

# EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL.

Situación actual y evaluación de estrategias de  
mejoramiento para distintas condiciones climáticas  
en el Uruguay.

## **Universidad de la República**

### **Facultad de Ingeniería**

Dr. Ing. Pedro Curto (Responsable)

Dr. Ing. Pedro Galione

Dr. Ing. Federico Favre

MSc. Ing. Sofía Gervaz

Ing. Juan Romero

### **Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo**

Arq. Alicia Picción (Co-Responsable)

MSc. Arq. Maria Noel López

Arq. Magdalena Camacho

MSc. Arq. Lucía Pereira

### **Centro Universitario Regional Norte**

MSc. Ing. Juan Rodríguez

MSc. Lic. Ileana Berges

Año 2021



# Agradecimientos

Los integrantes del equipo de trabajo agradecen a Dr. Ing. José Cataldo, Dr. Italo Bove y Dr. Ing. Rodrigo Alonso Suárez, por sus aportes a través de las diversas interacciones interesantes y fructíferas, así como por el aporte de información valiosa para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, a la ANII por su apoyo imprescindible a través del otorgamiento de financiación para llevar a cabo esta investigación, en el marco del Fondo Sectorial de Energía (proyecto 2017\_1\_144779).





# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Distribución habitacional</b>	<b>5</b>
2.1. Distribución de viviendas en el Uruguay . . . . .	7
2.1.1. Estimación de viviendas actualizadas a valores de 2018 .	10
2.1.2. Distribución geográfica del sector residencial . . . . .	10
2.1.3. Tamaño . . . . .	14
2.1.4. Nivel de ingreso de los hogares . . . . .	16
2.1.5. Antigüedad . . . . .	21
2.2. Definición de los modelos representativos . . . . .	23
2.2.1. Ocupantes y patrones de uso . . . . .	26
2.2.2. Envoltente: geometría y materiales . . . . .	31
2.2.3. Orientación, apareamiento y entorno . . . . .	33
2.2.4. Configuración del modelo y matriz de probabilidades . .	38
<b>3. Modelado</b>	<b>41</b>
3.1. Modelos . . . . .	42
3.1.1. Balance de energía las superficies . . . . .	43
3.1.2. Cargas por Infiltraciones y Ventilación natural . . . . .	54
3.1.3. Sistemas HVAC . . . . .	58
3.1.4. Balance de Energía al aire . . . . .	59
3.2. Procesamiento de resultados casos individuales . . . . .	60
3.2.1. Cargas del sistema HVAC . . . . .	61
3.2.2. Envoltente . . . . .	61
3.2.3. Ventanas . . . . .	64
3.2.4. Infiltraciones y ventilación . . . . .	65
3.2.5. Ganancias internas . . . . .	66
3.2.6. Contribuciones relativas . . . . .	66
3.3. Validación en un caso experimental . . . . .	67

3.3.1. Montaje experimental . . . . .	67
3.3.2. Modelo en EnergyPlus . . . . .	69
3.3.3. Resultados . . . . .	71
<b>4. Simulación del parque habitacional</b>	<b>77</b>
4.1. Automatización . . . . .	77
4.1.1. Entradas . . . . .	78
4.1.2. Estructura del código . . . . .	80
4.1.3. Salidas . . . . .	83
4.1.4. Análisis de convergencia . . . . .	84
4.2. Resultados de requerimientos energéticos . . . . .	87
4.2.1. Desagregados por región . . . . .	90
4.2.2. Desagregados por decil socioeconómico . . . . .	94
4.2.3. Desagregados por tamaño . . . . .	99
4.2.4. Desagregados por antigüedad . . . . .	101
4.2.5. Impacto del usuario . . . . .	104
4.3. Resultados en viviendas sin acondicionar . . . . .	108
4.3.1. Desagregados por región . . . . .	110
4.3.2. Desagregados por decil socioeconómico . . . . .	111
4.4. Análisis de sensibilidad para un arquetipo y región . . . . .	116
4.4.1. Escenarios . . . . .	119
4.4.2. Resultados y discusión . . . . .	122
4.5. Conclusiones . . . . .	151
<b>5. Evaluación de mejoras</b>	<b>155</b>
5.1. Mejoras propuestas . . . . .	160
5.2. Ahorros en requerimientos energéticos . . . . .	161
5.3. Análisis de costo-beneficio de las mejoras . . . . .	165
5.4. Conclusiones . . . . .	168
<b>6. Conclusiones generales</b>	<b>171</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>175</b>
<b>A. Años Meteorológicos Típicos</b>	<b>183</b>
<b>Anexos</b>	<b>182</b>

<b>B. Correcciones de velocidad</b>	<b>189</b>
B.1. Velocidad del viento en la capa límite atmosférica en terreno plano, uniforme y estabilidad neutra . . . . .	189
B.2. Uso de la velocidad del viento para el cálculo de presión sobre las viviendas . . . . .	190
B.3. Ajustes de velocidad por cambio de terreno y abrigo . . . . .	191
B.3.1. Ajuste de la velocidad de Sherman y Modera . . . . .	191
B.3.2. Ajuste de la velocidad de Walker y Wilson . . . . .	192
B.3.3. Corrección implementada en las simulaciones . . . . .	193
B.3.4. Datos disponibles en los Años Meteorológicos Típicos (AMT) . . . . .	194
<b>C. Materiales y configuración</b>	<b>195</b>
<b>D. Tipologías de referencia</b>	<b>199</b>



# Capítulo 1

## Introducción

El sector residencial urbano en Uruguay, incluye muchos tipos de edificios (aislados, apareados, agrupados), con predominancia del tipo aislado sobre los agrupados, con diferentes cualidades espaciales y constructivas en la tipología de vivienda y superficie de la unidad, según la ciudad o el barrio.

La demanda de energía en el sector residencial proviene de la energía que se utiliza en los diferentes servicios, tales como calefacción, refrigeración, cocina, calentamiento de agua, funcionamiento de los electrodomésticos e iluminación. La cantidad y tipo de energía utilizada en las viviendas para los servicios o funciones que en ella se desarrollan están relacionados principalmente con las características climáticas, el diseño arquitectónico, las características de los sistemas consumidores de energía, la sensación de confort de los usuarios y el nivel económico de los ocupantes. La distribución del parque habitacional y sus características es una de las variables más importantes para caracterizar el desempeño energético de las viviendas. Por ejemplo si se considera el total de las viviendas del país para el año 2017, el 75,29 % de los casos de tipo de vivienda corresponden a la tipología casa, que sumado al 5,29 % correspondiente al apartamento en edificio de una planta, hace que para el 80 % de los casos de vivienda se deba considerar el techo como parte de la envolvente de la misma.

Debido a la complicada interacción de todos estos factores y la gran variedad en las características de las viviendas, no es sencillo caracterizar el consumo energético del sector doméstico en el país. Recientemente, se han desarrollado diferentes modelos energéticos para edificios (BEM por sus siglas en inglés) con el objetivo de entender, evaluar y manejar el consumo energético en el sector residencial. Los modelos energéticos de edificios a escala urbana (UBEM) están ganando notoriedad ya que aparecen como herramientas prometedoras a la hora de cuantificar los requerimientos energéticos para ciudades enteras. Li et

al. [1] presentan una revisión de los UBEM, distinguiendo dos grandes tipos de modelos: top-down y bottom-up. El primero utiliza el consumo total estimado del sector residencial y otras variables pertinentes para atribuir el consumo a características de todo el sector. Por el contrario, los modelos bottom-up calculan el consumo energético para edificios individuales y luego extrapolan esos resultados para representar una región o nación [2]. Por lo tanto, cada técnica requiere diferentes niveles de detalle de datos de entrada y produce resultados con diferente aplicabilidad.

En los modelos top-down, el sector residencial se trata como una entidad energética única y su consumo se representa usualmente en términos de tipos de energía usados (electricidad, gas natural, fuel-oil, LGP, leña) pero sin considerar edificios individuales o usos finales. Con este enfoque, las proyecciones de demanda se determinan relacionando consumo energético asociándolo con los factores principales como cambios en Producto Bruto Interno (PBI), precio de la energía, población, tamaño de vivienda, tecnologías, condiciones climáticas, etc. [1, 3, 4]. Esta relación se establece con series de datos históricos mediante modelos econométricos basados en precios e ingresos, o modelos tecnológicos que estiman el consumo energético en todo el parque habitacional de acuerdo a las tendencias de propiedad de electrodomésticos [2]. Por lo tanto, la información necesaria para estos modelos incluye series de datos históricos y las variables consideradas son indicadores macroeconómicos, condiciones climáticas, ratios de crecimiento de vivienda, etc. En definitiva, los modelos top-down requieren relativamente poca información y permiten analizar efectos de corto plazo. Sin embargo no son útiles para evaluar cambios tecnológicos, o para estudiar el efecto de medidas de eficiencia energética. Además se pueden cometer errores considerables al utilizarlos para predicciones de largo plazo [5].

Por el contrario, en los modelos bottom-up el consumo energético se determina en base a datos de edificios individuales, y luego los resultados se extrapolan para representar el total del parque habitacional a estudiar. Esto implica la definición de arquetipos, que consisten en edificios utilizados para representar un grupo de viviendas con propiedades similares. Esta metodología se utiliza para estimar la contribución de cada uso final energético y combinarlos para el cálculo de la demanda del sector. Para lograr esto, existen por un lado modelos que procesan datos de edificios individuales por medio de métodos estadísticos analizando muestras de edificios [6–8], y por otro lado modelos que utilizan simulaciones numéricas basadas en los principios físicos para caracterizar el comportamiento de los arquetipos, como los desarrollados por Davila et al. [9] para representar la ciudad de Boston, o el desarrollado por National Renewable Energy Laboratory (NREL): ResStock™ [10], que se

utilizó para analizar el potencial de medidas de eficiencia energética en Estados Unidos [11]. En el caso uruguayo se cuenta con un estudio previo de este tipo bastante simplificado llevado a cabo por la Dirección Nacional de Energía (DNE) [12], utilizando ocho arquetipos de geometría muy simples sin divisiones internas, en dos ubicaciones, permitiendo analizar en esos casos el impacto de la ubicación, orientación, compacidad y porcentaje de área vidriada.

Este último enfoque, el de los UBEM de tipo bottom-up basados en la física del problema, son útiles para estimar la evolución de la demanda energética residencial a largo plazo, así como para estudiar distintos escenarios, como la penetración de nuevas tecnologías, la inclusión de medidas de eficiencia energética o la evaluación del impacto de implementar ciertas políticas energéticas. Por otro lado, requieren un gran nivel de detalle de la información de entrada y para su calibración, tienen un alto costo asociado a la necesidad de ejecutar grandes simulaciones y la calidad de los resultados dependerá fuertemente de los arquetipos definidos.

En el presente proyecto se tiene como objetivo modelar el requerimiento energético para acondicionamiento térmico del sector residencial en Uruguay, para caracterizar la situación actual y evaluar el posible impacto de medidas de eficiencia energética. Para ello, se utiliza un enfoque bottom-up basado en la física a partir de edificaciones identificadas como representativas del parque habitacional y considerando su predominio. Para desarrollar dicho modelado se realizaron varias etapas que se desarrollan en los capítulos del presente informe. En el Capítulo 2 se presenta una metodología para caracterizar el parque de viviendas nacional. Se definen los edificios típicos y su predominio en el parque habitacional, así como las principales hipótesis consideradas como ocupación de las viviendas, criterios de confort, etc. En el Capítulo 3 se presentan los detalles del estudio del software EnergyPlus, utilizado para el modelado individual de los edificios, incluyendo el detalle de los modelos seleccionados y la validación en un caso de estudio. Luego en el Capítulo 4 se presenta la metodología para la automatización de las simulaciones de los arquetipos y sus variantes. En este capítulo se presentan también los resultados de requerimientos para acondicionamiento térmico de la simulación del parque habitacional y su análisis. Finalmente, en el Capítulo 5 se utiliza el método desarrollado para evaluar el impacto en reducción de requerimientos para varias medidas de eficiencia energética aplicadas al parque habitacional uruguayo, incluyendo un análisis del costo asociado a cada mejora.





## Capítulo 2

# Distribución y representación del parque habitacional del Uruguay

La demanda de energía en el sector residencial depende de múltiples factores entre los que pueden encontrarse la ubicación geográfica, las características de la vivienda, el tipo de electrodomésticos, el mercado energético y el comportamiento de los usuarios [2, 13–15].

Si se profundiza en el análisis de los consumos de energía residencial, estos se vinculan básicamente con dos aspectos: los contextuales y los comportamentales [16].

- **Aspectos contextuales.** Existen en esta área condicionantes externas a la vivienda -como la ubicación geográfica, el clima local, el mercado energético y el tipo de electrodomésticos- y condicionantes internas o características de la vivienda, que pueden agruparse en: calidad de la construcción, calidad de la instalación eléctrica y otros equipamientos de uso energético.
- **Aspectos socioeconómicos.** El consumo de energía se vincula normalmente a características socioeconómicas, asociadas a estilos de vida y comportamiento frente al consumo [17]. El número de ocupantes, su rango etario y nivel educativo, además del tiempo de ocupación y los usos alternativos que el hogar pueda tener -para actividades laborales, por ejemplo-, inciden sobre el uso y los niveles de consumo energético de los hogares.

Investigaciones como la de Kavousian [18] señalan que las condiciones externas y las características físicas del edificio tienen mayor influencia en el consumo eléctrico residencial, que otros factores como por ejemplo el comportamiento del usuario. En la misma línea, Santin et al. [19], demuestran que el 42 % de la variabilidad en el consumo eléctrico residencial está determinado por las características físicas del edificio y el 4,2 % por el comportamiento del usuario. Concluyendo que la mayor incidencia en el consumo eléctrico residencial, depende de la superficie construida, el tipo de construcción del edificio y el uso de calentador de agua eléctrico. En este trabajo se tomaron estos dos aspectos como principales para cuantificar y analizar los tipos de vivienda (características físicas del edificio y comportamiento del usuario).

Para establecer las dimensiones del problema y cuantificar sus variables, se relevaron y analizaron los datos disponibles en los principales organismos estatales: Instituto Nacional de Estadística (INE), la Intendencia de Montevideo (IM) y la Dirección Nacional de Energía (DNE)<sup>1</sup>.

En base a esta información recabada se propuso la metodología que se presenta a continuación, a los efectos de caracterizar las tipologías de vivienda presentes en nuestro país.

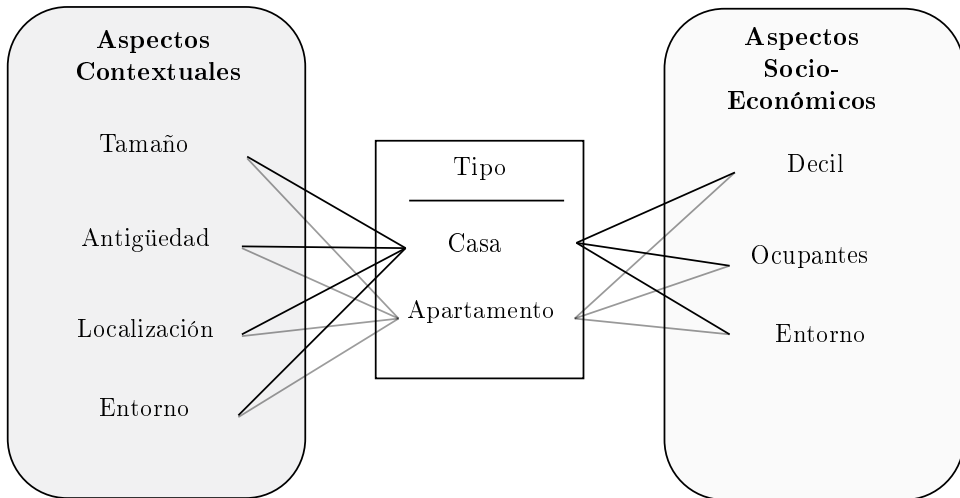


Figura 2.1: Variables que afectan el desempeño energético de una vivienda

<sup>1</sup>También, se efectuaron consultas al Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), a la Agencia Nacional de Vivienda (ANV) solicitando una información desagregada de las tipologías construidas por el Ministerio, pero la misma fue denegada.

En la Figura 2.1 se presenta el esquema elegido para caracterizar el parque habitacional a nivel nacional, que se utilizará como base para determinar la caracterización energética de las viviendas en el Uruguay. Se cuantifica la cantidad de viviendas por departamentos y tipos edificatorios (Casa o Apartamento), utilizando los datos del INE [20]. Como principales aspectos contextuales se consideraron el tamaño de la edificación (mediante los  $m^2$  construidos por tipología), la edad de las construcciones, la localización (caracterizando las variables climatológicas) y el entorno cercano de cada edificación. Por otra parte, como aspectos socioeconómicos se consideraron el nivel de ingresos de los habitantes de esas viviendas (consultando Encuesta Continua de Hogares [21]), el nivel de ocupación (número de habitantes en la vivienda) que se estableció en función del nivel socioeconómico y del tamaño de la vivienda y el comportamiento de los ocupantes que se definió tomando como variable de referencia el uso eficiente de la energía (atendiendo dos estados, uno malo y otro bueno).

Para cada subcategoría (tipo de edificación, tamaño, antigüedad y decil de ingreso) se seleccionaron modelos de edificaciones representativos (geometría, materiales constructivos, características del entorno, entre otros aspectos) y perfiles de uso.

## 2.1. Distribución de viviendas en el Uruguay

A partir de los datos correspondientes al Censo 2011 del INE [20] se puede afirmar, con un error inferior al 5 %, que el total de viviendas particulares en el país es de 1.133.910. De las cuales se destacan dos datos: que el 95 % de las viviendas son urbanas y que el 41,5 % del total están ubicadas en Montevideo.

En la Tabla 2.2 se presenta la distribución de viviendas ocupadas, diferenciando por departamento. También se puede observar el peso relativo que tiene cada departamento en el dominio de viviendas del país. Como se mencionó anteriormente Montevideo concentra el 41,5 % de las viviendas del país, seguido por Canelones que cubre el 15,4 %. O dicho de otra forma, cuatro de los diecinueve departamentos (Montevideo, Canelones, Maldonado y Colonia) concentran el 66,1 % de las viviendas del país; el resto de los departamentos concentra el 33,9 % restante, de los cuales, individualmente ninguno supera el 3,2 % del total.

En la Tabla 2.2 se presenta un resumen de la distribución de las viviendas particulares, en relación a su área de ubicación (urbana o rural) y tipo (casa o apartamento), según el Censo de viviendas del 2011 [20].

A los efectos del estudio energético y dada las características que presentan las viviendas tipo casa y apartamentos en una planta, se considerarán en

Tabla 2.1: Resumen de la distribución de viviendas ocupadas en el país (datos en miles de unidades) [20].

	Ocupadas			% de viviendas ocupadas
	Total	Particulares	Colectivas	
Total País	1.136.564	1.133.910	2654	100
Salto	36.720	36.487	233	3,2
Paysandú	35.418	35.270	148	3,1
Artigas	22.694	22.632	62	2,0
Rivera	33.953	33.885	68	3,0
Colonia	45.194	45.074	120	4,0
San José	36.760	36.677	83	3,2
Tacuarembó	30.474	30.367	107	2,7
Cerro Largo	29.044	28.990	54	2,6
Soriano	27.306	27.251	55	2,4
Florida	23.504	23.384	120	2,1
Durazno	18.793	18.733	60	1,7
Río Negro	17.267	17.182	85	1,5
Flores	8.828	8.773	55	0,8
Canelones	174.924	174.687	237	15,4
Maldonado	58.702	58.614	88	5,2
Rocha	26.156	26.100	56	2,3
Lavalleja	21.627	21.565	62	1,9
Treinta y Tres	17.187	17.145	42	1,5
Montevideo	472.013	471.094	919	41,5
Resto País	664.551	662.816	1.735	58,5

la misma categoría (aunque tengan un registro de catastro diferente). Otros como, local no construido para vivienda, vivienda móvil (carpa, casa rodante,

Tabla 2.2: Resumen de la distribución viviendas particulares ocupadas, por tipo de vivienda, región y área (datos en miles de unidades) [20].

Región y área	Total	Tipo de vivienda particular			
		Casa	Apartamento en altura	Apartamento en una planta	Otros
<b>Total</b>	<b>1.133,91</b>	<b>875,71</b>	<b>169,37</b>	<b>59,68</b>	<b>29,16</b>
Urbano	1.075,64	818,88	169,37	59,66	27,73
Rural	58,27	56,82	-	<1	1,42
<b>Montevideo</b>	<b>471,10</b>	<b>253,28</b>	<b>147,99</b>	<b>46,93</b>	<b>22,89</b>
Urbano	467,77	250,35	147,99	46,93	22,51
Rural	3,32	2,93	-	<1	<1
<b>Resto País</b>	<b>662,82</b>	<b>622,42</b>	<b>21,38</b>	<b>12,75</b>	<b>6,26</b>
Urbano	607,87	568,54	21,38	12,73	5,23
Rural	54,95	53,89	-	<1	1,04

etc.), apartamento o cuarto en local o vivienda colectiva, etc. no fueron considerados como parte del dominio de viviendas. Al eliminar estas, el total de viviendas válidas es de 1.104.755 viviendas en todo el país (correspondiente al 97,4 % del total de viviendas ocupadas), que se distribuyen en 84,7 % de casas o apartamentos de una planta y 15,3 % de apartamentos en altura (ver Tabla 2.3).

Tabla 2.3: Distribución del dominio de viviendas ocupadas del país.

Viviendas	Totales	%
Casa + Ap. en una planta	935.386	84,7 %
Ap. en altura	169.369	15,3 %
Total	1.104.755	100 %

Cuando se observa solamente las viviendas que están en Montevideo, la distribución del dominio de viviendas ocupadas se ajusta según la Tabla 2.4 bajando considerablemente el porcentaje de viviendas tipo casa (o apartamentos en una planta).

Tabla 2.4: Distribución del dominio de viviendas ocupadas en Montevideo.

Viviendas	Totales	%
Casa + Ap. en una planta	300.214	67,0 %
Ap. en altura	147.989	33,0 %
Total	448.203	100 %

Sin embargo, cuando se consideran las viviendas que están en el resto del país, la distribución del dominio de viviendas ocupadas se ajusta según la Tabla 2.5, subiendo considerablemente el porcentaje de viviendas tipo casa (o apartamentos en una planta) en comparación con el total de casas a nivel nacional.

Tabla 2.5: Distribución del dominio de viviendas ocupadas en el interior.

Viviendas	Totales	%
Casa + Ap. en una planta	635.172	96,7 %
Ap. en altura	21.380	3,3 %
Total	656.552	100 %

### 2.1.1. Estimación de viviendas actualizadas a valores de 2018

Todos los valores que se han visto hasta ahora, se obtienen a partir de los datos del Censo de viviendas del 2011 [20], por lo tanto es necesario proyectar estos resultados a un valor actual. Para actualizar las cifras del Censo de 2011 a valores del 2018 se considera la tasa de crecimiento acumulado del 2004 al 2011 y se extrapolan los datos del 2011 al 2018.

Por lo tanto, si en los 7 años transcurridos entre 2004 y 2011 la tasa de crecimiento anual es  $i$ , cumple la siguiente relación:

$$X_{2011} = X_{2004} (1 + i)^n \quad (2.1)$$

donde  $X_{2011}$  y  $X_{2004}$  corresponden a la cantidad de viviendas ocupadas válidas en los años 2011 y 2004 respectivamente; y  $n$  los años transcurridos entre 2004 y 2011. Despejando la tasa de crecimiento acumulada  $i$  se obtiene de la ecuación 2.2.

$$i = \left( \frac{X_{2011}}{X_{2004}} \right)^n \quad (2.2)$$

Considerando  $X_{2011} = 1.104.755$ ,  $X_{2004} = 1.033.813$  y  $n = 7$  el valor de la tasa de crecimiento acumulado interanual es,

$$i = 0,95\%$$

Utilizando la Ecuación 2.1 y la tasa  $i$ , para estimar el valor de la cantidad de viviendas válidas para el año 2018, se tiene que:

$$X_{2018} = X_{2011} (1 + i)^{(2018-2011)} = 1.104.755 (1,0095)^7 = 1.180.565$$

Por lo tanto el total de viviendas válidas ocupadas, consideradas en este trabajo es aproximadamente 1.180.565 y la muestra debe representar esta población con una distribución de viviendas proporcional a la presentada en las Tablas 2.1 y 2.3.

Más adelante cuando se definan las zonas geográficas representativas, también se definirá la distribución de viviendas en cada zona.

### 2.1.2. Distribución geográfica del sector residencial

La ubicación geográfica incide directamente en el clima local y, en consecuencia, en el consumo energético; pero además la ubicación de la residencia

puede afectar la disponibilidad de recursos energéticos a la hora de consumirlos. Esta sección aborda la cuantificación de este aspecto para identificar la distribución del sector y sus condiciones.

Según la clasificación climática de Köppen, Uruguay presenta un clima del tipo «Cfa»<sup>2</sup> [22], correspondiente a templado y húmedo, con precipitaciones todo el año y el mes más cálido presenta temperaturas superiores a 22°C. Como puede verse en la Figura 2.2, la norma de Zonificación Climática UNIT 1026:99 divide el territorio nacional en tres zonas climáticas: Zona II b Cálida, Zona III b Templada cálida y Zona IV d Templada Fría, con tendencia a mayores temperaturas del aire en las localidades ubicadas más al norte del país.



Figura 2.2: Clasificación climática de Uruguay, según la Norma UNIT 1026:99.

