	0,0	-0,9			
Mejoras combinación + ventilación (8ach)		H 2	18,3%	7,1%	58,8%	11,5%	4,4%	77,3%	13,4	28,3	30,1%	2,2	-4,6		
		I 2	15,0%	6,7%	60,0%	13,9%	4,4%	80,6%	14,4	28,0	33,4%	3,3	-5,0		
		J 2	14,6%	6,8%	60,5%	14,0%	4,1%	81,4%	14,5	27,9	34,2%	3,3	-5,0		
		K 2	13,5%	6,4%	61,2%	14,4%	4,5%	82,0%	14,8	27,9	34,8%	3,6	-5,0		
		L 2	12,0%	6,0%	51,8%	16,8%	13,3%	74,7%	15,1	28,4	27,5%	3,9	-4,5		
		M 2	11,8%	6,0%	62,8%	13,4%	5,9%	82,3%	14,9	27,8	35,1%	3,7	-5,1		
		N 2	12,5%	5,8%	61,3%	14,7%	5,7%	81,8%	15,0	27,9	34,6%	3,8	-5,0		
		O 2	12,0%	6,0%	61,8%	14,6%	5,5%	82,4%	15,1	27,8	35,3%	3,9	-5,1		