Si se divide el territorio nacional en estas tres zonas y se considera aparte Montevideo podemos identificar los principales departamentos y considerar los que más viviendas tienen dentro de cada zona. Se redefine la Zona II b Cálida como la **Zona 1** (o Norte-Noroeste), Zona III b Templada cálida como la **Zona 2** (o Suroeste-Centro-Noreste), Zona IV d Templada Fría como la **Zona 3** y Montevideo como la **Zona 4**. Una vez definidas las diferentes zonas de trabajo, se puede cruzar la información de la sección 2.1, de esta forma se obtiene el peso relativo de cada zona en cuanto a la cantidad y tipo de viviendas. La

<sup>2</sup>Según Carver et al. [22] parte de la costa atlántica del Uruguay podría clasificarse como «Cfb».

distribución de viviendas clasificadas por zona y tipo de vivienda se presenta en la Tabla 2.6.

La Figura 2.3 muestra con detalle el campo de temperatura del aire en el país (medida a 1,5 m sobre el nivel del suelo, con césped corto)<sup>3</sup>. El campo de temperaturas medias anuales sobre el país tiene una orientación general de sureste a noroeste, donde las temperaturas medias para todo el Uruguay son de 17,5°C, con una isoterma (línea de igual temperatura) media máxima de 19,0°C sobre Artigas y una media mínima de 16,0°C sobre la costa atlántica en Rocha.

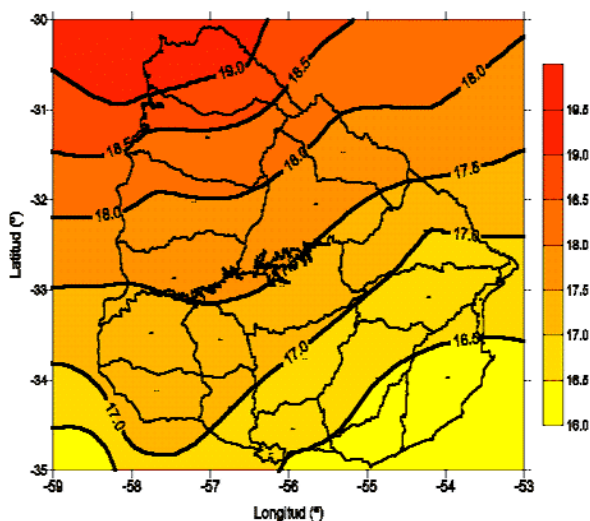


Figura 2.3: Mapas de promedios de temperatura, Fuente INUMET.

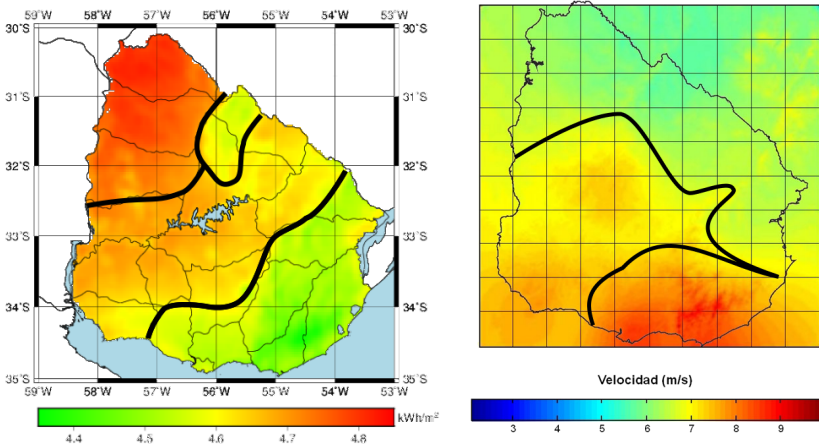
<sup>3</sup>El termómetro utilizado para esta medición se encuentra situado al abrigo de la radiación solar

Tabla 2.6: Distribución de viviendas por zona y tipo de edificación representativas.

Viviendas	Casa		Apartamento		% por zonas
	Cantidad	%	Cantidad	%	
Norte-Noroeste	90.452	8,19	3.045	0,27	8,46
Suroeste-Centro-Noreste	259.042	23,45	8.719	0,79	24,24
Sur-Sureste	285.678	25,86	9.616	0,87	26,73
Montevideo	300.214	27,18	147.989	13,39	40,57
Total	935.386	84,68	169.369	15,32	100



Si bien la distribución de zonas mediante la norma UNIT 1026:99, es adecuada en general a nivel de temperaturas, hay otros datos meteorológicos que muestran diferentes comportamientos en variables climáticas (que inciden en el comportamiento energético de las viviendas) con respecto a estas zonas.



(a) Mapa anual de irradiación GHI diaria promedio [23]. Dividiendo en cuatro zonas bien diferenciadas. (b) Mapa de iso-velocidad de viento a una altura de 90 metros. Dividiendo en tres zonas bien diferenciadas.

Figura 2.4: Mapas de promedios de irradiación y viento.

Si se observa el mapa anual de irradiación diaria en el plano horizontal (GHI), Figura 2.4a, se pueden identificar cuatro zonas bien definidas, que no se corresponden con las definidas en la norma UNIT. Cuando se analiza el comportamiento del viento (en altura a 90m) en el país, Figura 2.4b, se observa que hay tres zonas bien definidas, que también difieren de las zonas mencionadas previamente.

En este contexto es difícil determinar una distribución de zonas que sean representativas del comportamiento climático. Por lo tanto se optó por independizar los departamentos de las zonas de referencia, asignando a cada uno las condiciones meteorológicas definidas por el año meteorológico típico uruguayo (AMTU) [24] considerado más adecuado según un criterio de selección basado en la comparación de los valores medios de temperatura, GHI y velocidad de viento (agrupando departamentos según las zonas diferenciadas definidas en las Figuras 2.3 y 2.4). En el Anexo A se presentan los valores de los diferentes años meteorológicos típicos utilizados en este trabajo y en el Anexo B se describen



Figura 2.5: Años meteorológicos típicos utilizados para los diferentes departamentos. Los puntos rojos indican las localidades en las que se cuenta con AMTU. Cada AMTU es utilizado en todos los departamentos del mismo color de origen.

correcciones que se hicieron sobre las velocidades de viento para considerar el efecto del entorno en las ciudades.

El resultado de la división se presenta en la Figura 2.5, donde se describen, separadas por una línea gruesa, las cuatro Zonas definidas en función de la norma UNIT, separando a Montevideo, que se utiliza para dividir la población de viviendas más representativa. En la misma figura se presentan como un punto rojo las estaciones de medida que tienen asociado un AMTU y separado por colores el radio de acción de cada AMTU para los diferentes departamentos.

La Tabla 2.7 se presenta un resumen de los departamentos considerados en este trabajo por zona y su correspondiente año meteorológico típico.

### 2.1.3. Tamaño

Según Taks et. al. [25]<sup>4</sup> los tamaños de vivienda en nuestro país se distribuyen según la Tabla 2.8. Donde se diferencia Montevideo, el interior urbano, interior pequeño y rural. Se puede observar que independientemente de la región, la moda estadística de los hogares se ubica en “61 a 100” metros cua-

<sup>4</sup>Corresponde aclarar que si bien se tuvo acceso al documento de Taks et. al. [25], no fue posible conseguir los datos en bruto y por lo tanto algunos valores fueron obtenidos directamente de las figuras del trabajo.

Tabla 2.7: Departamentos representativos por zona.

Zona	Departamento	AMTU de referencia
Zona 1	Salto	AMTU Salto
	Paysandú	AMTU Salto
	Artigas	AMTU Salto
Zona 2	Colonia	AMTU Colonia
	Cerro Largo	AMTU Colonia
	Soriano	AMTU Colonia
	Flores	AMTU Colonia
	Durazno	AMTU Colonia
	Rio Negro	AMTU Colonia
	San José	AMTU Montevideo
	Florida	AMTU Montevideo
	Tacuarembó	AMTU Rivera
Rivera	AMTU Rivera	
Zona 3	Canelones	AMTU Montevideo
	Treinta y tres	AMTU Montevideo
	Maldonado	AMTU Rocha
	Rocha	AMTU Rocha
	Lavalleja	AMTU Rocha
Zona 4	Montevideo	AMTU Montevideo

drados de construcción, representando 36 % de las viviendas del país. Para la

Tabla 2.8: Metros cuadrados de viviendas según tipología. Fuente: GIEE, 2016 en función ENCH 2005-2006 [25]

	Hasta 30	31 a 40	41 a 60	61 a 100	101 a 200	Más 200
Montevideo	4,50 %	13,00 %	32,00 %	36,00 %	12,00 %	2,50 %
Interior Urbano	8,00 %	13,00 %	31,00 %	36,00 %	10,00 %	2,00 %
Interior Peq.	7,00 %	14,00 %	33,00 %	36,00 %	8,00 %	2,00 %
Rural	5,00 %	10,00 %	27,00 %	37,00 %	18,00 %	3,00 %

asignación de distribución de tamaños en las diferentes zonas definidas en la Sección 2.1.2, se toma el siguiente criterio: en Montevideo se utilizan los valores correspondientes de la Tabla 2.8, mientras que para el resto de zonas se considera únicamente la distribución de Interior Urbano. Esto último debido a que no se dispone de información suficiente para tener en cuenta la diferenciación de viviendas del interior (Urbano, Peq., Rural), para cada zona.

Cruzando la información de las Tablas 2.6 y 2.8, se pueden proyectar las distribuciones de tamaños de las viviendas según las regiones definidas en la Sección 2.1.2. En la Tabla 2.9 se presenta la distribución de casas clasificadas según zona y metros cuadrados y en la Tabla 2.10 se presenta la distribución de apartamentos clasificadas según zona y metros cuadrados.

Tabla 2.9: Distribución de casas clasificadas por metros cuadrados, según zona.

	Hasta 30	31 a 40	41 a 60	61 a 100	101 a 200	Más de 200
Norte-Noroeste	7236	11759	28040	32563	9045	1809
Suroeste-Centro-Noreste	20723	33675	80303	93255	25904	5181
Sur-Sureste	22854	37138	88560	102844	28568	5714
Montevideo	13510	39028	96068	108077	36026	7505

Tabla 2.10: Distribución de apartamentos clasificadas por metros cuadrados, según zona.

	Hasta 30	31 a 40	41 a 60	61 a 100	101 a 200	Más de 200
Norte-Noroeste	244	396	944	1096	304	61
Suroeste-Centro-Noreste	698	1134	2703	3139	872	174
Sur-Sureste	769	1250	2981	3462	962	192
Montevideo	6660	19239	47356	53276	17759	3700

Debido a que en este trabajo se realizarán las evaluaciones de un dominio de viviendas mediante simulaciones numéricas, es necesario acotar el número de casos, para mantener dentro de ciertos parámetros la configuración de los casos y el costo computacional. Por lo tanto se utiliza una subdivisión de la distribución de tamaños que disminuye la cantidad de intervalos considerados, agrupando en tres categorías: menor o igual a  $40 \text{ m}^2$ , entre  $40$  y  $70 \text{ m}^2$ , y mayor a  $70 \text{ m}^2$ . De esta forma, en la Tabla 2.11 se presenta la distribución de viviendas clasificadas según zona, tipo y metros cuadrados, considerada en este trabajo.

La Tabla 2.12 representa la distribución de viviendas clasificada según zona, tipo y metros cuadrados, con la subdivisión acotada, representada en porcentaje.

#### 2.1.4. Nivel de ingreso de los hogares

En el trabajo de Taks et. al. [25] se presenta el comportamiento de la distribución de viviendas por tamaño y nivel de ingreso del hogar, expresado en porcentaje por decil.

Tabla 2.11: Distribución de viviendas clasificadas según zona, tipo y metros cuadrados.

	Casa			Apartamento		
	$\leq 40$	$40 < x \leq 70$	$> 70$	$\leq 40$	$40 < x \leq 70$	$> 70$
Norte-Noroeste	18995	36181	35276	639	1218	1187
Suroeste-Centro-Noreste	54399	103617	101026	1831	3488	3401
Sur-Sureste	59992	114271	111414	2019	3846	3750
Montevideo	52537	123088	124589	25898	60675	61415
TOTAL	185924	377157	372306	30388	69227	69754
	16,83 %	34,14 %	33,70 %	2,75 %	6,27 %	6,31 %

Tabla 2.12: Porcentaje de distribución de viviendas clasificadas según zona, tipo y metros cuadrados.

	Casa			Apartamento		
	$\leq 40$	$40 < x \leq 70$	$> 70$	$\leq 40$	$40 < x \leq 70$	$> 70$
Norte-Noroeste	1,7 %	3,3 %	3,2 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Suroeste-Centro-Noreste	4,9 %	9,4 %	9,1 %	0,2 %	0,3 %	0,3 %
Sur-Sureste	5,4 %	10,3 %	10,1 %	0,2 %	0,3 %	0,3 %
Montevideo	4,8 %	11,1 %	11,3 %	2,3 %	5,5 %	5,6 %
TOTAL	16,8 %	34,1 %	33,7 %	2,8 %	6,3 %	6,3 %
		<b>84,7 %</b>			<b>15,3 %</b>	

En la Figura 2.6 se puede observar que hay un comportamiento de mayor proporción de viviendas de menor tamaño para deciles bajos y mayor proporción de viviendas de mayor tamaño para deciles altos.

La Tabla 2.13 muestra los valores cruzados de decil y tamaño en porcentajes, con un intervalo de distribución amplio.

Al igual que en la sección 2.1.3, es necesario reducir el intervalo de tamaños agrupando en las tres categorías definidas, pero también hay que reducir la agrupación de deciles. Por lo tanto se agrupan en tres categorías para los deciles: de 1 a 4, de 5 a 7 y de 8 a 10. En las Tablas 2.14 y 2.15 se presenta la agrupación por tamaño y decil para las diferentes zonas climáticas, proyectando la misma distribución dentro de cada zona; para la tipología de casas y apartamentos respectivamente.

En las Tablas 2.16 y 2.17 se presenta la misma información pero descrita en su distribución porcentual. También se presentan a modo de validación los totales para cada categoría, verificando que los valores acumulados coinciden con los obtenidos en cada categoría de forma independiente.

En la Figura 2.7, se muestra la distribución del tipo de vivienda (casa o apartamento) agrupada por decil, obtenida a partir de los datos de Taks et. al. [25].

Tabla 2.13: Porcentaje de distribución de viviendas clasificadas según zona, tipo y metros cuadrados.

Decil	$\leq 30$	$30 < X \leq 40$	$40 < X \leq 60$	$60 < X \leq 100$	$100 < X \leq 200$	$> 200$
1	21,0 %	22,0 %	36,0 %	17,0 %	4,0 %	0,0 %
2	18,0 %	16,0 %	35,0 %	26,0 %	4,0 %	1,0 %
3	9,0 %	17,0 %	36,0 %	31,0 %	7,0 %	0,0 %
4	8,0 %	16,0 %	36,0 %	32,0 %	8,0 %	0,0 %
5	7,0 %	13,0 %	38,0 %	34,0 %	8,0 %	0,0 %
6	3,0 %	14,5 %	32,5 %	39,0 %	9,0 %	2,0 %
7	3,0 %	11,0 %	32,0 %	42,0 %	9,0 %	3,0 %
8	3,0 %	11,0 %	32,0 %	40,0 %	11,0 %	3,0 %
9	2,5 %	8,5 %	26,0 %	42,0 %	17,0 %	4,0 %
10	2,5 %	4,5 %	20,0 %	38,0 %	28,0 %	7,0 %
	7,70 %	13,35 %	32,35 %	34,10 %	10,50 %	2,00 %

Se puede observar claramente que el tipo de vivienda apartamento tiene mayor

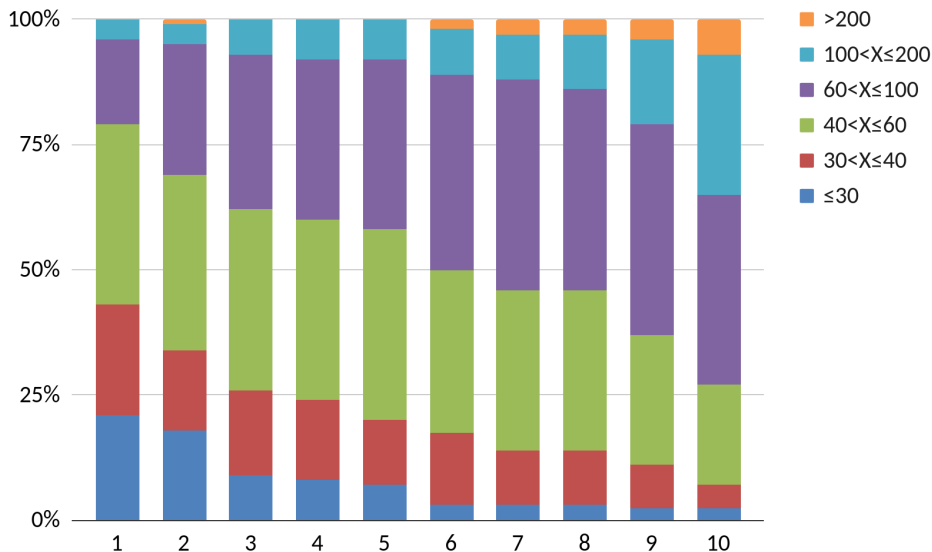


Figura 2.6: Distribución de viviendas por Tamaño (en  $m^2$ ), según nivel de ingreso del hogar, expresado en porcentaje de cada categoría de vivienda por decil. Fuente Taks et. al. [25]

Tabla 2.14: Distribución de casas clasificadas según zona, metros cuadrados y decil.

	$\leq 40$			$40 < x \leq 70$			$> 70$		
	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10
Norte-Noroeste	10685	4333	2692	15156	11736	9657	9839	11146	15209
Suroeste-Centro-Noreste	30601	12409	7710	43403	33609	27655	28176	31920	43558
Sur-Sureste	33747	13685	8503	47866	37065	30499	31074	35202	48036
Montevideo	35465	14381	8936	50302	38951	32051	32655	36993	50481
TOTAL	110498	44808	27842	156728	121360	99862	101743	115260	157284
	10,00 %	4,06 %	2,52 %	14,19 %	10,99 %	9,04 %	9,21 %	10,43 %	14,24 %

Tabla 2.15: Distribución de Apartamentos clasificadas según zona, metros cuadrados y decil.

	$\leq 40$			$40 < x \leq 70$			$> 70$		
	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10
Norte-Noroeste	360	146	91	510	395	325	331	375	512
Suroeste-Centro-Noreste	1030	418	260	1461	1131	931	948	1074	1466
Sur-Sureste	1136	461	286	1611	1248	1027	1046	1185	1617
Montevideo	17482	7089	4405	24796	19201	15799	16097	18235	24884
TOTAL	20008	8113	5041	28378	21974	18082	18423	20870	28479
	1,81 %	0,73 %	0,46 %	2,57 %	1,99 %	1,64 %	1,67 %	1,89 %	2,58 %

Tabla 2.16: Distribución de casas clasificadas según zona, metros cuadrados y decil.

	$\leq 40$			$40 < x \leq 70$			$> 70$		
	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10
Norte-Noroeste	0,97 %	0,39 %	0,24 %	1,37 %	1,06 %	0,87 %	0,89 %	1,01 %	1,38 %
Suroeste-Centro-Noreste	2,77 %	1,12 %	0,70 %	3,93 %	3,04 %	2,50 %	2,55 %	2,89 %	3,94 %
Sur-Sureste	3,05 %	1,24 %	0,77 %	4,33 %	3,36 %	2,76 %	2,81 %	3,19 %	4,35 %
Montevideo	3,21 %	1,30 %	0,81 %	4,55 %	3,53 %	2,90 %	2,96 %	3,35 %	4,57 %
TOTAL	10,00 %	4,06 %	2,52 %	14,19 %	10,99 %	9,04 %	9,21 %	10,43 %	14,24 %
		16,6 %			34,2 %			33,9 %	
					84,7 %				

Tabla 2.17: Distribución de Apartamentos clasificadas según zona, metros cuadrados y decil.

	$\leq 40$			$40 < x \leq 70$			$> 70$		
	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10
Norte-Noroeste	0,03 %	0,01 %	0,01 %	0,05 %	0,04 %	0,03 %	0,03 %	0,03 %	0,05 %
Suroeste-Centro-Noreste	0,09 %	0,04 %	0,02 %	0,13 %	0,10 %	0,08 %	0,09 %	0,10 %	0,13 %
Sur-Sureste	0,10 %	0,04 %	0,03 %	0,15 %	0,11 %	0,09 %	0,09 %	0,11 %	0,15 %
Montevideo	1,58 %	0,64 %	0,40 %	2,24 %	1,74 %	1,43 %	1,46 %	1,65 %	2,25 %
TOTAL	1,81 %	0,73 %	0,46 %	2,57 %	1,99 %	1,64 %	1,67 %	1,89 %	2,58 %
		3,00 %			6,2 %			6,1 %	
					15,3 %				

presencia para deciles altos, mientras que para deciles bajos es principalmente el tipo casas.

Debido a que hubo una redistribución de categorías, es necesario que los totales coincidan según los datos cruzados, de forma que se cumplan las proporciones de las Figuras 2.6 y 2.7 simultáneamente. Para que esto suceda es necesario redistribuir algunos valores de las columnas de las Tablas 2.16 y 2.17, sin alterar los totales.

En las Tablas 2.18 y 2.19 se presentan los valores ajustados de las columnas, por decil, que cumplen las distribuciones descritas en las Figuras 2.6 y 2.7.

Tabla 2.18: Distribución de casas clasificadas según zona, metros cuadrados y decil.

	$\leq 40$			$40 < x \leq 70$			$> 70$		
	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10
Norte-Noroeste	1,00 %	0,39 %	0,22 %	1,41 %	1,10 %	0,80 %	0,92 %	1,03 %	1,33 %
Suroeste-Centro-Noreste	2,85 %	1,12 %	0,62 %	4,05 %	3,14 %	2,29 %	2,64 %	2,94 %	3,81 %
Sur-Sureste	3,14 %	1,24 %	0,68 %	4,46 %	3,46 %	2,53 %	2,91 %	3,24 %	4,20 %
Montevideo	4,01 %	1,30 %	0,01 %	6,17 %	3,64 %	1,17 %	4,19 %	4,03 %	2,66 %
TOTAL	11,00 %	4,06 %	1,52 %	16,09 %	11,34 %	6,79 %	10,66 %	11,23 %	11,99 %
		16,6 %			34,2 %			33,9 %	
					84,7 %				

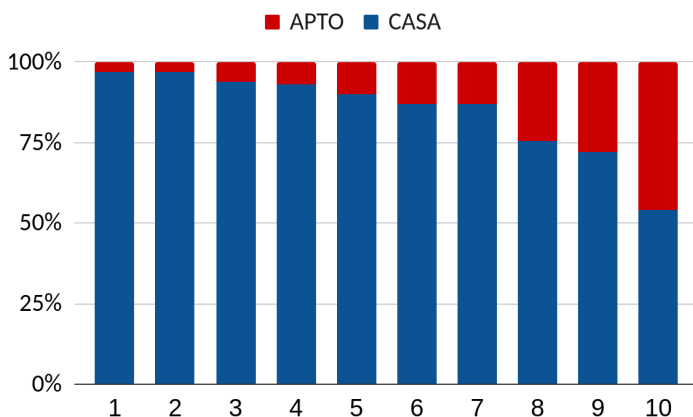


Figura 2.7: Distribución de viviendas por Tipo (casa o apartamento), según nivel de ingreso del hogar, expresado en porcentaje de cada categoría de vivienda por decil. Fuente Taks et. al. [25]



Tabla 2.19: Distribución de Apartamentos clasificadas según zona, metros cuadrados y decil.

	$\leq 40$			$40 < x \leq 70$			$> 70$		
	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10
Norte-Noroeste	0,00 %	0,01 %	0,04 %	0,01 %	0,00 %	0,10 %	0,00 %	0,02 %	0,09 %
Suroeste-Centro-Noreste	0,01 %	0,04 %	0,11 %	0,02 %	0,01 %	0,30 %	0,00 %	0,05 %	0,27 %
Sur-Sureste	0,01 %	0,04 %	0,12 %	0,02 %	0,01 %	0,33 %	0,00 %	0,05 %	0,30 %
Montevideo	0,78 %	0,64 %	1,20 %	0,63 %	1,63 %	3,16 %	0,22 %	0,97 %	4,16 %
TOTAL	0,81 %	0,73 %	1,46 %	0,67 %	1,64 %	3,89 %	0,22 %	1,09 %	4,83 %
	3,00 %			6,2 %			6,1 %		
	15,3 %								

### 2.1.5. Antigüedad

Al igual que para el decil, los valores de antigüedad fueron obtenidos a partir de los datos de Taks et. al. [25], pero reduciendo los intervalos de la categoría. En este caso simplemente se reagruparon las categorías manteniendo los valores extremos. En la Figura 2.8 se presentan los valores de antigüedad del parque de viviendas del Uruguay agrupado según nivel de ingreso del hogar, expresado en porcentaje de cada categoría de vivienda por decil. Se puede observar que en promedio, aproximadamente el 50 % de las viviendas tienen menos de 30 años, aumentando para deciles bajos y disminuyendo levemente para deciles altos.

Reagrupando los valores de la Figura 2.8 en las tres categorías presentadas en la Sección 2.1.4, se obtiene la Tabla 2.20, con una reducción de las subdivisiones consideradas para el nivel de ingreso de los hogares.

Tabla 2.20: Distribución de viviendas por antigüedad, según decil.

Decil	$\leq 10$	$10 < X \leq 30$	$30 < X$	
1-4	8,80 %	14,40 %	16,80 %	40,00 %
5-7	4,30 %	10,50 %	15,20 %	30,00 %
8-10	4,60 %	9,50 %	15,90 %	30,00 %
	17,70 %	34,40 %	47,90 %	

La Figura 2.10 muestra la distribución de viviendas por antigüedad, según región (considerando Montevideo y el Interior urbano). Donde se puede ver que hay más edificaciones antiguas en la capital que en el interior urbano. Al igual que en las variables consideradas anteriormente, es necesario que las distribuciones cruzadas sean coherentes, por lo que hay que cruzar las Tablas 2.18 y 2.19, con las Figuras 2.8 y 2.9.

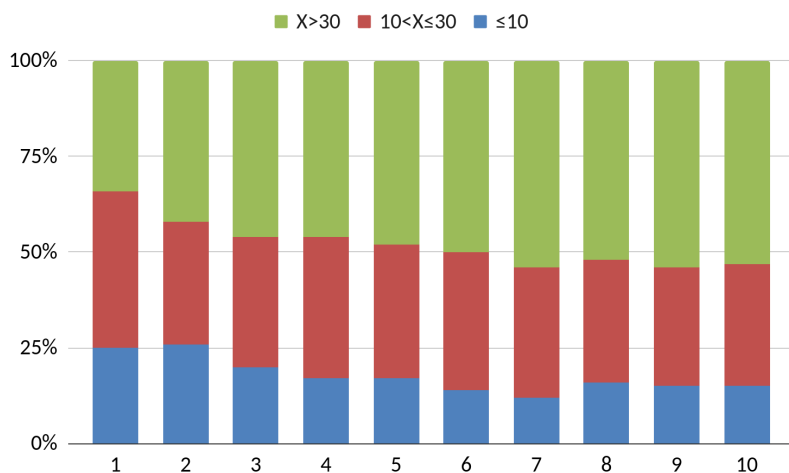


Figura 2.8: Distribución de viviendas por antigüedad (en años), según nivel de ingreso del hogar, expresado en porcentaje de cada categoría de vivienda por decil. Fuente Taks et. al. [25]

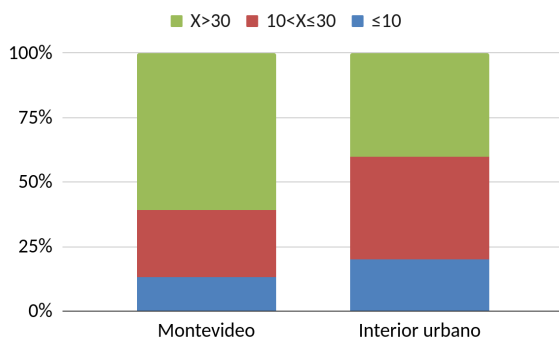


Figura 2.9: Distribución de viviendas por antigüedad (en años), según Región (Montevideo o interior urbano). Fuente Taks et. al. [25]

A su vez es necesario ajustar las proporciones con respecto al tipo de vivienda. En la Figura 2.10 se presentan la distribución de las viviendas según su antigüedad, discriminadas por tipo de vivienda, obtenida a partir de los datos de Taks et. al. [25].

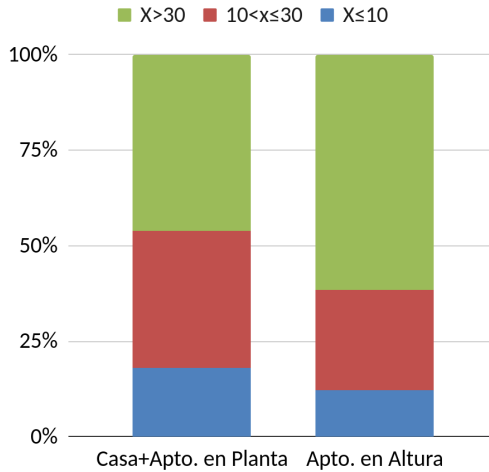


Figura 2.10: Distribución de viviendas por antigüedad (en años), según tipo de vivienda (casa o apartamento). Fuente Taks et. al. [25]

Asumiendo que se mantienen las proporciones de la Tabla 2.20, las Figuras 2.9 y 2.10, para cada subcategoría, se obtiene la Tabla 2.21 que cumple las proporciones de Tipo, Tamaño, Decil, Antigüedad, para cada Región<sup>5</sup>.

A modo de ejemplo se puede observar que dentro de tamaño  $\leq 40$  hay la misma proporción de viviendas antiguas que en el tamaño  $> 70$ , lo cual depende de la zona (MVD, interior) y de forma homogénea respecto del tipo.

## 2.2. Definición de los modelos representativos

La Tabla 2.21 representa la distribución de viviendas de todo el país. Para determinar una población representativa que cumpla la misma distribución. De esta forma, si se desea trabajar con una población representativa del parque habitacional nacional de  $N$  viviendas bastará con multiplicar la Tabla 2.21 por  $N$  y se obtendrá la cantidad de viviendas necesarias en cada celda, de tal forma que se cumpla proporcionalmente la distribución total del país.

<sup>5</sup>Es necesario aclarar que, debido al procedimiento antes descrito para la elaboración de esta tabla, el cual implicó algunas suposiciones en la distribución de categorías (con el requerimiento de cumplir con las diferentes distribuciones representadas por la Tabla 2.8. y las Figuras 2.6-2.10), se anticipa que la misma contenga errores. Estos podrían subsanarse en caso de contar con datos de encuestas, suficientemente desagregados.

Tabla 2.21: Distribución de viviendas por Tipo, Tamaño, Decil, Antigüedad y Región.

Tipo	Tamaño	Decil	Antigüedad	Norte-Noroeste	Suroeste-Centro-Noreste	Sur-Sureste	Montevideo	Subtotal	Subtotal	Subtotal	Total
Casa	≤40	1-4	X ≤ 10	0,24 %	0,70 %	0,77 %	0,67 %	2,38 %	11,00 %	16,58 %	84,67 %
			10 < X ≤ 30	0,41 %	1,17 %	1,29 %	1,13 %	4,00 %			
			X > 30	0,34 %	0,98 %	1,08 %	2,21 %	4,62 %			
		5-7	X ≤ 10	0,06 %	0,18 %	0,20 %	0,14 %	0,58 %	4,06 %		
			10 < X ≤ 30	0,16 %	0,46 %	0,51 %	0,34 %	1,47 %			
			X > 30	0,17 %	0,48 %	0,53 %	0,83 %	2,00 %			
		8-10	X ≤ 10	0,04 %	0,11 %	0,12 %	0,00 %	0,27 %	1,52 %		
			10 < X ≤ 30	0,08 %	0,23 %	0,25 %	0,00 %	0,57 %			
			X > 30	0,10 %	0,28 %	0,31 %	0,01 %	0,69 %			
	40 < x ≤ 70	1-4	X ≤ 10	0,34 %	0,99 %	1,09 %	0,92 %	3,34 %	16,09 %		
			10 < X ≤ 30	0,58 %	1,66 %	1,83 %	1,56 %	5,64 %			
			X > 30	0,49 %	1,39 %	1,54 %	3,69 %	7,10 %			
		5-7	X ≤ 10	0,18 %	0,51 %	0,57 %	0,32 %	1,58 %	11,34 %		
			10 < X ≤ 30	0,45 %	1,29 %	1,42 %	0,85 %	4,01 %			
			X > 30	0,47 %	1,34 %	1,48 %	2,47 %	5,75 %			
		8-10	X ≤ 10	0,14 %	0,40 %	0,44 %	0,08 %	1,07 %	6,79 %		
			10 < X ≤ 30	0,30 %	0,86 %	0,95 %	0,17 %	2,27 %			
			X > 30	0,36 %	1,03 %	1,14 %	0,92 %	3,45 %			
>70	1-4	X ≤ 10	0,23 %	0,64 %	0,71 %	0,70 %	2,28 %	10,66 %			
		10 < X ≤ 30	0,38 %	1,09 %	1,20 %	1,08 %	3,74 %				
		X > 30	0,32 %	0,91 %	1,00 %	2,41 %	4,64 %				
	5-7	X ≤ 10	0,17 %	0,48 %	0,53 %	0,37 %	1,54 %	11,23 %			
		10 < X ≤ 30	0,42 %	1,21 %	1,33 %	0,95 %	3,91 %				
		X > 30	0,44 %	1,25 %	1,38 %	2,71 %	5,78 %				
	8-10	X ≤ 10	0,23 %	0,67 %	0,74 %	0,24 %	1,88 %	11,99 %			
		10 < X ≤ 30	0,50 %	1,42 %	1,57 %	0,52 %	4,01 %				
		X > 30	0,60 %	1,71 %	1,89 %	1,90 %	6,09 %				
Apto.	≤40	1-4	X ≤ 10	0,001 %	0,003 %	0,003 %	0,131 %	0,138 %	0,811 %	3,00 %	
			10 < X ≤ 30	0,002 %	0,005 %	0,005 %	0,220 %	0,232 %			
			X > 30	0,001 %	0,004 %	0,004 %	0,432 %	0,442 %			
		5-7	X ≤ 10	0,002 %	0,006 %	0,007 %	0,067 %	0,082 %	0,734 %		
			10 < X ≤ 30	0,005 %	0,016 %	0,017 %	0,167 %	0,205 %			
			X > 30	0,006 %	0,016 %	0,018 %	0,408 %	0,447 %			
		8-10	X ≤ 10	0,006 %	0,018 %	0,020 %	0,131 %	0,177 %	1,456 %		
			10 < X ≤ 30	0,014 %	0,039 %	0,043 %	0,279 %	0,376 %			
			X > 30	0,016 %	0,047 %	0,052 %	0,788 %	0,904 %			
	40 < x ≤ 70	1-4	X ≤ 10	0,001 %	0,004 %	0,004 %	0,215 %	0,225 %	0,669 %		
			10 < X ≤ 30	0,002 %	0,007 %	0,007 %	0,347 %	0,363 %			
			X > 30	0,002 %	0,006 %	0,006 %	0,068 %	0,081 %			
		5-7	X ≤ 10	0,000 %	0,001 %	0,001 %	0,225 %	0,227 %	1,639 %		
			10 < X ≤ 30	0,001 %	0,002 %	0,002 %	0,524 %	0,529 %			
			X > 30	0,001 %	0,002 %	0,003 %	0,877 %	0,883 %			
		8-10	X ≤ 10	0,018 %	0,052 %	0,058 %	0,396 %	0,525 %	3,887 %		
			10 < X ≤ 30	0,039 %	0,111 %	0,123 %	0,836 %	1,109 %			
			X > 30	0,047 %	0,134 %	0,148 %	1,925 %	2,253 %			
>70	1-4	X ≤ 10	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,160 %	0,160 %	0,218 %			
		10 < X ≤ 30	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,022 %	0,022 %				
		X > 30	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,022 %	0,022 %				
	5-7	X ≤ 10	0,003 %	0,008 %	0,009 %	0,151 %	0,170 %	1,089 %			
		10 < X ≤ 30	0,007 %	0,020 %	0,022 %	0,353 %	0,402 %				
		X > 30	0,007 %	0,021 %	0,023 %	0,467 %	0,518 %				
	8-10	X ≤ 10	0,017 %	0,048 %	0,052 %	0,507 %	0,623 %	4,828 %			
		10 < X ≤ 30	0,035 %	0,101 %	0,112 %	1,071 %	1,319 %				
		X > 30	0,042 %	0,122 %	0,134 %	2,587 %	2,886 %				

En la Tabla 2.22 se muestra, a modo de ejemplo la cantidad de casas en una muestra de 295 unidades (255 casas y 40 apartamentos), clasificadas por Tipo, Tamaño, Decil, Antigüedad y Región.

Tabla 2.22: Cantidad de casas en una muestra de 255 clasificadas por Tamaño, Decil, Antigüedad y Región.

Tipo	Tamaño	Decil	Antigüedad	Norte-Noroeste	Suroeste-Centro-Noreste	Sur-Sureste	Montevideo	Total
Casa	≤40	1-4	X ≤ 10	1	2	2	2	7
			10 < X ≤ 30	1	4	4	3	12
			X > 30	1	3	3	7	14
		5-7	X ≤ 10	0	1	1	0	2
			10 < X ≤ 30	0	1	2	1	4
			X > 30	1	1	2	2	6
		8-10	X ≤ 10	0	0	0	0	0
			10 < X ≤ 30	0	1	1	0	2
			X > 30	0	1	1	0	2
	40 < x ≤ 70	1-4	X ≤ 10	1	3	3	3	10
			10 < X ≤ 30	2	5	6	5	18
			X > 30	1	4	5	11	21
		5-7	X ≤ 10	1	2	2	1	6
			10 < X ≤ 30	1	4	4	3	12
			X > 30	1	4	4	7	16
		8-10	X ≤ 10	0	1	1	0	2
			10 < X ≤ 30	1	3	3	1	8
			X > 30	1	3	3	3	10
	>70	1-4	X ≤ 10	1	2	2	2	7
			10 < X ≤ 30	1	3	4	3	11
			X > 30	1	3	3	7	14
		5-7	X ≤ 10	1	1	2	1	5
			10 < X ≤ 30	1	4	4	3	12
			X > 30	1	4	4	8	17
8-10		X ≤ 10	1	2	2	1	6	
		10 < X ≤ 30	1	4	5	2	12	
		X > 30	2	5	6	6	19	

Hasta el momento se ha establecido una distribución de viviendas clasificadas por Tipo, Tamaño, Decil, Antigüedad y Región; y es posible establecer una muestra con un peso relativo de viviendas que representan el mismo comportamiento en las clasificaciones mencionadas.

Sin embargo, como se vio anteriormente, hay más variables que pueden afectar el comportamiento energético de las viviendas y es necesario estimarlas (o cuantificarlas), para determinar una muestra representativa del comportamiento energético o del confort del parque habitacional del país. Por lo tanto para completar este estudio es necesario incorporar a la clasificación dos variables socioeconómicas y cuatro variables contextuales.

Socioeconómicas	Contextuales
Ocupantes	Geometría
Patrones de uso	Materiales
	Orientación
	Apareamiento
	Entorno

En particular, cada caso está determinado por la geometría, la materialidad, la ocupación y la implantación (orientación, entorno y arbolado). La geometría combinada con la materialidad da como resultado el caso de estudio, al cual se le asigna una ocupación en función del nivel de ingreso del hogar (decil del caso) y del tamaño de la vivienda. Las características de implantación se determinan de acuerdo a la localización.

### 2.2.1. Ocupantes y patrones de uso

De la Encuesta Nacional de Hogares Ampliada - Módulo de Vivienda (ENHA) se puede extraer la información sobre la cantidad de personas que habitan las viviendas, discriminadas por nivel socioeconómico, en nuestro país. A partir de los datos de ENHA [21] se construye la Tabla 2.23, que presenta los valores promedios de la cantidad de personas que viven en el hogar, discriminando tamaño de la vivienda y nivel socioeconómico. Estos valores serán utilizados como referencia para simular los casos, en cada una de las condiciones correspondientes.

Tabla 2.23: Cantidad de ocupantes en el hogar, agrupados por Tamaño de vivienda y decil.

Tamaño	$\leq 40$			$40 < x \leq 70$			$> 70$		
Decil	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10	1-4	5-7	8-10
Cantidad de personas	3	1	1	4	3	2	5	4	2

Una vez definida la cantidad de personas que ocupan la casa, hay que establecer cuál es el patrón de los lugares que se ocupan por las personas en la vivienda (por ejemplo, durante la noche están en los dormitorios y en el día en la sala de estar, etc.), así como el calor producido por ellas. Para establecer cómo se ocupan los espacios y definir el tiempo en cada lugar, las cargas de iluminación y equipos, se sigue la norma NBR 15575. El resultado para el modelo se resume en las Tablas 2.24 y 2.25.

Tabla 2.24: Períodos y cargas de ocupación en las diferentes habitaciones de la vivienda (según NBR 15575).

Períodos y cargas de ocupación			
Período	Lunes a Domingo		
Horario	Dormitorio	Sala	Uso mixto <sup>†</sup>
00:00-00:59	100 %	0 %	100 %
01:00-01:59	100 %	0 %	100 %
02:00-02:59	100 %	0 %	100 %
03:00-03:59	100 %	0 %	100 %
04:00-04:59	100 %	0 %	100 %
05:00-05:59	100 %	0 %	100 %
06:00-06:59	100 %	0 %	100 %
07:00-07:59	100 %	0 %	100 %
08:00-08:59	0 %	0 %	0 %
09:00-09:59	0 %	0 %	0 %
10:00-10:59	0 %	0 %	0 %
11:00-11:59	0 %	0 %	0 %
12:00-12:59	0 %	0 %	0 %
13:00-13:59	0 %	0 %	0 %
14:00-14:59	0 %	50 %	50 %
15:00-15:59	0 %	50 %	50 %
16:00-16:59	0 %	50 %	50 %
17:00-17:59	0 %	50 %	50 %
18:00-18:59	0 %	100 %	100 %
19:00-19:59	0 %	100 %	100 %
20:00-20:59	0 %	100 %	100 %
21:00-21:59	0 %	100 %	100 %
22:00-22:59	100 %	0 %	100 %
23:00-23:59	100 %	0 %	100 %

<sup>†</sup> Ej. Lofts, Cocina integrada, etc.

Es importante notar que en la Tabla 2.24, el uso mixto se refiere a que no tiene separado el dormitorio del otro ambiente (un ejemplo de esto puede ser un monoambiente), por lo tanto se considera como una combinación de ambos.

Para considerar el impacto de los patrones de uso tanto sobre el confort como sobre los consumos de calefacción y refrigeración, se definen tres tipos de usuario, de forma de cuantificar el efecto que tiene el usuario en la eficiencia a un nivel general, sin llegar a profundizar. Todos los usuarios tienen en común

Tabla 2.25: Tasas metabólicas y fracción radiante para los usuarios (según NBR 15575).

Ambiente	Actividad	Calor por área de superficie corporal (W/m <sup>2</sup> )	Calor producido por persona <sup>†</sup> (W)	Fracción radiante <sup>‡</sup>
Dormitorio	Durmiendo o descansando	45	81	0.30
Sala	Sentado o mirando TV	60	108	0.30
Uso mixto	Durmiendo o descansando	45	81	0.30
	Sentado o mirando TV	60	108	0.30

<sup>†</sup> Considerando el área de la superficie corporal de una persona promedio como 1,8m<sup>2</sup>

<sup>‡</sup> La fracción radiante es la fracción del calor emitido por una persona en forma de radiación, por lo tanto no es recibida por el aire, sino por las paredes de la habitación.

el criterio de confort térmico sobre el cual activarán o no el sistema HVAC para acondicionar las zonas ocupadas. Como criterio se utiliza en este trabajo la norma ASHRAE 55, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy [26], que define el confort térmico como una condición mental asociada a una sensación de satisfacción que una persona experimenta en un ambiente térmico. Dado que su definición es subjetiva y depende de cada persona, esta condición se establece a partir de una amplia recopilación de datos estadísticos, donde un porcentaje específico de ocupantes se encontrarán térmicamente cómodos (en general se utiliza el valor de 80 % de ocupantes cómodos). En la Figura 2.11 se presentan los límites de confort térmico adaptativo, para un 80 % de satisfacción, según norma ASHRAE 55 (2017), utilizados para determinar las condiciones aceptables de confort en este trabajo. Entonces el sistema HVAC se activará en una zona, si la misma está ocupada y su temperatura operativa está por fuera del rango aceptable, activando la calefacción si está por debajo del límite inferior y la refrigeración si está por encima del límite superior.

Dado el criterio de confort común para todos los usuarios definidos, los mismos se diferencian en el uso de la ventilación natural y de las protecciones solares como estrategias para lograr el confort con menores requerimientos de energía. Dos de los usuarios se definen de tal forma que cuyas acciones se orientan siempre hacia lograr el confort con el mínimo consumo de energía posible aunque con ciertas diferencias en el uso de las protecciones solares (llamados



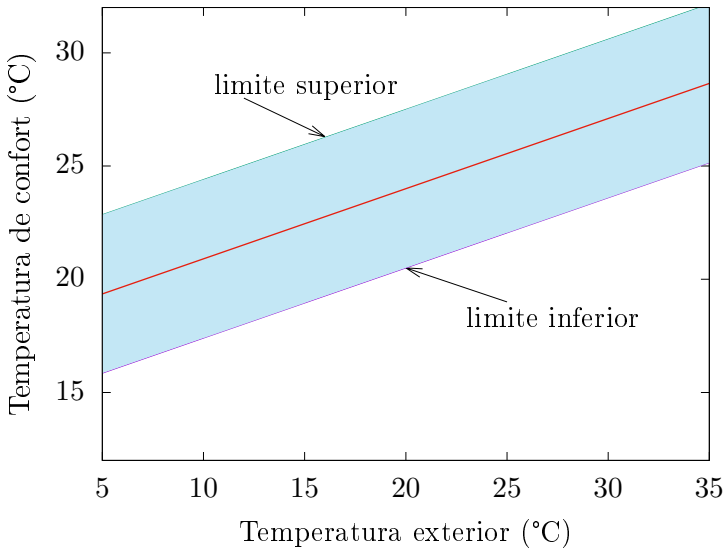


Figura 2.11: Límites de confort térmico adaptativo, para un 80 % de satisfacción, según norma ASHRAE 55 (2017) [26].

usuarios  $P$  y  $S$ ); mientras que el tercer usuario no tiene en consideración la eficiencia energética en la operación de su vivienda (llamado usuario  $V$ ).

En la Tabla 2.26 se detalla cómo operan las protecciones solares los diferentes usuarios (si las hay). Se puede observar que los usuarios  $S$  y  $P$  intentan aprovechar la radiación solar cuando es útil, aunque con ciertas diferencias. El usuario  $S$  deja cerradas las protecciones cuando no hay nadie en la casa, mientras que el usuario  $P$  las deja abiertas. Además el usuario  $S$  actúa sobre todas las protecciones de la casa, mientras que el usuario  $P$  actúa solo en la zona que esté ocupando. Por otro lado, el usuario  $V$  no hace uso de las protecciones, lo cual para el período de calor será seguramente perjudicial.

Como se mencionó, el tipo de usuario también tiene incidencia sobre el uso de la ventilación natural como se detalla en la Tabla 2.27. En este sentido se tiene que los usuarios  $P$  y  $S$  hacen uso de la ventilación natural mediante la apertura de las ventanas en función de la temperatura operativa de la zona y la temperatura de confort, mientras que el usuario  $V$  no hace uso de la ventilación. Como criterio para la ventilación en el caso particular de la cocina y el baño se definió que para todos los usuarios, si hay gente en la casa, sus ventanas permanecen abiertas y las puertas cerradas.

Tabla 2.26: Comportamiento de los usuarios respecto a las protecciones solares.

Usuario	Si hay gente en la casa		Si no hay gente en la casa
	Zonas ocupadas	Zonas sin ocupar	Todas las zonas
P	Cerradas si es de noche o si es de día y está encendido el HVAC en modo frío y si la irradiación incidente es mayor a 300 W/m <sup>2</sup> . Para casos sin HVAC si la temperatura en la zona es mayor a 23° y si la irradiación incidente es mayor a 300 W/m <sup>2</sup> . Abiertas en caso contrario	Abiertas siempre	Abiertas siempre
S	Cerradas si está encendido el HVAC en modo frío. Abiertas en caso contrario	Cerradas en el período de calor. Abiertas en el período frío.	Cerradas siempre
V	Abiertas siempre	Abiertas siempre	Abiertas siempre

Tabla 2.27: Comportamiento de los usuarios respecto a la ventilación natural.

Usuario	Si hay gente en la casa		Si no hay gente en la casa
	Zonas ocupadas	Zonas sin ocupar	Todas las zonas
P	Si la temperatura es menor que la de confort están cerradas. Si la temperatura es mayor a la de confort y menor al límite superior y el HVAC está apagado, están abiertas. Si el HVAC está encendido están cerradas.	Siempre abiertas	Siempre cerradas
S	Si la temperatura es menor que la de confort están cerradas. Si la temperatura es mayor a la de confort y menor al límite superior y el HVAC está apagado, están abiertas. Si el HVAC está encendido están cerradas.	Siempre abiertas	Siempre cerradas
V	Siempre cerradas	Siempre abiertas	Siempre cerradas

Se podrían tomar distintos criterios para definir el comportamiento de los usuarios y dichas consideraciones podrían ser objeto de estudios posteriores, ya que variaciones en los comportamientos de los usuarios podrían modificar los resultados. En este trabajo, los usuarios fueron definidos de esta manera con el objetivo de poder, por un lado, analizar la incidencia de su comportamiento sobre los requerimientos térmicos y, por otro, determinar el rango posible dentro del que se van a ubicar los consumos de usuarios reales.

En este trabajo se tomará el usuario *P* como un usuario tipo, y se analizará el impacto del usuario comparando los resultados de los usuarios *S* y *V* relativos a los obtenidos para el usuario *P*.

### 2.2.2. Envoltente: geometría y materiales

La definición de la geometría de una vivienda implica definir los planos de la edificación y necesariamente debe depender del tipo y tamaño. Para poder estudiar adecuadamente el comportamiento energético del parque habitacional del país, es necesario definir una base de datos de geometrías representativas para cada categoría.

La cantidad de geometrías, o el tamaño de la base de datos, queda determinada por la cantidad máxima de casos diferentes. En la Figura 2.12 se muestra una representación esquemática de las diferentes variables que intervienen en cada caso y sus posibles combinaciones.

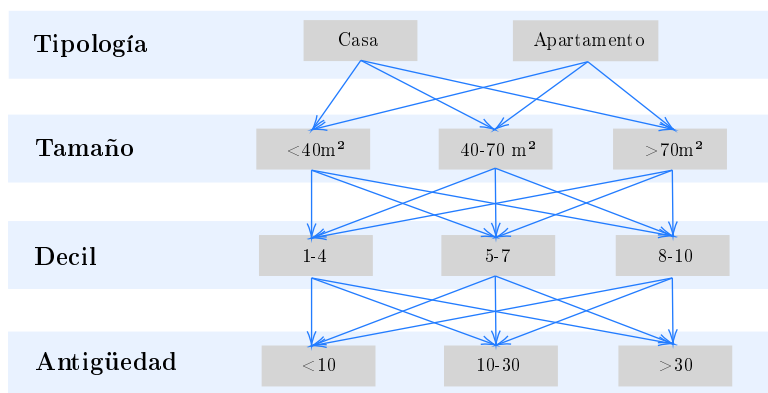


Figura 2.12: Representación esquemática de las diferentes variables que intervienen en cada caso

Tomando como criterio que en la selección de las geometrías se debe considerar que para casos con iguales características se deben tener, dentro de lo posible, al menos una conformación geométrica por cada uno; las características que limitan la cantidad de casos serán el tipo y el tamaño. Por ejemplo, considerando la Tabla 2.22, para una casa, menor a 40m<sup>2</sup>, se requerirían 7 casos diferentes, que pueden ser por ejemplo: un caso longitudinal, uno cuadrado, otro tipo geometría compleja, etc. En este trabajo se utilizaron 32 geometrías diferentes como base de datos para cumplir con los requisitos mencionados.

En función de esta primer caracterización de las geometrías se realiza una búsqueda de casos de viviendas existentes, con el siguiente resultado. Los modelos 1, 3, 4, 8, 9, 14 se obtienen a partir de una revisión bibliográfica de estudios previos en viviendas [27,28] corresponden a tipologías construidas en programas de vivienda estatal y cooperativas de vivienda; los modelos 2, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 16, 17, 24, 25, 26, 27, 32 se obtienen de los planos de progra-

mas de vivienda social: Plano de vivienda económica y Plan Lote del Servicio de Tierras y Viviendas de la Intendencia de Montevideo (IM), tipologías de Mevir, tipologías de realojos del programa Tacurú IM y Programa de Mejoramiento de Barrios (PMB), programa de vivienda para jubilados y pensionistas del Banco de Previsión Social (BPS) y tipologías del Banco Hipotecario del Uruguay (BHU). Los modelos 10,15,18,19,20,21,22,23,28,29,30,31 son casos de vivienda individual seleccionados de acuerdo a las características que requieren las geometrías. En Anexo D se pueden ver las geometrías y características de cada modelo.

## Materialidad

Las propiedades de los materiales utilizados en la construcción, serán un elemento muy importante a la hora de cuantificar el consumo energético de la vivienda. Dependiendo de la calidad de los mismos, el consumo energético puede aumentar o disminuir en una proporción considerable. Las características más importantes que definen los materiales son, la transmitancia térmica (que es la composición de las resistencia a la transferencia de calor por conducción y convección a través de la envolvente), la absortividad de la envolvente (que es la capacidad del material expuesto a absorber radiación solar), la permeabilidad del de las aberturas (ventanas puertas) y las infiltraciones que se pueden establecer, principalmente en la unión entre el techo y la pared para viviendas con techo liviano.

Si bien no entra dentro de los materiales, en este punto se define también la presencia de protección solar en las aberturas y en función de las zonas de la vivienda.

Los criterios para definir los materiales y las aberturas, con sus protecciones, se establecen a partir de la antigüedad de la construcción y el decil socioeconómico al que pertenece el caso. En las Tablas 2.28 y 2.29 se presentan los criterios utilizados para definir los muros exteriores y techos; y las aberturas con sus protecciones, según su categoría. Tanto las referencias a los códigos utilizados en la Tabla 2.28, como en la Tabla 2.29, se presentan en el Anexo C.

Es importante mencionar que para las aberturas se considera un único tipo de ventana, que consta de una capa simple de 4 milímetros de espesor. Esto se debe a que los tipo de ventanas más actuales y eficientes (como el doble vidrio hermético, dvh) no son tan utilizados en la mayoría de las construcciones. Sin embargo será considerada en el Capítulo 5 como una de las propuestas de mejora para reducir el consumo energético.

Tabla 2.28: Criterios utilizados para definir los muros exteriores y techos según su categoría.

Decil	Antigüedad	Muros exteriores	Techos		
			Construcción	Infiltraciones	divisiones interiores
Decil 1-4	< 10 años	ME 1- bloque revocado	C 1- chapa	Techo liviano (B)	MI 1-bloque
	10 < X < 30	ME 1- bloque revocado	C 1- chapa	Techo liviano (B)	MI 1-bloque
	> 30	ME 2- ladrillo	C 2 - losa sin aislación	Otro (C)	MI 2-ladrillo
Decil 5-7	< 10 años	ME 3- ladrillo doble aislant e	C 3 - losa aislada e=4cm	Otro (C)	MI 3- tabique liviano
	10 < X < 30	ME 4- ladrillo y aplacado	C 4- losa aislada e=2cm	Otro (C)	MI 4 -ticholo revocado
	> 30	ME 5- ladrillo e=0,23	C 5 -losa con aplacado	Otro (C)	MI 5- ladrillo revocado
Decil 8-10	< 10 años	ME 6- ladrillo doble con cámara	C 3 - losa aislada e=4cm	Otro (C)	MI 3- tabique liviano
	10 < X < 30	ME 7- ladrillo doble y aislant e	C 4- losa aislada e=2cm	Otro (C)	MI 4 -ticholo revocado
	> 30	ME 8- ladrillo e=0,30	C 5 -losa con aplacado	Otro (C)	MI 5- ladrillo revocado

Tabla 2.29: Criterios utilizados para definir aberturas y sus protecciones según su categoría.

		VENTANAS						PUERTAS			
				Dormitorios		Estar		Baño y cocina		Interior	Exterior
		Vidrio	Marco	Inf.	Prot.	Inf.	Prot.	Inf.	Prot.	Inf.	Inf.
Decil 1-4	< 10 años	Simple (V1)	A (BP)	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoPA	TipoPB
	10 < X < 30	Simple (V1)	A (BP)	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoPA	TipoPB
	> 30	Simple (V1)	CP (BP)	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoPA	TipoPB
Decil 5-7	< 10 años	Simple (V1)	A (BP)	TipoVC	ProtBl	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoPA	TipoPC
	10 < X < 30	Simple (V1)	A (BP)	TipoVC	ProtBl	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoPA	TipoPC
	> 30	Simple (V1)	HDC (BP)	TipoVC	ProtBl	TipoVC	ProtBl	TipoVB	0	TipoPA	TipoPC
Decil 8-10	< 10 años	Simple (V1)	A (AP)	TipoVB	ProtBl	TipoVF	0	TipoVB	0	TipoPA	TipoPC
	10 < X < 30	Simple (V1)	M (AP)	TipoVB	ProtBl	TipoVB	0	TipoVB	0	TipoPA	TipoPC
	> 30	Simple (V1)	M (BP)	TipoVB	ProtBl	TipoVB	ProtBl	TipoVB	0	TipoPA	TipoPC

(AP) - de alta prestación.

(BP) - de baja prestación.

A - Aluminio.

HDC - Hierro doble contacto.

CP - Chapa plegada.

M - Madera.

TipoVB - baja prestación sin cortina.

TipoVC - baja prestación con cortina.

TipoVF - Grande de alta prestación sin cortina.

ProtBl - Cortina enrollar de pvc.

TipoPA - Puerta interior de madera.

TipoPB - Puerta exterior de hierro.

TipoPC - Puerta exterior de madera.

### 2.2.3. Orientación, apareamiento y entorno

Tanto la orientación, el apareamiento<sup>6</sup> o el entorno son variables que determinan de qué forma está expuesta la vivienda a su ambiente local (radiación solar y condiciones de viento) y por lo tanto, tendrán gran impacto en su consumo de energía.

Para poder tener un valor representativo de estas características sin tener que relevar todo el parque habitacional del país, se plantea utilizar diferentes probabilidades, que definen el micro-entorno urbano para las diferentes viviendas.

#### Criterios de probabilidades del micro-entorno urbano

El micro-entorno de las ciudades está dado por la diferencias de materialidad, por la presencia del vegetal y por las diferencias de albedo entre otros. Al

<sup>6</sup>En este trabajo el apareamiento se asocia a la cantidad de medianeras que tiene la vivienda: sin medianeras (es decir viviendas exentas), con una, dos o tres medianeras.

analizar el parque habitacional que se encuentra en las ciudades elegidas para la simulación se tomaron los siguientes criterios, para determinar la probabilidad del micro-entorno de cada una:

- Orientación solar respecto a la trama urbana de la ciudad
- Cantidad de medianeras
- Ocurrencia de un piso intermedio en vivienda en altura
- Densidad de arbolado
- Ocurrencia de una obstrucción provocada por el entorno construido

Se adopta la siguiente metodología que se repite para cada una de las ciudades, perteneciente a una zona térmica. Se seleccionan 60 manzanas aleatorias de la ciudad representativa de cada departamento, a través de una foto aérea [29]. De estas se eligen 30 manzanas más en el centro del damero de la ciudad y 30 más en la periferia. En la Figura 2.13 se presenta el ejemplo, de la selección de manzanas utilizadas para determinar las diferentes probabilidades del micro-entorno, en la ciudad de Paysandú.

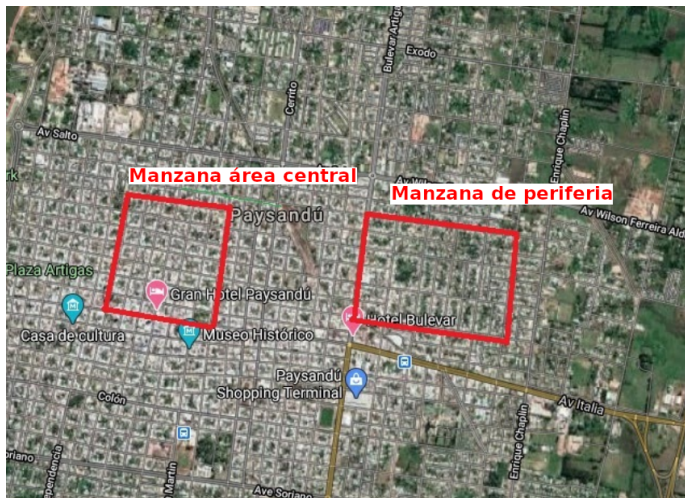


Figura 2.13: Selección de manzanas utilizadas para determinar las diferentes probabilidades del micro-entorno, en la ciudad de Paysandú.

A continuación se describen en detalle los diferentes criterios utilizados en este trabajo para definir el micro-entorno

### Orientación solar respecto a la trama urbana de la ciudad

Para este criterio se analizan, la mayor probabilidad de encontrar viviendas según la orientación solar de la trama, en este caso simplemente se consideran las orientaciones en las que se pueden ubicar viviendas a partir de las manzanas de referencia. En la Figura 2.14 se muestra un ejemplo para dos ciudades.



Figura 2.14: Representación de la orientación de las manzanas de referencia para 2.14a Paysandú y 2.14b Artigas.

En la Tabla 2.30 se presentan las orientaciones de las manzanas de referencia para diferentes ciudades del interior del país. En los casos de Canelones, Montevideo y Rocha, debido a que no hay una orientación preferencial, se pueden tener todas las orientaciones posibles.

Tabla 2.30: Orientaciones preferenciales para diferentes ciudades del Uruguay.

Ciudad	Ángulo (°)	Ciudad	Ángulo (°)
Artigas	42	Rivera	31
Melo (Cerro Largo)	8	Salto	8
Colonia del Sacramento (Colonia)	0	San José de Mayo (San José)	78
Durazno	27	Mercedes (Soriano)	79
Trinidad (Flores)	3	Tacuarembó	43
Florida	43	Treinta y tres	82
Minas (Lavalleja)	39		
Maldonado	0	Canelones	Aleatorio
Paysandú	11	Montevideo	Aleatorio
Fray Bentos (Rio Negro)	43	Rocha	Aleatorio

### Cantidad de medianeras

En las manzanas previamente elegidas aleatoriamente y en base al análisis de la foto área y a las fotografías de las fachadas [29], se estudian la cantidad de viviendas que tienen: ninguna medianera (es decir viviendas exentas); las que tienen una, dos y tres medianeras. Se contabilizan y se determina la probabilidad de tener ninguna, una, dos o tres medianeras, para cada una de las localizaciones estudiadas.

### Ocurrencia de un piso intermedio en vivienda en altura

Para las ciudades en las que según el Censo del INE (2004), se ubican la mayoría de las viviendas en altura, en las 60 manzanas previamente analizadas por ciudad se cuantifican a partir de las fotografías de las fachadas [29], qué porcentaje sería de un piso intermedio y cuál de un último piso, ver Figura 2.15.



Figura 2.15: Vista de ejemplo utilizado para determinar la probabilidad de tener un piso intermedio en vivienda en altura.



### Densidad de arbolado

Para determinar la probabilidad de encontrar un árbol en alguno de los modelos previamente definidos se siguen los siguientes pasos:

1. Se suman las áreas de las manzanas elegidas al azar y se cuantifica el área que ocupa el área construida y qué área aproximada ocupa el verde (ver Figura 2.16).
2. Se determina entonces por ciudad, la probabilidad de encontrar el arbolado.



Figura 2.16: Vista de ejemplo utilizado para determinar la densidad de arbolado.

### Ocurrencia de una obstrucción por el entorno construido

Para la mismas ciudades definidas anteriormente, se analiza y determina en función de la imagen aérea la ocurrencia de tener una obstrucción frontal, o lateral donde se ubica la vivienda.

#### 2.2.4. Configuración del modelo y matriz de probabilidades

Una vez definido el número de simulaciones que se desea realizar, se obtiene la lista de viviendas que hay que simular, según la distribución de la Tabla 2.21 (ver el ejemplo en la Sección 2.2). De esta forma se tiene cuántas viviendas hay que simular, clasificadas por Tipo, Tamaño, Decil socio Económico, Antigüedad y región geográfica (Norte-Noreste, Suroeste-Centro-Noreste, Sur-Sureste y Montevideo).

Debido a que los datos de micro entorno local están asociado a las ciudades, es necesario establecer una relación de viviendas en cada ciudad, que representen la distribución definida para cada región geográfica. Para determinar de forma representativa las viviendas, hay que trasladar el valor de la cantidad de viviendas por región a los diferentes departamentos que la componen, utilizando como referencia la capital de cada uno. En la Tabla 2.31 se presentan las probabilidades de pertenecer a cada departamento (que a su vez estará asociada a la ciudad capital de cada uno), según la región geográfica. De esta forma, sabiendo la cantidad de viviendas por región y utilizando las probabilidades definidas en la Tabla 2.31, se tiene el número de viviendas por ciudad que representa la distribución definida por región geográfica. Una vez definida la cantidad de viviendas que hay que simular para cada ciudad, se sortean las diferentes variables según las probabilidades definidas en la Tabla 2.32 y se establece el AMT de referencia. De esta forma queda completamente definido cuántas viviendas se van a simular, en qué ciudad, qué condición climática y cómo es el micro entorno en el que se sitúa. Utilizando la información de las Tablas 2.28 y 2.29, quedan definidos todos los casos, que cumplen con los requisitos establecidos para la simulación.

Tabla 2.31: Matriz de probabilidades de ocurrencia de los departamentos para cada zona geográfica.

Ciudad	Zona geográfica			
	Norte-Noroeste	Suroeste-Centro-Noreste	Sur-Sureste	Montevideo
Salto	0.39	0	0	0
Paysandú	0.37	0	0	0
Artigas	0.24	0	0	0
Rivera	0	0.09	0	0
Colonia	0	0.17	0	0
San José	0	0.14	0	0
Tacuarembó	0	0.12	0	0
Cerro Largo	0	0.11	0	0
Soriano	0	0.11	0	0
Florida	0	0.09	0	0
Durazno	0	0.07	0	0
Rio Negro	0	0.07	0	0
Flores	0	0.03	0	0
Canelones	0	0	0.58	0
Maldonado	0	0	0.20	0
Rocha	0	0	0.09	0
Lavalleja	0	0	0.07	0
Treinta y Tres	0	0	0.06	0
Montevideo	0	0	0	1

Tabla 2.32: Matriz de probabilidades.

Ciudad	Probabilidad Arbolado	Probabilidad de Entorno	Medianera				Cantidad de pisos	Orientación (°)	ATM
			†Apa. 3 paredes	†Apa. 2 paredes	†Apa. 1 paredes	Excento			
Salto	0.27	0	0	0.6	0.3	0.1	3	8	Salto
Paysandu	0.30	0	0	0.4	0.5	0.1	3	11	Salto
Artigas	0.25	0	0	0.7	0.2	0.1	3	42	Salto
Rivera	0.20	0	0	0.6	0.3	0.1	3	31	Rivera
Colonia	0.45	0	0.1	0.6	0.1	0.2	3	0	Colonia
San Jose	0.1	0	0	0.7	0.2	0.1	3	78	Montevideo
Tacuarembó	0.2	0	0	0.7	0.2	0.1	3	43	Rivera
Cerro Largo	0.1	0	0	0.7	0.2	0.1	3	8	Colonia
Soriano	0.23	0	0.03	0.65	0.19	0.13	3	79	Colonia
Florida	0.23	0	0.03	0.65	0.19	0.13	3	43	Mvdo
Durazno	0.23	0	0.03	0.65	0.19	0.13	3	27	Colonia
Rio Negro	0.23	0	0.03	0.65	0.19	0.13	3	43	Colonia
Flores	0.23	0	0.03	0.65	0.19	0.13	3	3	Colonia
Canelones	0.3	0.4	0.1	0.6	0.1	0.2	5	random	Montevideo
Maldonado	0.18	0.6	0	0.7	0.2	0.1	10	0	Rocha
Rocha	0.3	0	0	0.6	0.2	0.2	3	random	Rocha
Lavalleja	0.1	0	0	0.7	0.2	0.1	3	39	Rocha
Treinta y Tres	0.1	0	0	0.7	0.2	0.1	3	82	Montevideo
Montevideo	0.4	0.5	0.3	0.4	0.2	0.1	10	random	Montevideo

† La contracción Apa. corresponde al Apareamiento de la vivienda.

‡ Considerando únicamente cuando se modela un apartamento como tipo de vivienda.



## Capítulo 3

# Modelado de edificios usando EnergyPlus

Existen diferentes métodos para modelar los edificios desde el punto de vista energético. Entre ellos están las herramientas que se basan en la física del problema, que utilizan ecuaciones detalladas para describir los componentes del sistema. Esta técnica se conoce como Modelado Energético de Edificios (BEM por sus siglas en inglés) y se usa para modelar el comportamiento térmico de edificios enteros y sus sub-sistemas en términos de consumo energético y confort [30]. Existen numerosos software que utilizan este enfoque, algunos de los más utilizados son Energy Plus [31], Trnsys [32] y ESP-r [33]. Tanto EnergyPlus como ESP-r son software de código abierto, desarrollados respectivamente por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) y la Unidad de Investigación en sistemas energéticos (ESRU) de la Universidad de Strathclyde en Glasgow. Por otro lado, Trnsys es un software comercial desarrollado para simular sistemas transitorios. Estos tres softwares fueron testeados por la Agencia Internacional de Energía (IEA) Building Energy Simulation Test (BESTEST) [34] y han sido utilizados ampliamente para analizar consumo energético en edificios [35–37].

En este proyecto, con el fin de cuantificar los requerimientos energéticos del sector residencial, se seleccionó el software EnergyPlus 8.7 por ser de código libre, de uso extendido y presentar varias verificaciones. En el presente capítulo, se presentan las principales características del EnergyPlus junto con los modelos seleccionados en el presente estudio. Para los modelos que nos son la selección por defecto de EnergyPlus se incluye la razón por la cual se decide su utilización. Luego se describe el procesamiento de los resultados que se uti-

lizó en el presente proyecto. Finalmente se incluye un caso de verificación del software.

### 3.1. Modelos

EnergyPlus es una programa de simulación de código abierto que ingenieros, arquitectos e investigadores utilizan para modelar el consumo energético para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y consumo de agua en edificios [31]. La estructura del programa se esquematiza en la Figura 3.1. El “Simulation Manager” controla todo el proceso de simulación, mientras que el “Integrated Solution Manager” maneja los balances de energía de las superficies y del aire, y actúa como interfaz entre el balance de energía y el “Building System Simulation Manager”.

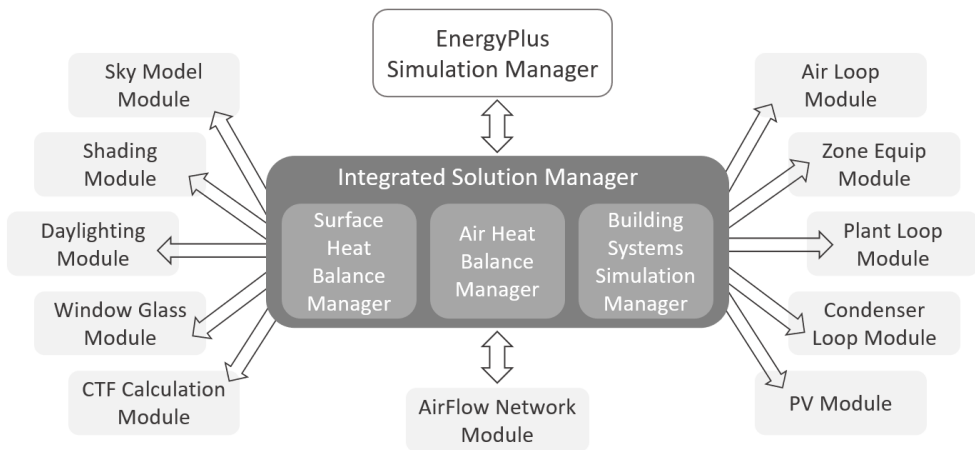


Figura 3.1: Elementos internos del EnergyPlus. Fuente: “Getting Started” [38].

Los balances de energía se realizan para cada zona definida en el modelo de la vivienda. Una zona del modelo es un concepto térmico y no geométrico, consiste en un volumen de aire que se considera a una temperatura uniforme junto con las superficies capaces de transferir y/o almacenar energía que rodean o están contenidas en ese volumen de aire. Por lo tanto, definir las zonas es uno de los primeros pasos en el modelado usando EnergyPlus, y a su vez uno de los más importantes, ya que influirá en la cantidad de balances de energía y por tanto en la precisión de los resultados así como en el tiempo de cómputo.

Los archivos de entrada y salida de EnergyPlus fueron diseñados para un mantenimiento y uso simple, por lo que son archivos de texto en formato ASCII. Los principales archivos de entrada son el Input Data File (IDF), que contiene los parámetros de la simulación, la información del edificio y del sistema de acondicionamiento (HVAC); y el archivo climático (EPW) que contiene los datos climático horarios (y sub-horarios) necesarios para la simulación (temperatura, humedad, velocidad de viento y radiación solar, etc). Los archivos de salida principales corresponden a los resultados de la simulación, así como un archivo en formato Autocad DXF para visualizar la geometría del edificio definida en el IDF.

### 3.1.1. Balance de energía las superficies

Los balances de energía para las superficies de la envolvente, así como para cada superficie interior que encierra a las zonas puede ser expresado como se muestra en la ecuación 3.1:

$$\dot{q}_{SWR} + \dot{q}_{LWR} + \dot{q}_{conv} - \dot{q}_k = 0 \quad (3.1)$$

donde  $\dot{q}_{SWR}$  es el flujo de calor de radiación de longitud de onda corta absorbido,  $\dot{q}_{LWR}$  es el flujo neto de calor de radiación de longitud de onda larga entrante a la superficie,  $\dot{q}_{conv}$  es el intercambio de calor por convección entre el aire y la superficie y  $\dot{q}_k$  es el calor de conducción desde la superficie hacia el interior de la pared, techo o piso.

El primer término incluye luz solar directa, reflejada y difusa o emitida por fuentes internas como luminarias, dependiendo si la superficie estudiada es interior o exterior. Este término depende de la ubicación, el ángulo e inclinación, las propiedades del material y las condiciones del tiempo. El segundo término incluye el intercambio con el ambiente (cielo y suelo), otras superficies de la zona, equipos y personas. Depende de la absorptividad de las superficies, de la temperatura del suelo, cielo y superficies y de los factores de vista. El término convectivo depende del coeficiente de convección y de las temperaturas de la superficie y del aire. Existen varios modelos implementados en EnergyPlus que pueden ser utilizados para determinar los coeficientes de convección. En este trabajo se emplearon los modelos definidos por defecto en EnergyPlus, que son el TARP<sup>1</sup> algoritmo para los coeficientes interiores, y el DOE-2 para los exteriores [40]. Finalmente, el término de conducción puede ser calculado por diferentes formulaciones dependiendo en el tipo de superficie.

---

<sup>1</sup>Basado en el Thermal Analysis Research Program [39]

EnergyPlus distingue entre superficies pertenecientes a paredes o techos, superficies acopladas al suelo y superficies no opacas como ventanas. Dentro de cada categoría existen varios modelos ya implementados que pueden ser utilizados para resolver los balances de energía a las superficies y calcular el flujo de calor a través de ellas. En esta sección se describen los modelos seleccionados en el presente estudio junto con las hipótesis más relevantes.

### Conducción por paredes y techos

EnergyPlus supone que estas superficies tienen una temperatura uniforme, emiten y reflejan de manera difusa, son opacas y grises ( $\tau = 0$ ,  $\alpha = \epsilon$ ). Además, el flujo de calor que transferido desde la superficie se asume uniforme, y el medio se considera no participativo respecto a la radiación.

El calor de conducción que se transfiere por las paredes y techos se modela como unidimensional, transitorio con propiedades del material constantes. La ecuación de conducción del calor simplificada que resulta se presenta en la Ecuación 3.2:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) \quad (3.2)$$

donde  $T$ ,  $x$ ,  $\alpha$  y  $t$  son la temperatura, la coordenada en la dirección del flujo de calor, difusividad térmica y el tiempo respectivamente. Entonces, la ley de Fourier, que se presenta en la Ecuación 3.3, determina el flujo de calor ( $\dot{q}_x''$ ) de conducción en función de la conductividad térmica ( $k$ ) del material y el gradiente de temperatura.

$$\dot{q}_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.3)$$

Por lo tanto, sabiendo las propiedades del material, las condiciones iniciales y las condiciones de borde, la transferencia de calor puede ser calculada resolviendo las ecuaciones 3.2 y 3.3. Dado que la Ecuación 3.2 es en derivadas parciales, el sistema se resuelve de manera numérica por medio del método Función de Transferencia de Conducción, CTF por sus siglas en inglés [41]. Este método resulta en una ecuación lineal simple, es el modelo utilizado en el presente trabajo y corresponde al modelo por defecto en EnergyPlus. Expresa el flujo de calor de conducción para cierto paso temporal para cada cara de la superficie en función de la temperatura en ese tiempo y de algunos tiempos previos y de ambas caras, y en función de flujos de calor en pasos anteriores para la cara dada [40]. Esto se muestra en las siguientes Ecuaciones:



$$\dot{q}_{ki}''(t) = -Z_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_0 T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \phi_j \dot{q}_{ki,t-j\delta}'' \quad (3.4)$$

$$\dot{q}_{ko}''(t) = -Y_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_0 T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \phi_j \dot{q}_{ko,t-j\delta}'' \quad (3.5)$$

donde  $\dot{q}_{ki}''$  y  $\dot{q}_{ko}''$  son los flujos de calor por las caras interna y externa respectivamente.  $T_i$  y  $T_o$  son las temperaturas de las caras interna y externa,  $\delta$  es el paso temporal y  $nz$  y  $nq$  son los números de términos anteriores para las temperaturas y flujo de calor respectivamente. Finalmente,  $X_j$ ,  $Y_j$  y  $Z_j$  son los coeficientes CTF exterior, cruzado e interior respectivamente, y  $\phi_j$  es el coeficiente de flujo CTF. Todos estos coeficientes CTF (CTFs) representan la respuesta térmica del material, son independientes de la temperatura por lo que pueden ser determinados una única vez para cada tipo de construcción. EnergyPlus calcula estos coeficientes mediante el método Espacio de Estado (SS) como se detalla en [40].

El método CTF no tiene en cuenta la difusión ni almacenamiento de humedad, por lo tanto, las soluciones del presente trabajo relativo a las superficie solo tendrán en cuenta el calor sensible.

### Conducción por el suelo

Para determinar el calor transferido por el suelo utilizando EnergyPlus hay dos dificultades a destacar. La primera es que el cálculo de calor por conducción a través de paredes y techo en EnergyPlus es unidimensional, mientras que el calor de conducción por el suelo es tridimensional. La segunda dificultad es la gran diferencia en las escalas temporales en el problema, mientras que para las zonas térmicas la escala es horaria, para el calor por el suelo la escala es mensual [42].

En EnergyPlus existen distintos enfoques para la simulación de la transferencia de calor para superficies horizontales de edificios en contacto con el suelo. Los más simples consisten en definir las temperaturas de las superficies en contacto con el suelo para cada mes. Sin embargo, este enfoque tiene dos grandes inconvenientes: las temperaturas requeridas como entradas del modelo no suelen ser valores conocidos, y el modelo no es sensible a la variación durante el mes de la temperatura en la interfaz entre el piso y el suelo. El segundo inconveniente mencionado puede ser menor, debido a la escala temporal del

problema del calor por el suelo, sin embargo el primero es importante. Para evitar estos problemas se puede utilizar el preproceso Slab, que es un programa auxiliar en EnergyPlus que se ejecuta previo a la simulación y calcula las temperaturas de la interfaz mencionadas, que se utilizan luego como datos de entrada en la simulación. Sin embargo, dicho preproceso necesita como entrada la temperatura interior de las distintas zonas térmicas en contacto con el piso, lo cual es resultado de la simulación principal. Por lo tanto para obtener una solución adecuada, este enfoque requiere un proceso iterativo, resolviendo varias veces tanto el preproceso como la simulación principal, lo cual puede ser muy engorroso y costoso computacionalmente.

En este trabajo, se utilizó un modelo para el suelo basado en diferencias finitas (`GroundDomain:Slab`). Este modelo utiliza una formulación implícita de diferencias finitas para modelar la temperatura del suelo, de esta manera se tiene una simulación estable para cualquier paso temporal y tamaño de grilla, pero se necesita una iteración en cada paso temporal para calcular las temperaturas en el dominio [40]. La idea del modelo es crear una superficie de área equivalente dentro del dominio del suelo que represente las superficies horizontales acopladas al suelo. Esta superficie intercatúa con el suelo y genera las condiciones de borde de temperatura para ser utilizadas en el modelo unidimensional de la simulación principal. El método para acoplar ambos modelos es el sugerido en [43] y se representa en la Figura 3.2.

El flujo de calor superficial medio por todas las superficies conectadas al suelo se impone como la condición de borde en las celdas de la interfaz. El flujo de calor en cada celda de la interfaz se ajusta de acuerdo a la Ecuación 3.6:

$$q_{out,i} = q_{out,1-D} \frac{T_{zone} - T_{out,i}}{T_{zone} - T_{out,average}} \quad (3.6)$$

donde el subíndice  $i$  hace referencia a cada celda de la interfaz, el subíndice  $zone$  hace referencia a cada zona térmica y  $q_{out,1-D}$  es el flujo de calor de conducción medio de todas las superficies acopladas al suelo.

En las superficies laterales e inferior del dominio del suelo se impone un valor de temperatura a partir de datos climáticos. Finalmente, se plantea el balance de energía en las caras de las celdas de las superficies acopladas al suelo, teniendo en cuenta la radiación, convección, conducción y evaporación. Luego, el modelo de suelo determina el perfil de temperatura en la interfaz ( $T_{out,i}$ ), y su valor promediado ( $T_{out,average}$ ) se impone como condición de borde en las superficies acopladas al suelo en el siguiente paso temporal.

La temperatura impuesta como condición de borde para el dominio del suelo (superficies laterales e inferior) se basan en la correlación desarrollada

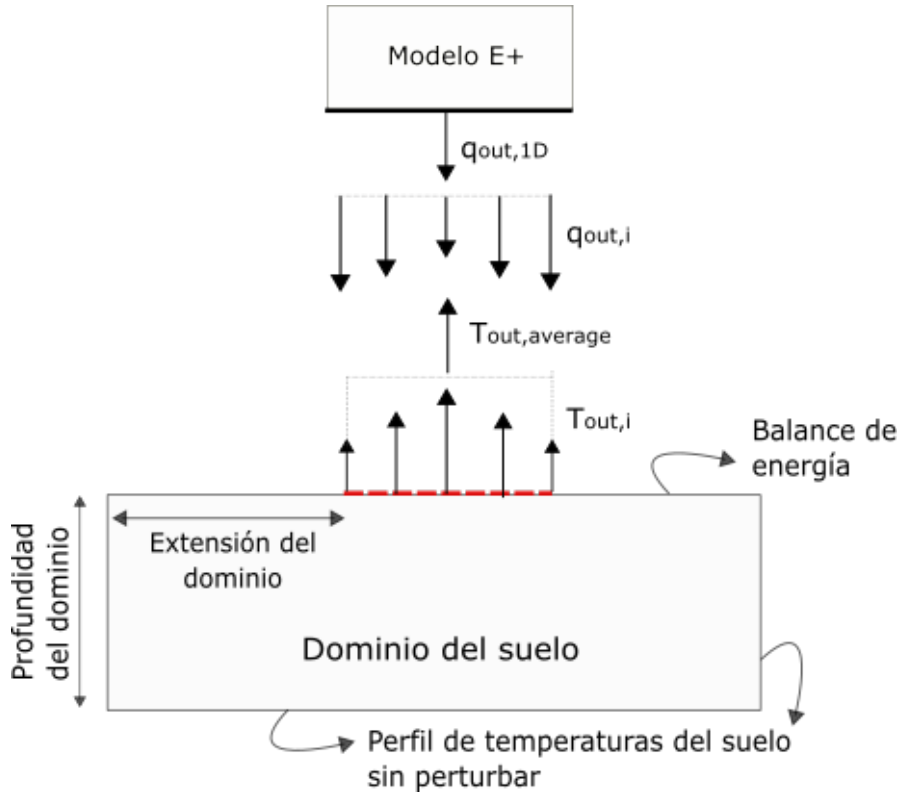


Figura 3.2: Método de acople.

por Kusuda T. y Achenbach P. [44]. Esta correlación usa tres parámetros para determinar la temperatura mencionada en función de la profundidad y el tiempo:

$$T(z, t) = \overline{T_s} - \Delta\overline{T_s} e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}}} \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau} - \theta\right) \quad (3.7)$$

donde  $\overline{T_s}$  y  $\Delta\overline{T_s}$  son la media anual temperatura superficial del suelo y la amplitud de la variación de dicha temperatura durante el año respectivamente.  $\theta$  es el día de temperatura superficial mínima,  $\alpha$  es la difusividad térmica del suelo y  $\tau$  es la constante temporal, que vale 365. EnergyPlus determina los valores de  $\overline{T_s}$ ,  $\Delta\overline{T_s}$  y  $\theta$  a partir de las temperaturas típicas a 0,5 m de profundidad, que se incluyen en los archivos climáticos.

El presente modelo para la transferencia de calor por el suelo ha sido testeado y comparado con otros modelos en los IEA BESTEST [45]. Además, durante

este trabajo se realizaron pruebas adicionales. Para ello se ejecutaron ciertos modelos en EnergyPlus usando el modelo `GroundDomain:Slab` para resolver la transferencia de calor por el suelo, y luego utilizando otro modelo, el preproceso `Slab`. Además, para el caso que utiliza el modelo `GroundDomain:Slab` se testearon dos estimaciones de temperatura de suelo alejado diferentes: la desarrollada por Kusuda y Achenbach y otra basada en un modelo unidimensional de diferencias finitas. Finalmente se realizó una simulación en COMSOL [46], un software de simulación multipropósito que utiliza el método de elementos finitos para resolver la ecuación del calor. Los resultados de la simulación de COMSOL se utilizaron para comparar con los de los modelos utilizados en EnergyPlus.

Se definieron dos casos basados en la misma construcción que se muestra en la Figura 3.3. Estos consisten en un dominio de  $10\text{m} \times 10\text{m}$  con una profundidad de  $3\text{m}$  y un espesor de piso de  $0,2\text{m}$ . Las propiedades térmicas tanto para el suelo como para el piso son  $k_{soil} = k_{wall} = 1,5\text{ W/mK}$  y  $\alpha_{soil} = \alpha_{wall} = 4,6 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ . La temperatura dentro de la zona es  $T_{in} = 20^\circ\text{C}$  y los coeficientes de convección interno y externo son  $h_{in} = 6\text{ W/m}^2\text{K}$  y  $h_{out} = 12\text{ W/m}^2\text{K}$  respectivamente. En el caso 1, la temperatura exterior es  $T_{out} = 0^\circ\text{C}$  durante todo el año, mientras que en el caso 2 vale  $T_{out} = 5\sin\left(\frac{\pi}{12}(t - 9)\right)$ , donde  $t$  es la hora del día. Además, se definieron tres combinaciones de espesor de aislante ( $e$ ) y resistencia térmica ( $R_{ins}$ ) para cada caso. En la Tabla 3.1 se resumen los casos con sus valores de temperatura exterior y características de aislante.

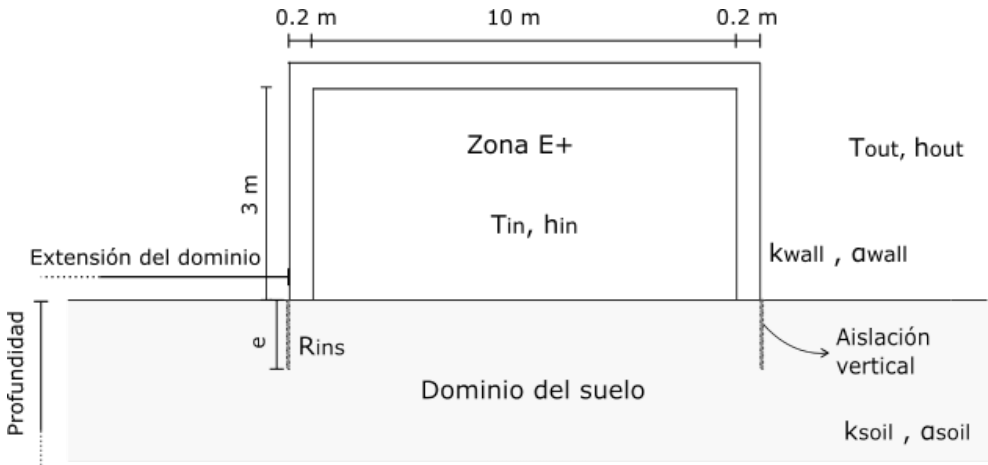


Figura 3.3: Esquema de casos de prueba.

Para la implementación de estos casos en EnergyPlus, la temperatura del suelo a una profundidad de  $0,5\text{m}$  se definió igual a  $0^\circ\text{C}$  para todos los meses.

Tabla 3.1: Definición de casos.

Caso	$T_{\text{out}}(^{\circ}\text{C})$	Aislante	
		Espesor	$R_{\text{ins}}(m^2K/W)$
1a	0	0	0
1b	0	0,6	0,5
1c	0	0,6	1
2a	$5 \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-9)\right)$	0	0
2b	$5 \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-9)\right)$	0,6	0,5
2c	$5 \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-9)\right)$	0,6	1

Las dimensiones del dominio se establecieron de  $15m$  tanto para ancho como para la profundidad del mismo. La superficie superior del piso se estableció al mismo nivel que la superficie del suelo. Se utilizó un paso temporal de una hora. Para los parámetros geométricos de la malla se utilizaron los valores por defecto en EnergyPlus. Esto es un coeficiente de malla de 1,6, que representa un valor moderado para la compresión de celdas, y una densidad de malla de 6, lo que significa que durante el mallado [47] se colocan al menos 6 celdas entre dos particiones del dominio cualesquiera (aristas del piso, del aislante, etc).

En el caso de COMSOL, se utilizó el modelo de Transferencia de Calor en Sólidos, donde se realizaron simulaciones en estado estacionario y en estado transitorio para los casos 1 y 2 respectivamente. Dada la simetría de la geometría el dominio de la simulación se definió como un cuarto del dominio del problema aunque con mayores dimensiones ( $50m$  tanto de ancho como profundidad, ver Figura 3.4). Se definió condición de borde adiabática en los planos de simetría, y también en los laterales y en la cara inferior del dominio. Para las superficies superiores se utilizó condición de borde convectiva, con coeficientes de convección y temperaturas diferentes en el interior y el exterior. La malla utilizada es la definida por defecto en COMSOL, cuyas características con respecto a **Sequence type** y **Element size** son **Physics controlled mesh** y **Finer** respectivamente. Esta configuración resulta en los siguientes parámetros:

- Tamaño máximo de elemento: 2,86 m
- Tamaño mínimo de elemento: 0,208 m
- Máximo índice de crecimiento: 1,4
- Factor de curvatura: 0,4
- Resolución de regiones estrechas: 0,4

El dominio definido para el caso implementado en COMSOL se presenta en la Figura 3.4 junto con la malla utilizada (ver Figura 3.4a) y las temperaturas y líneas de flujo de calor obtenidas para el caso 1 (Figuras 3.4b y 3.4c respectivamente).

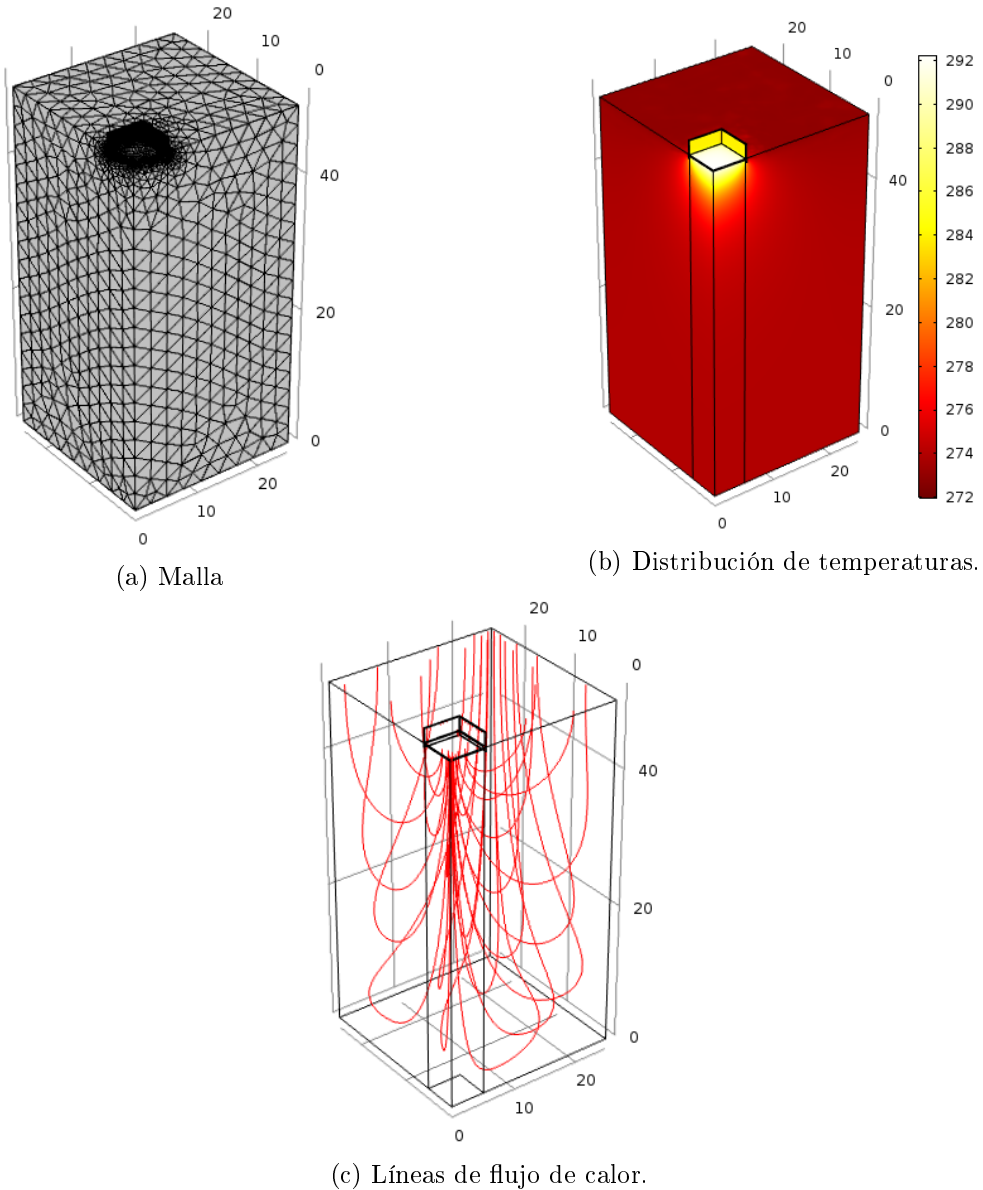


Figura 3.4: COMSOL dominio y resultados.

Los resultados obtenidos en cada modelo para el calor transferido a través del suelo se presentan en las Tablas 3.2 y 3.3. Teniendo en cuenta que la temperatura interna es fija en ambos casos, en el caso 1 se obtiene un valor constante ya que la temperatura exterior también es constante (valor único en la Tabla 3.2). Por otro lado, en el caso 2 la temperatura exterior varía durante el día con un comportamiento sinusoidal, por lo que el calor transferido también varía con el mismo comportamiento (valor medio y amplitud en la Tabla 3.3).

A partir de estos resultados se puede observar que los tres modelos de EnergyPlus pueden ser utilizados para modelar la transferencia de calor por el suelo. Sin embargo, cabe mencionar que el modelo Slab preprocessor calcula una temperatura media para cada mes para la interfaz en el suelo ( $T_{out,i}$  en la Figura 3.2), por lo tanto no es capaz de considerar las variaciones de la temperatura exterior presentes en el caso 2.

Tabla 3.2: Resultados del Caso 1.

Caso	$Q_{ground}(W)$			
	COMSOL	Slab preprocessor	GroundDomain: Slab K-A	GroundDomain: Slab FD
1a	1272,0	1027,9	1236,0	1380,2
1b	1125,0	966,0	1143,5	1288,8
1c	1125,0	931,0	1080,6	1225,8

Con el fin de definir cuál es el modelo mas preciso de los implementados en EnergyPlus, se calcularon la desviación del valor cuadrático medio (RMSD) y la desviación del valor medio (MBD) para cada caso tomando la simulación de COMSOL como referencia. Los resultados se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5

Tabla 3.3: Resultados del Caso 2.

Caso		$Q_{ground}(W)$			
		COMSOL	Slab preprocessor	GroundDomain: Slab K-A	GroundDomain: Slab FD
2a	media	1274,7	1230,8	1234,2	1374,6
	amplitud	3,2	0,0	2,9	3,0
2b	media	1125,3	1133,8	1142,4	1283,4
	amplitud	2,8	0,0	0,1	0,2
2c	media	1125,1	1080,8	1079,5	1220,4
	amplitud	2,8	0,0	0,1	0,1

respectivamente, y se expresan relativos al valor medio de los resultados de COMSOL.

Tabla 3.4: RMSD y MBD para el Caso 1.

Model	RMSD (%)	MBD (%)
Slab preprocessor	17,2	-17,0
GroundDomain:Slab K-A	3,0	-1,8
GroundDomain:Slab FD	10,9	10,6

Tabla 3.5: RMSD y MBD para el Caso 2.

Model		RMSD (%)	MBD (%)
Slab preprocessor	media	3,1	-2,3
	amplitud	100,2	-100,0
GroundDomain:Slab K-A	media	3,1	-2,0
	amplitud	75,9	-64,8
GroundDomain:Slab FD	media	10,3	10,0
	amplitud	73,9	-62,4

En el caso 1, el modelo `GroundDomain:Slab` con la temperatura lejos del piso estimada a partir de la correlación de Kusuda y Achenbach resulta ser el más preciso si se toma la solución de COMSOL como referencia. En este caso, `Slab preprocessor` subestima en gran medida el calor por el suelo, mientras que el modelo `GroundDomain:Slab FD` lo sobre-estima. Por otro lado, en el caso 2 tanto `Slab preprocessor` como `GroundDomain:Slab KA` tienen un buen resultado para el valor medio del calor pero no para su amplitud, que es subestimada en los tres modelos. Si bien en aplicaciones reales habrá variaciones durante el día, como las definidas en el caso 2, se puede observar que la amplitud en la variación del calor por el suelo es mucho menor que su valor medio, por lo que la precisión en dicho calculo no será tan relevante. Por lo tanto, de los resultados del caso 2 se puede concluir que los modelos `Slab preprocessor` y `GroundDomain:Slab KA` son las mejores opciones.

En definitiva, el modelo `GroundDomain:Slab` con la temperatura lejos del piso estimada a partir de la correlación de Kusuda y Achenbach parece ser el modelo más adecuado de los tres modelos considerados. Por lo tanto, este es el modelo que se utilizó en este proyecto.



### Transferencia de Calor por las Ventanas

El cálculo de la transferencia de calor por las ventanas se basa en el enfoque capa-por-capa implementado en EnergyPlus. Este enfoque considera que las ventanas están compuestas por diferentes componentes incluyendo vidriado, aire (u otros gases que separen las capas de vidriado), marco, separadores y dispositivos de sombreado. De todos los posibles elementos mencionados, el único que es requerido en el modelo es el vidriado, que consiste en al menos una capa plana de vidrio.

EnergyPlus determina las temperaturas de las superficies de vidrio y el flujo de calor transferido a través del vidriado resolviendo las ecuaciones de balance de energía en cada superficie de vidriado para cada paso temporal. Estas ecuaciones son más complejas que para el caso de las paredes ya que la ventana está compuesta por capas que no son opacas. Como se detalla en [40] las hipótesis tomadas en el modelo para resolver los balances son:

1. Se desprecia el almacenamiento de calor en el vidrio. Debido a esto no se incluye un término de capacitancia térmica en las ecuaciones.
2. Las caras del vidrio son isotérmicas, y por tanto el flujo de calor es unidimensional y perpendicular a dichas caras.
3. Las capas de vidrio son opacas para la radiación infrarroja.
4. La radiación de longitud de onda corta es absorbida de manera uniforme en el vidrio, por lo que se distribuye igual cantidad en ambas caras de la capa de vidrio.

Además, para el balance de energía de la zona se necesitan las temperaturas interiores del marco y de los separadores. Por lo tanto, se resuelven también ecuaciones de balance de energía en las superficies interior y exterior de los marcos y separadores. Se asumen isotérmicos y sus perfiles se consideran rectangulares.

Finalmente, se consideran también los dispositivos de sombreado, que se pueden colocar en el lado exterior o en el interior, o también entre capas de vidrio. En este trabajo solo se consideraron dispositivos exteriores. El modelo considera todos los intercambios radiativos del dispositivo con sus alrededores (suelo, cielo y vidrios para longitud de onda larga y la radiación solar), así como la convección con el aire exterior y con el aire comprendido en el espacio entre el dispositivo y el vidrio [40].

Las ventanas de los edificios que se modelaron en este proyecto, consisten en una capa de vidrio (o dos cuando se consideran mejoras), un marco y un

divisor. El material del marco y el divisor depende de la antigüedad del edificio y del nivel socioeconómico de sus ocupantes. Se asumió que las protecciones solares son completamente opacas, y su presencia depende de la antigüedad del edificio y del nivel socioeconómico de sus ocupantes y también de la zona térmica.

### 3.1.2. Cargas por Infiltraciones y Ventilación natural

Las infiltraciones y la ventilación natural son impulsadas por diferencias de presión a través de la envolvente del edificio, causadas por el viento y las diferencias de densidades entre el aire interior y exterior (por estar a diferentes temperaturas). Los sistemas mecánicos de movimiento de aire también inducen diferencias de presión a través de la envolvente durante la operación de aparatos, tales como dispositivos de combustión, sistemas de distribución térmica de aire forzado con fugas y sistemas de ventilación mecánica. La magnitud de la diferencia de presión entre el interior y el exterior en un determinado lugar depende de esos mecanismos así como de las características de las aberturas del edificio.

Existen varias fuentes que provocan infiltraciones de aire o que favorecen la ventilación. Por ejemplo, la exposición de la edificación a corrientes de viento, diferencias de temperatura (efecto termosifón) o sistemas mecánicos (como extractores). Para determinar el flujo de aire que atraviesa la edificación no es posible calcular por separado cada uno de estos flujos y sumarlos, dado que hay una fuerte dependencia entre ellos debido a la presión y la no linealidad existente entre el caudal y la diferencia de presión. Lo correcto es identificar las diferencias de presión causadas por estos efectos y calcular el flujo resultante a partir de esta.

Existen varios modelos en EnergyPlus con distintos niveles de sofisticación para resolver los flujos de aire debidos a las infiltraciones y la ventilación, y su respectiva carga térmica. Los más simples modelan el edificio como una única zona y asumen una única temperatura, estos son el `DesignFlowRate`, el `EffectiveLeakageArea` y el `FlowCoefficient` para infiltraciones y también el `DesignFlowRate` y el `WindAndStackWithOpenArea` para ventilación. En todos estos modelos el flujo másico de aire puede ser cargada directamente por el usuario o como una función que depende de parámetros que define el usuario, la diferencia de temperatura entre el aire interno y el externo y de la velocidad del viento. Por otro lado, un modelado más detallado es posible usando el `AirflowNetwork` (AFN), también implementado en EnergyPlus. Usando este modelo, se tienen en cuenta también los flujos de aire entre zonas internas, y no solo entre el interior y el exterior. Además, a diferencia de los modelos

antes mencionado, en este modelo se tienen en cuenta la dirección del viento y las características espaciales del edificio (ubicación de aberturas, ventanas, puertas, etc.).

Por lo dicho en el párrafo anterior y teniendo en cuenta que las cargas térmicas por infiltraciones y ventilación pueden representar un porcentaje importante del calor total intercambiado por una zona térmica y sus alrededores, en el presente estudio se decidió utilizar el modelo **AirflowNetwork**.

Este modelo es capaz de determinar el flujo de aire a través de grietas en superficies tanto interiores como exteriores, y también puede determinar el flujo debido a la ventilación natural. Por otro lado permite establecer la apertura y cierre de ventanas para favorecer la ventilación natural, ya sea con cierta programación o basado en criterios de confort térmico. El modelo no tiene en cuenta circulación ni estratificación de aire en una zona térmica [47]. El método consiste en una red de nodos, cada uno con cierta temperatura, humedad y presión, conectados por componentes a través de los cuales puede existir un flujo de aire. Cada zona térmica en el edificio representa un nodo, mientras que en el exterior existe un nodo por cada componente por el cual pueda fluir aire, como grietas, aberturas, ventanas, etc.

El cálculo del flujo de aire depende fuertemente de la presión en la envolvente del edificio debido al viento [48]. Estas presiones se calcular para cada nodo exterior como se muestra en la ecuación 3.8:

$$p_w = C_p \rho \frac{V_{ref}^2}{2} \quad (3.8)$$

donde  $p_w$  en  $Pa$  es la la presión de viento relativa a la presión estática en flujo sin alterar,  $\rho$  es la densidad del aire ( $kg/m^3$ ),  $V_{ref}$  es la velocidad de viento de referencia a la altura local (m/s) y  $C_p$  es el coeficiente de presión de viento de la fachada correspondiente.

La velocidad de viento local para cada nodo exterior se determina con la Ecuación 3.9:

$$V_z = V_{met} \left( \frac{\delta_{met}}{z_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left( \frac{z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (3.9)$$

donde los subíndices  $z$  y  $met$  representan la ubicación deseado y la estación meteorológica respectivamente.  $V$  es la velocidad de viento,  $z$  la altura desde el suelo y  $\delta$  y  $\alpha$  son el espesor de capa límite del perfil de velocidad de viento y su exponente respectivamente.  $\delta$ ,  $\delta_{met}$ ,  $\alpha$  y  $\alpha_{met}$  toma valores dependiendo del tipo de terreno que se considere [47].

El coeficiente de presión se calcula para cada fachada de manera automática en cada paso temporal, utilizando la Ecuación 3.10:

$$C_p = 0.6 \ln[1.248 - 0.703 \sin(\theta/2) - 1.175 \sin^2(\theta) + 0.131 \sin^3(2\theta G) + 0.769 \cos(\theta/2) + 0.07G^2 \sin^2(\theta/2) + 0.717 \cos^2(\theta/2)] \quad (3.10)$$

donde  $C_p$  es el coeficiente de presión medio para una cierta fachada,  $\theta$  es el ángulo entre la dirección del viento y la normal saliente de la fachada en cuestión y  $G$  se define como  $\ln(L_1/L_2)$  con  $L_1$  el ancho de la pared en cuestión y  $L_2$  el ancho de la pared contigua.

Luego, basado en las presiones de la envolvente y flujos forzados de aire (si los hubiera), el modelo procede a calcular presiones y flujos de aire natural. Cada componente tiene una relación entre el flujo másico de aire y la caída de presión. Por lo tanto, para calcular la presión en cada nodo y el flujo de aire en cada componente, se debe resolver el sistema de ecuaciones que se genera al plantear la ecuación de cada componente.

En este trabajo se asume que las infiltraciones son por grieta en el techo, por cada aperturas (ventanas y puertas tanto interiores como exteriores) y por las escaleras en casas de dos pisos. Los modelos utilizados para caracterizar el flujo de aire por estos distintos componentes en función de la diferencia de presión existentes, son el **Crack**, el **SimpleOpening** y el **HorizontalOpening**. El flujo de aire a través de grietas y por aberturas cerradas (tanto horizontales como verticales) se calculan con la Ecuación 3.11 con la excepción de que para aperturas no existe un *FactordeGrieta* y que el factor de corrección debido a la temperatura no se tiene en cuenta.

$$\dot{m} = (\text{FactordeGrieta}) C_T C_Q (\Delta P)^n \quad (3.11)$$

En la Ecuación 3.11,  $\dot{m}$  es el flujo másico de aire (kg/s), el *FactordeGrieta* lo define el usuario,  $C_Q$  es el coeficiente de flujo másico a 1Pa,  $\Delta P$  es la diferencia de presión entre los extremos de la grieta y  $n$  es el exponente de flujo de aire.  $C_T = \left[ \frac{\rho_0}{\rho} \right]^{n-1} \left[ \frac{\nu_0}{\nu} \right]^{2n-1}$  es factor de corrección adimensional respecto a una temperatura de referencia, donde  $\rho$  y  $\nu$  son la densidad y la viscosidad cinemática del aire para la condición de temperatura existente, mientras que  $\rho_0$  y  $\nu_0$  son esas propiedades a la condición de referencia, la cual es: 20°C y 101325 Pa.

Cuando las ventanas o las puertas están abiertas el modelo **SimpleOpening** establece la diferencia de presión a todas las cotas  $z$  en la abertura basada en presiones de referencia. Para ello asume la hipótesis de Bernoulli en ambos

lados de la apertura e incluye un término de turbulencia como se muestra en la Ecuación 3.12:

$$P_1(z) - P_2(z) = (P_{1,ref} - P_{2,ref}) - g(\rho_1 z - \rho_2 z) + \Delta P_t \quad (3.12)$$

donde los subíndices 1 y 2 se refieren a cada lado de la abertura,  $P$  es la presión del aire,  $P_{ref}$  es la presión de aire a  $z = 0$  y  $\Delta P_t$  es la diferencia de presión que simula el efecto de turbulencia.

Luego, la velocidad del flujo de aire a cada cota  $z$  viene dada por la Ecuación 3.13:

$$v(z) = \sqrt{2 \frac{P_1(z) - P_2(z)}{\rho}} \quad (3.13)$$

Finalmente, conociendo el perfil de velocidades el flujo másico se calcula como se muestra en la Ecuación 3.14:

$$\dot{m} = C_d \theta \int_{z=0}^{z=H} \rho v(z) W dz \quad (3.14)$$

donde  $\dot{m}$  es el flujo másico de aire (kg/s),  $C_d$  es el coeficiente de descarga,  $\theta$  es el factor de reducción de área que define la apertura efectiva de la ventana o puerta,  $W$  es el ancho de apertura y  $H$  es su altura.

El modelo **SimpleOpening** tiene en cuenta que en la Ecuación 3.12 puede existir una raíz en  $0 < z < H$ , lo que significa que hay un plano neutral y que habrá flujo en ambas direcciones por la abertura.

Por otro lado, el modelo **HorizontalOpening** considera la superposición de los flujos de flotación y forzado (debido a la diferencia de presión). La formulación de este modelo se explica en [40], los resultados para la relación entre flujo másico y diferencia de presión a través de una apertura horizontal se resumen en las Ecuaciones 3.15 y 3.16. En dichas ecuaciones los subíndices  $U$  y  $L$  hacen referencia a las zonas superior e inferior respectivamente,  $\dot{m}_U$  es el flujo másico desde la zona inferior mientras que  $\dot{m}_L$  es el flujo másico desde la zona superior.  $A_{eff}$  es el área de apertura efectiva,  $C_d$  es el coeficiente de descarga y  $\rho_{ave}$  es la densidad media del aire entre las zonas superior e inferior. Por último en dichas ecuaciones aparece el término  $\dot{m}_{buo}$ , que es el flujo de flotación y se calcula como se muestra en la Ecuación 3.17.

$$\dot{m}_U = \begin{cases} \dot{m}_{buo} & P_L \geq P_U \\ -\rho_U A_{eff} C_d \left( \frac{2|\Delta P|}{\rho_{ave}} \right)^{0.5} + \dot{m}_{buo} & P_L < P_U \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_L = \begin{cases} \dot{m}_{buo} & P_U \geq P_L \\ -\rho_L A_{eff} C_d \left( \frac{2\Delta P}{\rho_{ave}} \right)^{0.5} + \dot{m}_{buo} & P_U < P_L \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\dot{m}_{buo} = \begin{cases} \dot{m}_{buo,max} \left( 1 - \frac{|\Delta P|}{|\Delta P_{Flood}|} \right) & \Delta\rho > 0 \text{ and } \frac{|\Delta P|}{|\Delta P_{Flood}|} < 1 \\ 0 & \text{Resto del dominio} \end{cases} \quad (3.17)$$

Donde  $\dot{m}_{buo,max} = \rho_{ave} 0.055 \left( \frac{g|\Delta\rho|D_H^5}{\rho_{ave}} \right)^{0.5}$  con  $D_H$  el diámetro hidráulico y  $\Delta P_{Flood} = |C_{shape}^2 \frac{g\Delta\rho D_H^5}{2A_{eff}^2}|$  con  $C_{shape} = 0.942$ .

Por lo tanto, basados en los modelos

**Crack, SimpleOpening y HorizontalOpening,**

la información de los coeficientes de descarga de los componentes, los coeficientes y exponentes de flujo másico de aire, y con los datos de viento contenidos en el archivo climático, el modelo AFN resuelve el sistema de ecuaciones y calcula la presión en cada nodo y el flujo másico a través de cada componente. Luego, con los valores de flujo másico de aire calcula las cargas térmicas de infiltración y ventilación.

### 3.1.3. Sistemas HVAC

Para calcular el requerimiento energético de la vivienda es posible incluir en las simulaciones equipos de Calor, Acondicionamiento de Aire y Ventilación Mecánica (HVAC por sus siglas en inglés). La carga térmica de la zona se intenta compensar con el término  $\dot{Q}_{sys}$  que será aportado por el sistema HVAC. Dicho calor se determina según la Ecuación 3.18, donde  $\dot{m}_{sys}$  es el aire que suministra el equipo,  $C_p$  es el calor específico del aire,  $T_{supply}$  es la temperatura a la que se suministra el aire y  $T_z$  es la temperatura de la zona.

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{supply} - T_z) \quad (3.18)$$

Para determinar  $\dot{Q}_{sys}$ , EnergyPlus utiliza un esquema predictor-corrector que primero estima el valor asumiendo condición estacionario y temperatura de la zona igual al valor definido. Luego, con esa cantidad de energía el sistema es simulado y se calcula la verdadera capacidad del equipo, así como la verdadera temperatura de la zona.

En este proyecto se utilizó el objeto: **IdealLoadsHVAC**. Es el modelo más simple de los presentes en EnergyPlus y consiste en un sistema ideal que es

capaz de suministrar la cantidad de aire necesaria y en la condición requerida mezclando aire exterior (cero en este proyecto) con aire de la propia zona, y luego aportando o retirando calor y humedad con una eficiencia del 100 %. Este modelo es útil para estudiar los requerimientos energéticos de los edificios, para lo cual no es necesario un modelado detallado de un sistema HVAC, permite realizar una cuantificación de la cantidad de energía útil necesaria para mantener al edificio en ciertas condiciones. Asimismo, es posible relacionar dichos requerimientos energéticos con las características del edificio como los materiales, el tamaño y calidad de las aberturas, la ubicación geográfica y la forma de uso del edificio.

Por lo tanto, en el presente proyecto, los valores obtenidos de calor y frío refieren a requerimientos energéticos. La conversión de dichos valores a consumo energético dependerá de qué tantos edificios cubran dichos requerimientos y de las características de los sistemas HVAC utilizados (eficiencia y fuente de energía).

### 3.1.4. Balance de Energía al aire

El balance de energía al aire para cierta zona térmica incluye la energía almacenada en el aire, las cargas convectivas internas, la transferencia por convección de las superficies de dicha zona, la transferencia de calor debido a la ventilación e infiltraciones de aire exterior y de aire intercambiado con otras zonas, y del sistema HVAC. Esto se presenta en la Ecuación 3.19.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_l} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_s} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z) + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3.19)$$

En la Ecuación 3.19,  $C_z$  y  $T_z$  son la capacidad calorífica y la temperatura del aire respectivamente,  $\dot{Q}_i$  son las ganancias de calor debido a las cargas convectivas internas,  $h_i$ ,  $A_i$  y  $T_{si}$  son los coeficientes de convección, las áreas y las temperaturas de las superficies de dicha zona térmica;  $\dot{m}_{inf}$  es el flujo de masa entrando en la zona desde el exterior debido a infiltraciones y/o ventilación natural,  $C_p$  es el calor específico del aire,  $T_\infty$  es la temperatura exterior,  $\dot{m}_i$  son los flujos de aire provenientes de otras zonas,  $T_{zi}$  son las temperatura del aire de dichas zonas y  $\dot{Q}_{sys}$  es el aporte del sistema HVAC. Además,  $N_l$ ,  $N_s$  y  $N_z$  son la cantidad total de cargas internas, superficies en la zona y zonas respectivamente.

El modelo utilizado en este proyecto para resolver el balance de energía al aire es `3rdOrderBackwardDifference`, que utiliza una aproximación de diferencias finitas como se detalla en la Ecuación 3.20:

$$\left. \frac{dT_z}{dt} \right|_t \approx (\delta t)^{-1} \left( \frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) \quad (3.20)$$

donde  $\delta t$  es el paso temporal de la simulación y  $T_z^t$  es la temperatura de la zona térmica para el tiempo  $t$ .

Las cargas convectivas internas ( $\sum_{i=1}^{N_l} \dot{Q}_i$  in Eq. 3.19) se determinan basadas en la información que ingresa el usuario. En este trabajo, se consideraron como ganancias internas a personas, iluminación y equipos eléctricos. En los tres casos se especifica la carga total que termina aportándose como calor a la zona y la fracción de dicha energía que se aporta como radiación, calor latente o pérdidas, y se asume que la ganancia convectiva es la diferencia entre la carga total y las de otro tipo (radiación, latente o pérdidas). Pérdidas de calor se define solo en equipos eléctricos y representa la energía eléctrica consumida por equipos que no termina en forma de calor, puede ser energía transformada en trabajo mecánico o calor transferido al exterior.

El intercambio convectivo con las superficies de la zona se determina a partir de los balances realizados a dichas superficies que se describen en la Sección 3.1.1. Por otro lado, las infiltraciones y la ventilación natural, ya sea proveniente del exterior o de otras zonas térmicas se calculan por medio del módulo AFN (presentado en la Sección 3.1.2). Finalmente, el término correspondiente al sistema HVAC se calcula como se mencionó en la Sección 3.1.3.

## 3.2. Procesamiento de resultados casos individuales

En esta sección se presenta una sistematización del procesamiento de resultados de simulaciones individuales, que serán utilizados en las simulaciones globales del parque habitacional. El objetivo es caracterizar cada edificio modelado en términos de sus requerimientos energéticos. Además, con el fin de identificar estrategias de mejoras, las ganancias y pérdidas de energía se diferenciaron por cada componente del edificio, como la envolvente, las ventanas, las ganancias internas y las debido a las infiltraciones y ventilación. Se consideraron entonces diferentes variables de EnergyPlus con el objetivo de determinar la contribución de cada término a la demanda de calor o frío.

Todos los resultados procesados para cada edificio se presentan en una escala mensual. Además, con el fin de identificar fácilmente las causas más importantes de la demanda de energía térmica, se calcula la contribución relativa



de cada término. Este cálculo se realiza para ambos períodos, el de refrigeración y el de calefacción, que en el presente trabajo se consideraron que son del 1 de Diciembre al 28 de Febrero y del 1 de Junio al 31 de Agosto respectivamente. Si bien estos períodos podrían presentar algunas variaciones según la zona geográfica que se considere, se tomaron los mismos períodos para todos los casos con el objetivo de poder comparar los resultados energéticos.

En las secciones siguientes se describen los procesamientos de los distintos resultados. Esto incluye una explicación de la interpretación de los resultados, junto con las variables de salida de EnergyPlus utilizadas para determinarlas. Basados en el gran número de simulaciones que se realizaron durante este proyecto, el proceso de cálculo de los resultados deseados a partir de las variables de salida de Energyplus fue automatizado. Para ello se desarrollaron funciones en Python utilizando la librería Eppy [49]. Esta librería se basa en Python y tiene la capacidad de manipular archivos de EnergyPlus.

### 3.2.1. Cargas del sistema HVAC

Estos resultados incluyen la energía requerida mensualmente para calefacción y refrigeración por el sistema HVAC para lograr el confort térmico de los ocupantes. Estas cargas energéticas son para toda la vivienda, aunque no todas las zonas térmicas de la misma son acondicionadas. Esto varía para los diferentes edificios dependiendo del uso de las zonas y de la cantidad de ocupantes, con el objetivo de ser lo más realista posible. Si bien existen viviendas en las cuales el acondicionamiento térmico se realiza sin tener en cuenta el uso de las zonas y la presencia de ocupantes (como edificios de apartamentos con calefacción central), estos son la minoría en el parque habitacional de Uruguay. Por lo tanto, este tipo de viviendas no fueron consideradas.

Las variables de salida de EnergyPlus utilizadas para obtener estos resultados son: *Zone Ideal Loads Zone Sensible Cooling Rate* y *Zone Ideal Loads Zone Sensible Heating Rate*. Durante las simulación, estas variables se calculan para cada hora y para cada zona. Por lo tanto, su procesamiento requiere sumar la carga de todas las zonas y para todo el mes.

### 3.2.2. Envolvente

Con el fin de analizar la transferencia de calor a través de la envolvente, se separa en ganancias y pérdidas por paredes, piso y techo. Además, para las ganancias por las paredes y el techo, se distingue entre las debido a la radiación solar absorbida por las superficies y conducida hacia el interior de la vivienda, y las debido a otras fuentes. Estas otras fuentes pueden incluir radiación de

longitud de onda larga desde los alrededores y el intercambio por convección con el aire exterior.

Para una mejor comprensión de estos resultados, el balance de energía a la superficie exterior de una pared, las variables de salida procesadas y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.5. Lo mismo puede aplicar a la superficie exterior del techo.

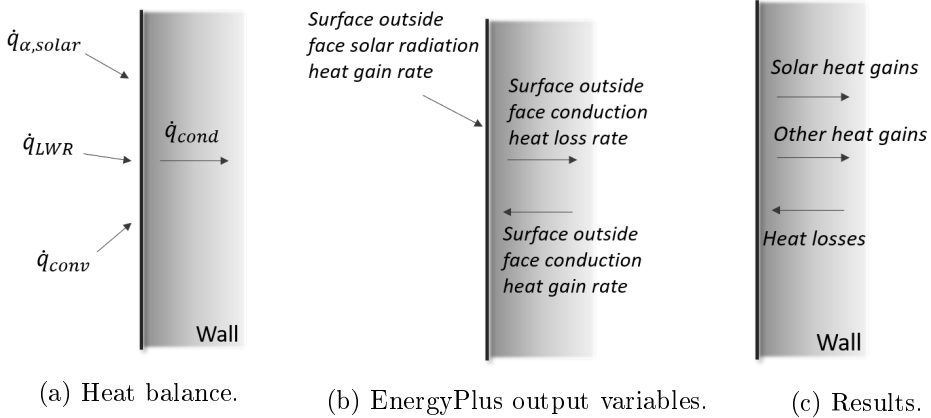


Figura 3.5: Outside surfaces variables.

El balance de energía en una superficie exterior (Figura 3.5a) se presenta en la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_{\alpha,solar} + \dot{q}_{LWR} + \dot{q}_{conv} = \dot{q}_{cond} \quad (3.21)$$

donde  $\dot{q}_{\alpha,solar}$  es la radiación solar absorbida,  $\dot{q}_{LWR}$  es el calor neto de radiación intercambiado para longitudes de onda larga,  $\dot{q}_{conv}$  es el calor intercambiado por convección con el aire exterior y  $\dot{q}_{cond}$  es el calor de conducción que ingresa a la pared.

Las variables de salida de EnergyPlus que se necesitan procesar se muestran en la Figura 3.5b. Estas se calculan de manera horaria y para cada superficie exterior de la vivienda. *Surface outside face solar radiation heat gain rate* es el calor ganado por la superficie exterior debido a la radiación solar absorbida, que es equivalente a  $\dot{q}_{\alpha,solar}$  en la Figura 3.5a y en la Ecuación 3.21. Es importante resaltar que dicho calor no necesariamente termina siendo calor ganado por la zona, ya que puede ser calor perdido por la superficie hacia el ambiente exterior debido a radiación de longitud de onda larga y/o convección.

Por otro lado, están las variables *Surface outside face conduction heat loss rate* y *Surface outside face conduction heat gain rate* que son la energía que

entra y que sale de la zona respectivamente. Estas dos variables son desde el punto de vista de la superficie, por lo que la pérdida de calor de la superficie es la ganancia de calor de la zona y viceversa.<sup>2</sup>  $\dot{q}_{cond}$  de la Figura 3.5a y Ecuación 3.21 es equivalente a *Surface outside face conduction heat loss rate* cuando toma valores positivos, y es equivalente a *Surface outside face conduction heat gain rate* cuando toma valores negativos.

Finalmente, los resultados que se desean calcular mostrados en la Figura 3.5c son *Solar heat gains* que, a diferencia de *Surface outside face solar radiation heat gain rate*, representa el calor que realmente gana la zona debido a la radiación solar absorbida en la superficie exterior. También se tiene *Other heat gains* que refiere al calor que entra a la zona debido a la radiación de longitud de onda larga o a la convección, y *Heat losses* que representa las pérdidas de calor de la zona hacia el exterior.

Estos resultados se calculan basados en las variables de salida mencionadas como se muestra en las Ecuaciones 3.22, 3.23, 3.24 y 3.25:

$$\Delta = \dot{q}_{cond,in} - \dot{q}_{\alpha,solar} \quad (3.22)$$

$$Solar\ heat\ gains = \begin{cases} \dot{q}_{\alpha,solar} & \Delta \geq 0 \\ \dot{q}_{cond,in} & \Delta < 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

$$Other\ heat\ gains = \begin{cases} \Delta & \Delta \geq 0 \\ 0 & \Delta < 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

$$Heat\ losses = \dot{q}_{cond,out} \quad (3.25)$$

donde  $\dot{q}_{cond,in}$  es el valor horario de *Surface outside face conduction heat loss rate*,  $\dot{q}_{\alpha,solar}$  es el valor horario de *Surface outside face solar radiation heat gain rate* y  $\dot{q}_{cond,out}$  es el valor horario de *Surface outside face conduction heat gain rate*.

Estos resultados se calculan para cada hora y para cada superficie exterior del edificio. Luego se suman distinguiendo entre tipo de superficie (paredes o techo) y los resultados horarios obtenidos se convierten en energía mensual. Para el caso de calor transferido por el suelo, a pesar de que el balance difiere del presentado en 3.5a, las variables de salida analizadas y su posproceso es el mismo que para paredes y techos. En este caso, las ganancias debido a la radiación solar son siempre nulas y solo se distingue entre ganancias y pérdidas.

---

<sup>2</sup>En este análisis, el espesor de las paredes es considerado como parte de la zona.

### 3.2.3. Ventanas

Los resultados que se desean calcular para las ganancias de calor por las ventanas incluyen distinguir entre radiación solar transmitida a través del vidrio y otras ganancias, las cuales pueden incluir intercambio convectivo por el vidrio y por los marcos hacia el interior de la zona. Para el caso de las pérdidas de calor, la distinción es entre el calor perdido por el vidrio y el perdido por los marcos. Basados en la suposición que la radiación solar transmitida será un proporción importante del calor total entrando a la zona, y dado que la orientación de las ventanas juegan un papel fundamental en el valor de estas variables, todos los resultados para las ventanas se presentan para cada orientación.

Las variables de salida procesadas para la transferencia de calor por las ventanas y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.6. En la Figura 3.6a se muestran las variables de salida usadas para obtener los resultados deseados de calor entrando y saliendo a la zona a través de las ventanas. *Surface window transmitted solar radiation rate* y *Surface window shortwave from zone back out window heat transfer rate* son la radiación transmitida a través del vidrio en ambas direcciones. Considerando las hipótesis asumidas para los vidrios (ver Sección 3.1.1) estos calores de radiación transmitidos son solamente de longitud de onda corta, y son la radiación solar transmitida hacia el interior y ambas, la radiación solar reflejada y la radiación de iluminación eléctrica transmitidas hacia el exterior de la zona. También están la *Surface window inside face glazing net infrared heat transfer rate* y la *Surface window inside face glazing zone convection heat gain rate*, que representa el intercambio neto de radiación infrarroja y el calor por convección desde el vidrio a la zona. Finalmente, *Surface window inside face frame and divider zone heat gain rate* es la transferencia de calor desde los marcos a la zona.

Los resultados deseados son *Solar transmitted heat gains*, *Other heat gains*, *Glazing heat losses* y *Frame and divider heat losses* y se presentan en la Figura 3.6b. Estos resultados se calculan para cada hora y para cada ventana basadas en las variables de salidas como se presenta en las siguientes Ecuaciones:

$$\text{Solar transmitted heat gains} = \dot{q}_{\tau, \text{solar}} \quad (3.26)$$

$$\text{Other heat gains} = \dot{q}_{\text{conv, glazing}}^+ + \dot{q}_{\text{net, IR}}^+ + \dot{q}_{\text{f\&d}}^+ \quad (3.27)$$

$$\text{Glazing heat losses} = -\dot{q}_{\text{conv, glazing}}^- - \dot{q}_{\text{net, IR}}^- + \dot{q}_{\tau, \text{out}} \quad (3.28)$$

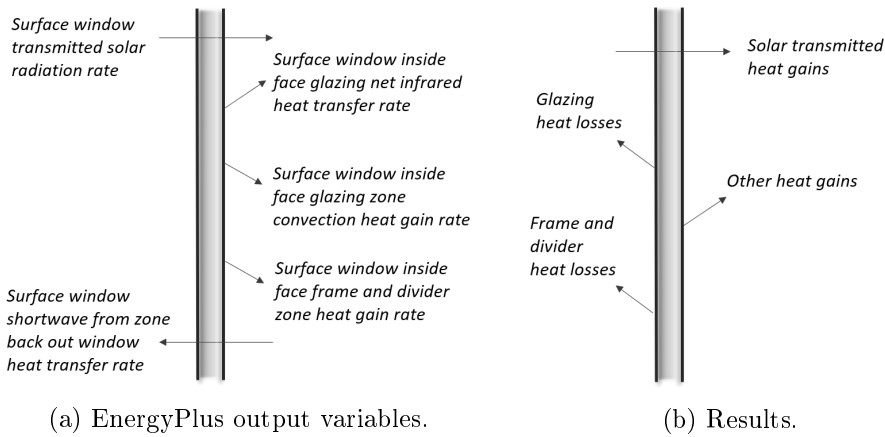


Figura 3.6: Windows variables.

$$\text{Frame and divider heat losses} = -\dot{q}_{f\&d}^- \quad (3.29)$$

donde  $\dot{q}_{\tau,solar}$  es el valor horario de *Surface window transmitted solar radiation rate*,  $\dot{q}_{conv,glazing}^+$  ( $\dot{q}_{conv,glazing}^-$ ),  $\dot{q}_{net,IR}^+$  ( $\dot{q}_{net,IR}^-$ ) y  $\dot{q}_{f\&d}^+$  ( $\dot{q}_{f\&d}^-$ ) son los valores horarios de *Surface window inside face glazing net infrared heat transfer rate*, *Surface window inside face glazing zone convection heat gain rate* y *Surface window inside face frame and divider zone heat gain rate* cuando son positivos (negativos) y 0 cuando son negativos (positivos).

Estos resultados son calculados de manera horaria y para cada ventana. Luego esos valores se suman distinguiendo entre ventanas con distinta orientación, y los resultados horarios obtenidos se convierten a energía mensual.

### 3.2.4. Infiltraciones y ventilación

En la versión 8.7 de EnergyPlus las variables de salida no permiten diferenciar las cargas térmicas debido a infiltraciones de las cargas debido a ventilación. Por lo tanto, los resultados obtenidos sólo distinguen entre ganancias y pérdidas. Además, en este trabajo solo se ha considerado el calor sensible ya que el sistema HVAC solo se controla por temperatura y el modelo utilizado para resolver las ecuaciones de balances de energía solo dan soluciones de calor sensible.

Las variables de salida utilizadas para estudiar las cargas por infiltraciones y ventilación son *Zone infiltration sensible heat gain rate*, *Zone infiltration sen-*

*sible heat loss rate*, *Zone mixing sensible heat gain rate* y *Zone mixing sensible heat loss rate*. Sus valores corresponden a las ganancias y pérdidas horarias correspondientes al ingreso de aire exterior en cada zona y las ganancias y pérdidas horarias de energía de la zona debido al aire proveniente de zonas contiguas.

Sumando las ganancias y restando las pérdidas de energía para todas las zona y para cada hora para un mes dado, se obtiene la cantidad total de energía entrando o saliendo del edificio debido a las infiltraciones y ventilación.

### 3.2.5. Ganancias internas

Otras fuentes de energía son las ganancias internas, que solo contribuyen al calor entrante a la zona. Las ganancias internas consideradas en este trabajo son aquellas debido al metabolismo de los ocupantes, los equipos eléctricos y la iluminación. Así como se explicó para las demás cargas térmicas, sólo se consideró calor sensible. Las variables de salida utilizadas para su estudio son *Zone people sensible heating rate* y *Zone electric equipment total heating rate* y *Zone lights total heating rate*. Sus valores son directamente las ganancias horarias en cada zona, por lo tanto el único procesamiento consiste en sumar todas las cargas y expresarlas como energía mensual.

### 3.2.6. Contribuciones relativas

Con el fin de identificar las principales razones de los requerimientos de energía térmica para cada edificio, todas los resultados definidos previamente se procesaron para determinar la contribución relativa de cada componente. Gracias a eso, es posible desarrollar medidas de mejora más efectivas para la disminución de la energía requerida. Los análisis de contribución relativa se realizaron para los períodos de refrigeración y calefacción previamente definidos, y consiste en determinar las ganancias o pérdidas netas de cada componente.

Los diferentes componentes que se consideraron contribuyen a la carga térmica total fueron separados en: paredes, piso, techo, ventanas, infiltraciones y ventilación, personas, equipos e iluminación. Por lo tanto, para el período de refrigeración la contribución de las paredes sería el calor ganado por el edificio a través de las mismas menos el calor perdido por estas; y lo mismo para el resto de los componentes. Para el período de calefacción el calculo será el opuesto. A modo de ejemplo en las ecuaciones 3.30, 3.31 y 3.32 se presenta el cálculo para las cargas netas por las paredes para ambos períodos. Para el resto de componentes el procedimiento es análogo.

$$\text{Walls net} = \text{Walls solar gains} + \text{Walls other gains} - \text{Walls losses} \quad (3.30)$$

$$\text{Walls net cooling load} = \begin{cases} \text{Walls net} & \text{if } \text{Walls net} \geq 0 \\ 0 & \text{if } \text{Walls net} < 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\text{Walls net heating load} = \begin{cases} -\text{Walls net} & \text{if } \text{Walls net} \leq 0 \\ 0 & \text{if } \text{Walls net} > 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

Luego, la carga neta de refrigeración se determina sumando la carga neta de refrigeración de cada componente durante el período de refrigeración, y lo mismo para la carga neta de calefacción. Finalmente, conociendo la carga neta de los componentes y la carga neta total, se determina la contribución de cada componente.

### 3.3. Validación en un caso experimental

Para asegurarse de que el comportamiento modelado con EnergyPlus es adecuado y representa los valores reales del comportamiento de una vivienda, se presenta la comparación de los resultados de la simulación con un modelo experimental controlado.

Básicamente se presenta un ensayo cuyo objetivo es modelar numérica y experimentalmente un recinto con un muro Trombe utilizando EnergyPlus. Cabe mencionar que dicho recinto fue construido en el marco de un proyecto FSE-ANII anterior (FSE 2013 10649).

A continuación se presenta la descripción del montaje experimental, el modelo del recinto en EnergyPlus, los resultados y las principales conclusiones de la validación.

#### 3.3.1. Montaje experimental

El montaje experimental tiene lugar en Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República (LES - <http://les.edu.uy/>), el cual se ubica en la ciudad de Salto, Uruguay (Latitud = 31.28° S, Longitud = 57.92° W, Altitud = 65 m snm). El montaje consiste de un recinto de 6.5 m<sup>2</sup> de base interior y 2.6 m de altura promedio, perfectamente orientado Norte-Sur, Este-Oeste, construido con poliestireno expandido de 10 cm de espesor en toda la

envolvente menos la cara norte la cual limita con la pared de adobe. En la pared norte se construye una viga semi enterrada de hormigón cíclopeo de 15 x 30 cm de base y 2 m de largo, aislada con poliestireno expandido del ambiente exterior y del suelo. Sobre ella se monta una pared de adobe negro de 30 cm de espesor y 4.6 m<sup>2</sup> de superficie. Los ladrillos de adobe en Uruguay consisten en una mezcla de barro con tierra negra, cáscara de arroz y estiércol de caballo, que son secados a la intemperie por dos semanas o más dependiendo las condiciones climáticas. Posteriormente pasarían al horno de secado para convertirse en ladrillos, pero en este caso se trabaja con el adobe sin hornear, por eso su color negro. En la Figura 3.7 se muestra una foto del montaje experimental.



Figura 3.7: Foto del recinto con muro Trombe.

La densidad promedio de los ladrillos de adobe es de aproximadamente 1300 kg/m<sup>3</sup>. El dispositivo experimental además cuenta con un recinto exterior al anterior, con el objetivo de protección, de 15.7 m<sup>3</sup> construido básicamente con una envolvente de materiales livianos como se muestra en la Figura 3.7. En la cara norte del sistema, 5 cm frente a la pared de adobe, se coloca una cubierta transparente de vidrio común de 5.9 mm de espesor formando así una cámara de aire hermética de 0.30 m<sup>3</sup>. Continuando hacia el norte se coloca una persiana enrollable de PVC de 2 cm de espesor, hueca, con un sistema de apertura-cierre programable. El vidrio se fija a la viga con marcos de aluminio, cubriendo las juntas con tiras de caucho y silicona.

En el dispositivo experimental se monta un sistema de medidas controladas por un adquirente de datos DataTaker DT85, en el que se instalaron 25 sensores de temperatura y 2 de irradiancia solar. Los sensores de temperatura son sensores del tipo PT1000, ajustados y calibrados en el LES con una in-



certidumbre menor a  $0.3^{\circ}\text{C}$ , 16 de ellos miden temperatura de superficie y 9 temperatura de aire. Los sensores de irradiancia son LI-COR modelo Li-200 instalados en plano vertical en la pared norte, uno delante y otro detrás del vidrio como se puede apreciar en la Figura 3.7. Todas las mediciones se toman de forma sincronizada, cada 20 s, y se registra cada minuto la media de 3 lecturas consecutivas. Además de la instrumentación montada en el dispositivo, se cuenta con medidas de irradiancia global y difusa en plano horizontal, y directa en incidencia normal, provenientes de un seguidor solar SOLYS2 con dos CMP10 y un CHMP1 marca Kipp & Zonen, que son medidas permanentes del LES, adquiridas en la misma cadencia temporal. Todos los radiómetros son calibrados cada dos años con el estándar secundario del laboratorio (Kipp & Zonen CMP22 calibrado en el World Radiation Center con trazabilidad a la referencia radiométrica mundial). Además, se tiene medidas climáticas de una estación Campbell, próxima al dispositivo experimental. Esta estación cuenta con un adquisidor modelo CR1000, sensor de temperatura y humedad relativa modelo CS215, sensor de rapidez y dirección del viento CS03002, sensor de precipitaciones TE525-LC, y sensor de presión atmosférica CS100. Los datos de la estación son de cadencia minutal y se encuentran disponibles en la base de datos del laboratorio. Por último, también se cuenta con medidas de un pirgeómetro de la marca Kipp & Zonen modelo SGR4 (mide radiación de la atmósfera en el infrarrojo lejano). Con el conjunto de medidas meteorológicas se elaboraron dos archivos de datos climáticos en el formato de EnergyPlus (.epw), uno para el año 2017 y el otro para el año 2018. Estos años cubren el período en el cual fue ensayado el recinto.

### 3.3.2. Modelo en EnergyPlus

Se construye un modelo en tres dimensiones en el programa SketchUp con plugin OpenStudio compuesto por tres zonas térmicas como se ilustran en la Figura 3.8 (vista en planta): (A) recinto correspondiente a la Habitación, (B), espacio correspondiente al Local y (C), recinto entre el muro de adobe y la cubierta de vidrio correspondiente al Recinto Norte Envoltente.

Este modelo se exporta al programa EnergyPlus donde se cargaran las características constructivas de los cerramientos. Para la cubierta de vidrio, de 5.90 mm de espesor, se utiliza una transmisividad en incidencia normal de 0.80 y un índice de refracción de 1.53. Dichas propiedades se estimaran a partir de los datos experimentales de irradiancia solar en plano vertical en la referencia [50]. Para modelar la transmisión de la radiación solar a través de la ventana se utilizo el modelo detallado de EnergyPlus [51]. El resto de las propiedades termo-físicas de los materiales fueron ajustadas en base a valores

dados por las referencias [52, 53] como se muestran en la Tabla 3.6. Para la persiana se considera una resistencia térmica de  $0.83 \text{ m}^2\text{K/W}$ , una absorptividad térmica de 0.4 y una emisividad de 0.94. Para la reflectividad del suelo se utiliza un valor de 0.25, dado para el pasto (ver Figura 3.7).

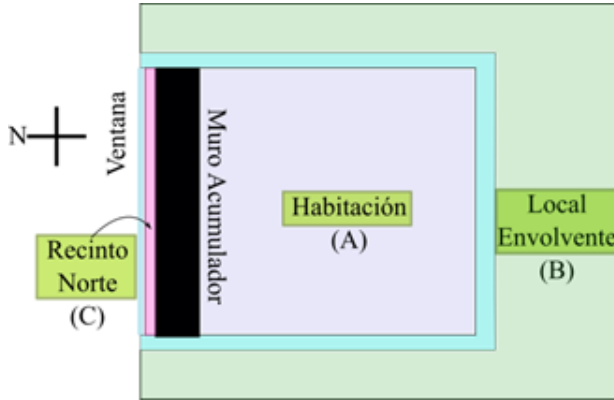


Figura 3.8: Esquema del modelo en SkechUp, vista en planta.

Tabla 3.6: Propiedad termo-físicas de materiales.

Material	Adobe	Poliestireno	Zinc	OSB	Hormigón
Conductividad térmica ( $\text{W}/(\text{mK})$ )	1,5	0,055	45	0,13	1,3
Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1300	15	7800	650	2000
Calor específico ( $\text{J}/(\text{kgK})$ )	1800	1450	480	1800	1000
Absortancia Solar	0,9	0,9	0,05	0,8	0,9
Emisividad	0,9	0,2	0,55	0,8	0,9

Para el caudal de aire debido a infiltraciones se utiliza el modelo *Airflow Network* de EnergyPlus [51, 54]. Para esto se caracteriza la permeabilidad al aire de la zona B mediante un ensayo Blower Door, este ensayo se realiza de acuerdo a la norma ISO 9972:2015 [55]. A través de este ensayo se estima un coeficiente de fuga de  $C = 0.152 \text{ kg}/(\text{hPa}^n)$  y un coeficiente de presión de  $n = 0,629$  para la envolvente de la zona B (superficies que limitan con el exterior), las otras zonas se consideraron herméticas. A cada una de las superficies exteriores de la zona B se le asigna un coeficiente de fuga, expresado en  $\text{kg}/(\text{sPa}^n)$ , y un coeficiente de presión  $n$ . En este sentido, el coeficiente de fuga total se distribuye de forma proporcional al área, sin contar el área del piso el cual se considera estanco, y se considera el mismo coeficiente de presión de 0,629 para todas las superficies.

El dispositivo se ensaya a lo largo de los dos años de toma de datos (2017 y 2018) de cuatro formas distintas según el uso de la persiana: (I) sin persiana, (II) con persiana durante el día, (III) con persiana durante la noche, y (IV) con persiana todo el día. El uso de la persiana en el modelo se controla por horarios. Para el caso (II) la persiana se cierra a las 7:00 y se abre a las 19:00. Para el caso (III) se tienen dos casos: (a) la persiana se cierra a las 19:30 y se abre a las 6:30, y (b) la persiana se cierra a las 17:30 y se abre a las 8:30. De los dos años de datos se seleccionan diez secuencias diferentes, el período y la configuración de la persiana de cada secuencia se muestra en la Tabla 2.

Tabla 3.7: Secuencias.

Sec.	Conf.	Período de simulación		
		Inicio	Fin	# días
1	I	06/01/17	02/02/17	27
2	I	24/03/17	23/04/17	30
3	I	24/06/17	11/07/17	17
4	I	23/09/18	09/12/18	77
5	II	11/03/18	22/04/18	42
6	IIIa	09/02/17	02/03/17	21
7	IIIa	16/05/17	21/06/17	36
8	IIIb	26/05/18	12/07/18	47
9	IV	20/02/18	07/03/18	15
10	IV	28/04/18	22/05/18	24

Para que el modelo se independice de las condiciones iniciales (desconocidas) las secuencias se simulan 5 veces de forma consecutiva y al seleccionar los períodos se cuida que las condiciones de temperatura y nubosidad al inicio y al final de cada secuencia sean similares.

### 3.3.3. Resultados

Para evaluar el desempeño del modelo en EnergyPlus se determina, para cada secuencia y para cada zona (A, B y C), la desviación media (*Mean Bias Deviation* - MBD) y el desvío cuadrático medio (*Root Mean Square Deviation* - RMSD) como se muestra en las ecuaciones siguientes:

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{T}_i - T_i), \quad rMBD = \frac{MBD}{T_{max} - T_{min}}, \quad (3.33)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{T}_i - T_i)^2}, \quad rRMSD = \frac{RMS}{T_{max} - T_{min}}, \quad (3.34)$$

donde  $T_i$  es la temperatura experimental,  $\hat{T}_i$  es la temperatura dada por el modelo en EnergyPlus, y  $N$  es la cantidad de datos (horas) de cada secuencia. Es importante notar que las temperaturas de las zonas presentan distintos grados de variabilidad y no es lo mismo un valor de RMSD de  $1^\circ\text{C}$  asociado a una variabilidad de  $10^\circ\text{C}$  que el mismo valor de RMSD asociado a una variación  $40^\circ\text{C}$ . Por este motivo, se relativizaron los indicadores dados MBD y RMSD para cada secuencia, dividiéndolos por la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura experimental ( $T_{max} - T_{min}$ ) de una determinada serie de datos. El cálculo de estos indicadores relativizados, rMBD y rRMD, también se muestra en las Ec (3.33) y (3.34). Para el cálculo de los indicadores no se tiene en cuenta los primeros cinco días de cada secuencia.

En la Tabla 3.8 se presentan los resultados obtenidos. La zona Recinto Norte presenta la mayor variabilidad exhibiendo valores de la diferencia ( $T_{max} - T_{min}$ ) para las diferentes series entre  $24.1^\circ\text{C}$  y  $60.2^\circ\text{C}$ , le sigue la zona Local Envolverte con diferencias ( $T_{max} - T_{min}$ ) entre  $24.6^\circ\text{C}$  y  $38.0^\circ\text{C}$ , y por último la zona Habitación con diferencias ( $T_{max} - T_{min}$ ) entre  $13.4^\circ\text{C}$  y  $20.0^\circ\text{C}$ . La alta variabilidad en el Recinto Norte está marcada porque en algunas series las medidas son en días claros de invierno, llegando a altas temperaturas debido a la radiación durante el día, y bajas temperaturas durante la noche; además, en otras series dicho recinto está cubierto por una persiana, haciendo que la variación de temperatura esté altamente amortiguada. La temperatura en el Local Envolverte acompaña bastante la temperatura ambiente, aumentando sensiblemente cuando recibe radiación, sobretodo en verano. Por último, en la Habitación, si bien gracias al muro solar se logra evitar bajas temperaturas dentro de la misma, si en verano se usa sin persiana, se llega a temperaturas muy superiores a las de confort.

En la Figura 3.9 se muestran los datos de temperatura teóricos y experimentales de 10 días correspondientes a la secuencia 1 (sin persiana), y en la Figura 3.10 se muestran los datos de temperatura teóricos y experimentales para de 10 días correspondiente la secuencia 9 (persiana durante todo el día).

Tabla 3.8: Indicadores.

Sec.	Zona	RMSD (°C)	rRMSD (%)	MBD (°C)	rMBD (%)	$\Delta T$ (°C)
1	Habitación	1.2	8.3	0.5	3.7	13.8
	Recinto Norte	3.6	11.1	-3.4	-10.5	32.8
	Local Envolvente	2.3	7.6	-0.1	-0.4	30.9
2	Habitación	2.1	12.4	-1.9	-10.8	17.2
	Recinto Norte	6.0	10.8	-5.3	-9.5	55.7
	Local Envolvente	2.7	8.0	-0.6	-1.6	34.1
3	Habitación	2.6	18.1	-1.7	-11.5	14.4
	Recinto Norte	3.1	5.5	-2.0	-3.6	56.9
	Local Envolvente	1.7	6.9	-0.3	-1.5	24.6
4	Habitación	1.5	7.4	-0.5	-2.5	20.0
	Recinto Norte	3.9	8.2	-3.4	-7.2	47.4
	Local Envolvente	2.3	6.2	-0.7	-1.7	38.0
5	Habitación	1.4	7.5	0.5	2.5	17.9
	Recinto Norte	3.1	9.2	-0.5	-1.3	33.6
	Local Envolvente	1.9	5.1	-0.8	-2.1	37.2
6	Habitación	2.4	17.0	2.1	14.9	14.1
	Recinto Norte	2.9	7.0	-1.3	-3.2	41.4
	Local Envolvente	2.4	8.5	0.2	0.7	27.8
7	Habitación	2.8	15.4	-2.1	-11.4	18.3
	Recinto Norte	6.2	10.3	-3.5	-5.8	60.1
	Local Envolvente	1.3	4.0	-0.1	-0.2	32.9
8	Habitación	2.9	14.3	-1.8	-9.1	20.0
	Recinto Norte	3.6	6.1	-2.2	-3.7	59.8
	Local Envolvente	1.8	5.3	0.2	0.4	34.1
9	Habitación	0.6	4.1	0.3	2.3	13.7
	Recinto Norte	0.7	3.0	-0.2	-1.0	24.1
	Local Envolvente	2.0	6.0	-0.7	-2.0	32.9
10	Habitación	1.0	7.5	0.5	3.4	13.4
	Recinto Norte	1.9	7.5	0.9	3.5	25.3
	Local Envolvente	2.8	10.4	-1.5	-5.4	27.0

Las secuencias 1, 2, 4, 5, 9 y 10 presentan un muy buen nivel de concordancia entre datos teóricos y experimentales con valores de rRMSD entre 3.0% y 12.4% y valores de rMBD entre -10.8% y 3.7%. Dichas secuencias representan el 64% de los datos experimentales. Las secuencias restantes 3, 6, 7 y 8 presentan un buen nivel de concordancia en las zonas B y C, con rRMSD entre 4.0% y 10.3% y rMBD entre -5.8%, y 0.4% pero en la zona A la concordancia no es tan buena presentando valores de rRMSD entre 14.3% y 18.1% y valores de rMBD entre -11.5% y 14.9%. Estas series de medida (zona A, secuencias 3, 6, 7 y 8) representan un 12% de los datos experimentales.

Por lo tanto, para una parte muy significativa de los datos experimentales (88%) los resultados predichos por el programa EnergyPlus ajustan muy bien a los datos experimentales, siendo el mejor ajuste para la habitación del 4.1%,

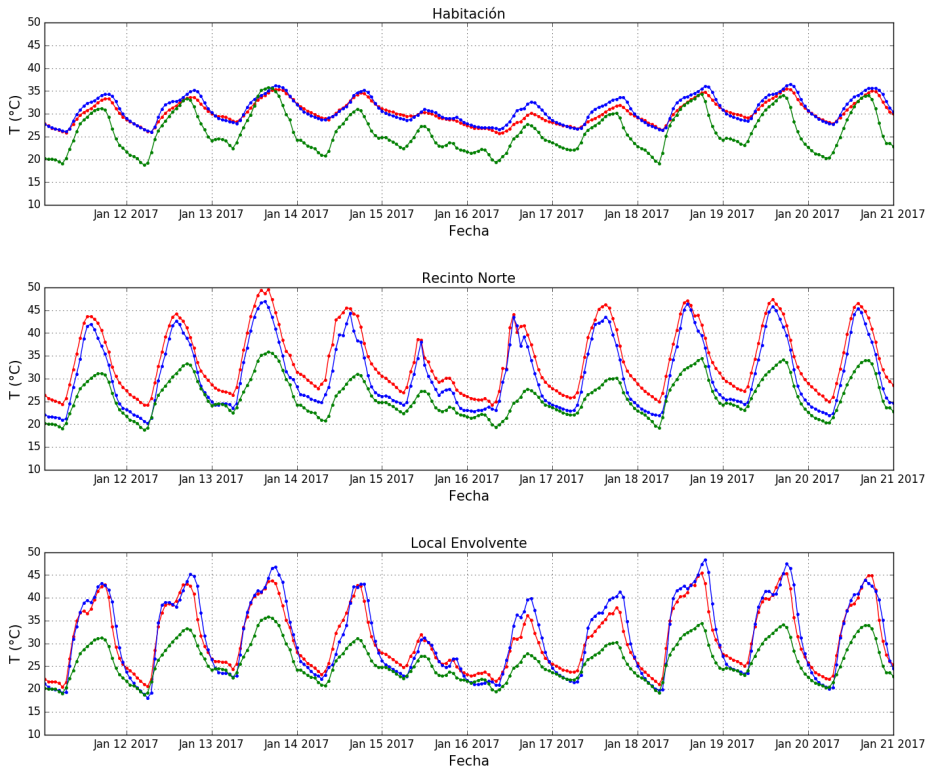


Figura 3.9: Temperatura en función del tiempo para un período de 10 días de la secuencia 1 (sin persiana). La curva roja representa los datos horarios experimentales, la azul los datos modelados, y la verde la temperatura ambiente exterior.

3.0% para el recinto norte y 4.0% para el local envoltante. Para una porción menor de los datos (12%), la cual corresponde a las series de la zona A de secuencias 3, 6, 7 y 8, se obtuvo un apartamiento significativo de los valores predichos por el programa respecto a los datos experimentales, llegando a un valor máximo de rRMSD de 18.1%. Más allá de estas discrepancias, se entiende que el programa ha sido correctamente implementado, en particular el modelo de transmisión de la radiación solar a través de la ventana norte y el de infiltraciones de aire (*Airflow Network*).

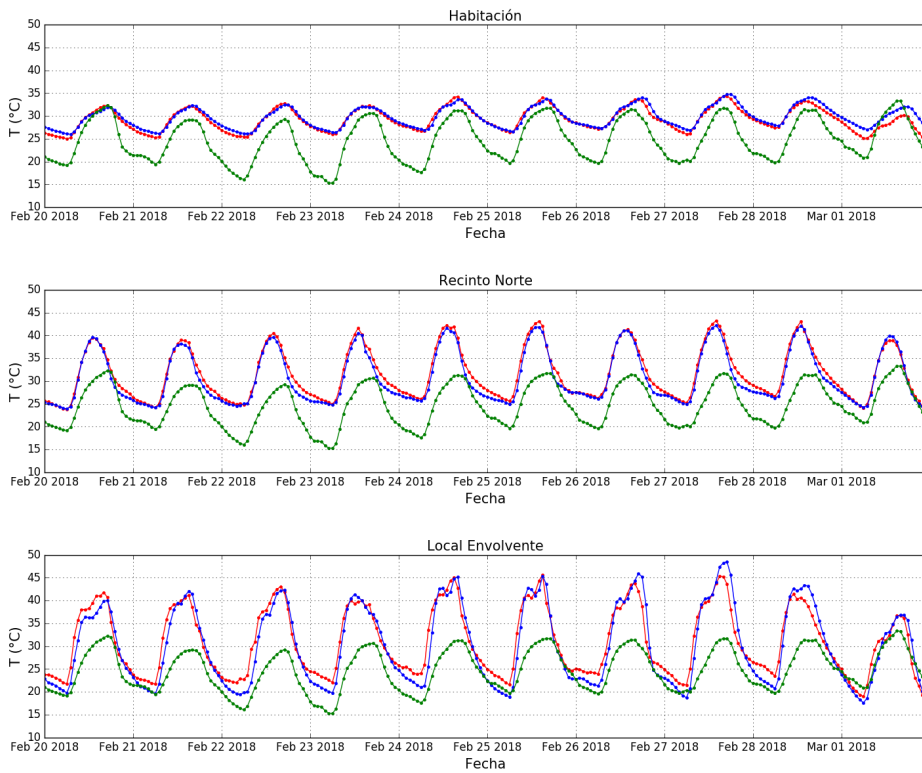


Figura 3.10: Temperatura en función del tiempo para un período de 10 días de la secuencia 9 (persiana durante todo el día). La curva roja representa los datos horarios experimentales, la azul los datos modelados, y la verde la temperatura ambiente exterior.





## Capítulo 4

# Simulación del parque habitacional uruguayo

En este Capítulo se presenta el desarrollo de una herramienta para la evaluación del comportamiento térmico del parque habitacional uruguayo, junto con los principales resultados obtenidos y su análisis. En la Sección 4.1 se describen el proceso de automatización para la realización de las simulaciones de edificios individuales, así como el procesamiento de los resultados obtenidos en dichas simulaciones para obtener los resultados generales del parque habitacional caracterizado en el Capítulo 2. Luego se presentan los resultados obtenidos en dos situaciones, una en la que las viviendas utilizan un sistema de acondicionamiento térmico y otra en la que la condición en el interior evoluciona libremente. Para el primer caso, que se presenta en la Sección 4.2, se obtiene una estimación de los requerimientos energéticos para alcanzar cierto nivel de confort. Para el segundo caso se estiman niveles de disconfort (Sección 4.3). En ambos casos se utilizó la definición de confort adaptativo de ASHRAE 55 detallada en el Capítulo 2. En la Sección 4.4 se presenta el análisis detallado para un caso individual, con el fin de mostrar la incidencia de distintos factores en los requerimientos energéticos, como orientación y alrededores. Finalmente se presentan conclusiones generales del Capítulo en la Sección 4.5.

### 4.1. Automatización

El objetivo es simular la mayor cantidad de modelos de edificios posibles, ya que la cantidad de arquetipos modelados para cada región geográfica y la cantidad de variaciones consideradas en cada arquetipo será determinante en la calidad de los resultados en cuanto a que sean representativos del parque

habitacional uruguayo. Por lo tanto, para viabilizar la ejecución de numerosas simulaciones se procedió a su automatización.

Para manejar el gran número de simulaciones se desarrollaron scripts de Python. Para generar y ejecutar los modelos se utilizó la librería Eppy [49], que está basada en Python y tiene la capacidad de manipular archivos de EnergyPlus. La librería Eppy tiene licencia de código abierto y es un lenguaje de programación desarrollado específicamente para archivos de entrada y salida de EnergyPlus. Permite al usuario realizar numerosos cambios en muchos archivos de entrada de EnergyPlus (IDF), así como leer información de los archivos de salida generados durante la simulación. Por lo tanto, el procesamiento de los resultados fue también automatizado utilizando Eppy en un entorno Python.

Esta metodología se puede utilizar no sólo para construir una herramienta de tipo *Urban Building Energy Model* (UBEM) como en [9, 11] y en el presente proyecto, sino también con otros propósitos como automatizar modificaciones en un único modelo para diferentes análisis. Por ejemplo, Bui et al. [56] utilizaron Python y EnergyPlus mediante Eppy para encontrar el diseño óptimo de las fachadas de dos edificios desde el punto de vista energético. Por otro lado, Glazer y Gard [57] utilizaron la misma metodología pero con el objetivo de estudiar el impacto de aplicar ciertas medidas de eficiencia energética a diferentes modelos de edificios comerciales.

En este trabajo se desarrolló una plataforma de simulación que consiste en una secuencia de funciones de Python, algunas de las cuales interactúan con EnergyPlus mediante Eppy. La plataforma se encarga de todo el proceso de simulación basada en parámetros definidos por el usuario, y basada en la caracterización del parque habitacional y en las hipótesis realizadas respecto al comportamiento de los ocupantes. Esta plataforma es uno de los principales resultados del presente proyecto, por lo que a continuación se presenta una descripción detallada de su desarrollo y sus capacidades. Esto incluye las entradas (inputs) necesarias por la plataforma, el flujo de trabajo y el procesamiento de los resultados.

#### 4.1.1. Entradas

Para que la plataforma ejecute la simulación necesita cierta información de entrada. Parte de esa información es aportada por el usuario, mientras que el resto de la información tiene que estar disponible en varios directorios establecidos en el código. Esta distinción se basa en que hay determinados parámetros que el usuario puede definir dependiendo del objetivo de la simulación, y que modificar dichos parámetros no requiere conocer la estructura del modelo ni

entender el código. Por otro lado, hay información que tiene que ver con la estructura del código, y modificaciones de estas entradas requiere un entendimiento profundo del modelo, y pueden implicar agregar o modificar el código.

Para ejecutar la simulación el usuario debe establecer la cantidad de modelos a simular y para qué arquetipos y regiones. Esto da la flexibilidad de, por ejemplo, analizar un único tipo de edificio, o cierto decil socioeconómico en cierta región geográfica. El usuario debe definir también para qué tipo de ocupante se realizará la simulación, puede ser uno, dos o todos los ocupantes definidos en el Capítulo 2 (P, S y V), y si las simulaciones se deben realizar para viviendas acondicionadas (sistema HVAC incluido) o sin acondicionar (o ambos casos). Por lo tanto, el número de modelos que el usuario define simular para cada ocupante y para cada condición de HVAC ( $N_c$ ) multiplicado por el número de tipos de ocupantes (1, 2 o 3) y por el número de escenarios respecto al uso de HVAC (también 1 o 2) determina el número total de simulaciones a ejecutar.

La información que tiene que ver con la estructura del modelo, y que debe estar disponible localmente en ciertos directorios refiere a los resultados de la caracterización del parque habitacional uruguayo realizado en el Capítulo 2. Específicamente, está la planilla *stockDistribution.csv* que contiene los porcentajes en los que está distribuido el parque habitacional de acuerdo a arquetipos y regiones (Tabla 2.21), junto con las características de cada arquetipo como sus tipos de construcción, cantidad de ocupantes y geometrías posibles. Además están los archivos *geoDistribution.csv* y *departmentsProp.csv* que contienen las probabilidades de una vivienda en cierta zona climática a estar en uno de los departamentos de dicha zona y las características de cada departamento, respectivamente. Estos tres archivos, *stockDistribution.csv*, *geoDistribution.csv* y *departmentsProp.csv*, se encuentran en el material complementario digital de este documento, junto con una versión en formato xlsx que explica su estructura.

Para los datos climáticos se utilizaron archivos climáticos (EPW) generados por Lawrie y Crawley [58] basados en el Año Meteorológico Típico de Uruguay (AMTU) desarrollado por Alonso-Suárez et al. [24]. La excepción es que algunos de los datos de viento fueron reemplazados por mediciones de Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE) como se detalla en el Anexo A, y a dichas mediciones se le aplicó un factor de 0,5 para considerar el efecto de los alrededores (ver Anexo B). Los EPW incluyen también una corrección en los datos de irradiancia solar, debido a que se detectó un desfase entre los datos del AMTU y los datos en el EPW (detalles sobre el desfase horario y su corrección en el trabajo de Gervaz 59, Apéndice C).

Por lo tanto, se cuenta con cinco archivos meteorológicos (EPW) basados en el AMTU [24] que representan el clima de los departamentos según lo presentado en la Tabla 2.7. También hay un archivo IDF (*Template.idf*) que contiene definiciones e información general como parámetros de simulación, materiales de construcción, definiciones de tipos de construcción, cronogramas de ocupación y variables de salida a imprimir. Finalmente, están las 32 geometrías utilizadas para representar el sector residencial (*geomXX.idf*), que se encuentran en el Anexo D.

#### 4.1.2. Estructura del código

El objetivo de esta sección es presentar los aspectos generales de los pasos seguidos en la plataforma para abordar el modelado del parque habitacional uruguayo y estimar sus requerimientos energéticos. Para ello el flujo de trabajo se describe a partir de sus principales funciones y su secuencia lógica.

La metodología distingue entre cinco pasos: definición de los parámetros de simulación, caracterización de los modelos, generación de los modelos, simulación de los modelos y procesamiento de los resultados. El primero se realiza una vez al comienzo de la simulación, mientras que los siguientes cuatro se ejecutan tantas veces como número de modelos se deban simular. En la Figura 4.1 se muestra el flujo de trabajo general con las funciones más relevantes, cada una de las cuales aborda uno de los cinco pasos mencionados.

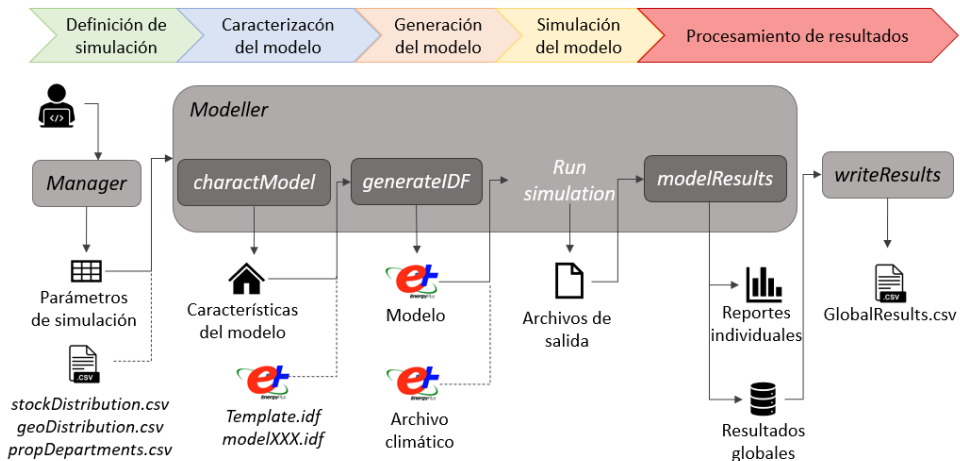


Figura 4.1: Flujo de trabajo de la plataforma.

*Manager* es la función principal y la más general de la plataforma y es la que debe ejecutar el usuario. En esta función se establecen los parámetros de entrada definidos por el usuario previo a la simulación y también otros parámetros que contienen direcciones de archivos y definiciones de modelos que sólo deben modificarse cuando se realizan modificaciones estructurales del código. El propósito de esta función es determinar los parámetros de simulación a partir de las entradas del usuario. Haciendo eso se realiza el primer paso del flujo de trabajo que es la definición de la simulación.

En la Tabla 4.1 se presentan las variables definidas por el usuario que definen cada simulación. Por otro lado, aquellas variables que sólo deben modificarse bajo ciertos cambios estructurales son: dirección de archivos de entrada, lista de todos los posibles tipos de ocupantes, escenarios de acondicionamiento, regiones y arquetipos y también una lista de todos los resultados a extraer de cada simulación.

Tabla 4.1: Variables definidas por el usuario.

Nombre de la variable	Descripción
Nc	Cantidad de modelos a simular para cada escenario de espacios acondicionados y cada tipo de ocupante.
users	Lista detallando el tipo de ocupantes para los que se realizarán las simulaciones.
hvacs	Lista conteniendo los escenarios de espacios acondicionados para los que se realizarán las simulaciones.
archetypes	Lista conteniendo los arquetipos que serán utilizados en las simulaciones.
locations	Lista conteniendo las subregiones que serán utilizadas en las simulaciones.
indivReports	Establece qué reportes se deben realizar, considerando para cada caso y la simulación global o solamente la simulación global

La siguiente función es *Modeller* que es ejecutada desde *Manager*, y es la que gestiona el total de simulaciones, cuya cantidad fue definida en su predecesora. Sus entradas son todos los parámetros establecidos en *Manager*, necesarios para definir la simulación. El objetivo de esta función es establecer la secuencia de tareas para cada escenario y llevar a cabo la caracterización, generación, simulación y extracción de resultados de todos los modelos.

La secuencia lógica de esta función se puede resumir como sigue: para cada región y para cada arquetipo la función llama a *charactModel*, que determina las características del modelo. Luego, para cada tipo de ocupante y escenario de acondicionamiento, se llama a la función *generateIDF*, en la cual se genera

el modelo de EnergyPlus. El siguiente paso es ejecutar la simulación del modelo generado y procesar sus resultados, lo cual se realiza mediante la función *modelResults*. Finalmente, los resultados se guardan para poder ser utilizados después, al generar los reportes globales.

Por lo tanto, para cada arquetipo y región se llama a la función *charactModel* para realizar la tarea de caracterizar el modelo. Esto incluye no sólo leer las características para cierto arquetipo, sino también considerar sus posibles variaciones como la geometría y las características que dependen del departamento (orientaciones posibles, alrededores, número de caras apareadas, etc.). El número de variaciones consideradas impacta en la precisión de la representación del arquetipo. Sin embargo, cuanto más variaciones se consideren, más simulaciones se deben generar y simular para ese arquetipo, y por lo tanto mayor será el tiempo requerido. Entonces, como un compromiso entre precisión y costo computacional, la cantidad de variaciones consideradas para cada arquetipo y región es determinada distribuyendo el total de simulaciones que se desean simular ( $N_c$ ) entre los arquetipos y regiones de acuerdo al porcentaje establecido en *stockDistribution.csv*. Haciendo eso, las combinaciones más predominantes de arquetipo y región son de las que se simularán más variaciones, por lo que se tendrá un mejor representación de aquellos casos cuyos resultados tendrán un mayor impacto.

Entonces, dado un  $N_c$ , la función calcula de *stockDistribution.csv* el número de simulaciones a realizar para cada arquetipo y en cada región. Por ejemplo, el arquetipo que representa casas entre 40 y 70 m<sup>2</sup>, más de 30 años de antigüedad y deciles socioeconómicos 1-4 en Montevideo corresponde a un 3,69 % en la Tabla 2.21. Por lo tanto, para  $N_c=300$ , se simularán 11 modelos para este arquetipo en esta región. Luego, las características comunes para este arquetipo que se repetirán en los 11 modelos (materiales, cantidad de ocupantes, etc.) se extraen de la Tabla *stockDistribution.csv*. También las posibles geometrías son extraídas, y se asignan a cada modelo. Luego, en el caso de las zonas que aglomeran varios departamentos, un departamento es designado de manera aleatoria a cada modelo siguiendo los valores de probabilidad definidos en *geoDistribution.csv*. Finalmente, las características que dependen del departamento son definidas de manera aleatoria de acuerdo con las probabilidades establecidas para el departamento en cuestión que se leen en *departments-Prop.csv*.

De esta manera, las salidas de *charactModel* son el número de modelos a generar para cada arquetipo y región, junto con todas sus características. Esta información finaliza el paso de caracterizar los modelos y permite la generación de los mismos, que se realiza en la función *generateIDF*. Esta función genera un

archivo IDF para cada uno de los modelos a simular, basado en las características definidas previamente. Las entradas requeridas para cumplir esta tarea son las características de los modelos, el archivo de la geometría correspondiente (*geomXX.idf*) y la plantilla para el IDF (*Template.idf*), de la cual los objetos que contienen información general son extraídos.

El siguiente paso en la secuencia lógica de la plataforma es la simulación del modelo y es llevada a cabo por la función *Modeller*, utilizando el modelo generado de EnergyPlus en *generateIDF*, y el correspondiente archivo climático. Una vez que la simulación finaliza, la función *modelResults* procesa los resultados de cada modelo y elabora los reportes individuales, y además almacena los resultados promediados para cada arquetipo y región. Finalmente, *writeResults* genera un archivo en formato CSV con los resultados globales.

### 4.1.3. Salidas

Todos los archivos IDF generados, junto con sus reportes individuales se almacenan luego de simular cada modelo. El archivo IDF tiene toda la información correspondiente al caso: geometría, materiales, construcciones, cronogramas, cargas internas, sistema HVAC si corresponde, variables de salida, entre otras; y por lo tanto podría ejecutarse manualmente si fuera de interés. Además, los reportes individuales contienen gráficos que presentan los resultados más relevantes, los cuales son generados si así lo define el usuario. El propósito de estos reportes es permitir al usuario estudiar cualquier caso individualmente, y analizar la contribución relativa de cada término en el balance de energía al aire.

Los gráficos con los resultados individuales incluyen aquellos presentados en el Capítulo 3. Entre estos se encuentran las pérdidas y ganancias de calor por la envolvente de los edificios, por las ventanas y también debidas a las infiltraciones y ventilación natural. Además se presentan las temperaturas medias mensuales para cada zona en el edificio, así como los requerimientos de calefacción y refrigeración mensuales para los casos en que se incluye sistema HVAC. Respecto a la transferencia de calor por la envolvente del edificio, se la presenta distinguiendo entre transferencia por el piso, por las paredes y por el techo, y para el caso de las ganancias de calor, se distinguen las ganancias solares de otros tipos de ganancias. Por otro lado, las ventanas del edificio se dividen de acuerdo a su orientación, y para analizar la transferencia de calor a través de ellas se distingue la radiación solar transmitida de otras ganancias.

Para cada caso se genera un archivo de texto donde se resumen las características principales del modelo para que el usuario pueda analizar los resultados de una manera más sencilla. Estas características incluyen: tipo (casa o apar-

tamento), piso (si aplica), tamaño, decil y antigüedad, región, departamento, geometría, tipo de ocupante (P, V o S), sistema HVAC, presencia de árboles o edificios generando sombra, cantidad de fachadas apareadas y la orientación del edificio. Se incluye también cierta información geométrica como el área de la envoltura, cantidad de zonas térmicas en el modelo y área de las ventanas agrupadas por orientación.

Finalmente, se tiene *GlobalResults.csv* que incluye los resultados globales anuales para cada tipo de ocupante y para cada condición de HVAC. Estos resultados se agrupan y promedian de acuerdo al arquetipo y región. Estos incluyen todos los resultados identificados como relevantes en el Capítulo 3. Además, se promedian para cada arquetipo y región características como transmitancia, porcentaje de casos apareados, área vidriada, porcentaje de área vidriada, área ocupada, etc. Estos resultados también se incluyen en *GlobalResults.csv* ya que pueden ser útiles para en el análisis de los resultados. Luego, a partir del total de edificios en cada combinación de arquetipo y región (de *totalOccupied.csv*, ver material complementario de este documento), se determinan resultados para el total del sector residencial para cada tipo de ocupante y condición de HVAC.

Por lo tanto, este archivo contiene la información necesaria para determinar requerimientos de energía para alcanzar confort térmico, así como una medida de lo alejado que se encuentra del confort si no se acondicionan las viviendas. Estos resultados se pueden diferenciar por región, deciles o características de los edificios. Esto permite identificar las acciones y estrategias más convenientes para la mejora del comportamiento energético en distintas viviendas a nivel nacional.

#### 4.1.4. Análisis de convergencia

La plataforma desarrollada durante este proyecto permite al usuario definir el número de simulaciones que pretende ejecutar para cada tipo de usuario y para cada condición de HVAC ( $N_c$ ). Este número de simulaciones impactará en los arquetipos simulados para cada región, y también en el número de modelos simulados para cada arquetipo y región, y por lo tanto en cuántas variaciones del arquetipo se consideren realmente (orientaciones, alrededores y geometrías). Esto significa que, dado el valor de  $N_c$ , las combinaciones de arquetipo y región con menor prevalencia pueden no ser modelados, y para las que sí sean modeladas puede que en algunos casos se realice un número muy pequeño de variaciones pudiendo tener una mala representatividad.

Dado que los resultados globales se obtienen extrapolando los resultados obtenidos para una muestra del parque habitacional, cuanto mayor sea el valor



de  $N_c$  definido más representativos serán los resultados. Por otro lado, el costo computacional de la simulación es directamente proporcional al número  $N_c$ . En ese sentido y para evitar esfuerzos computacionales desmedidos se realizó un análisis de convergencia de los resultados en función del número  $N_c$ , para encontrar un número aceptable que bajo las hipótesis realizadas entregue resultados globales representativos.

Para ello se realizaron simulaciones para el usuario P y considerando viviendas con sistema HVAC, para valores de  $N_c$  de 6, 38, 87, 192, 295, 496 y 992<sup>1</sup>. Además, y dado que ciertas características de los modelos se definen de acuerdo a probabilidades (geometría, departamento, archivo climático, orientación, etc.), para cada valor de  $N_c$  la simulación se repitió tres veces para evaluar la variabilidad de los resultados.

Los resultados de requerimiento anual extrapolados para todo el parque habitacional en función del valor de  $N_c$  se presentan en la Figura 4.2. Además, los mismos resultados pero diferenciando requerimientos de refrigeración y calefacción se presentan en la Figura 4.3.

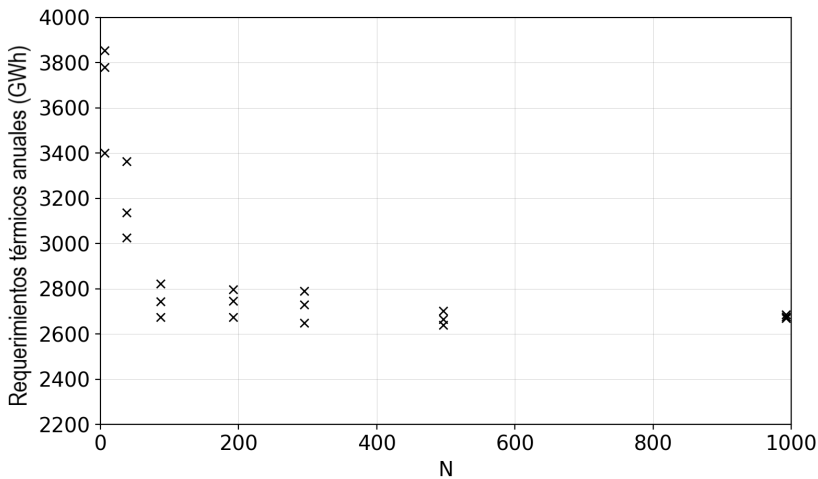
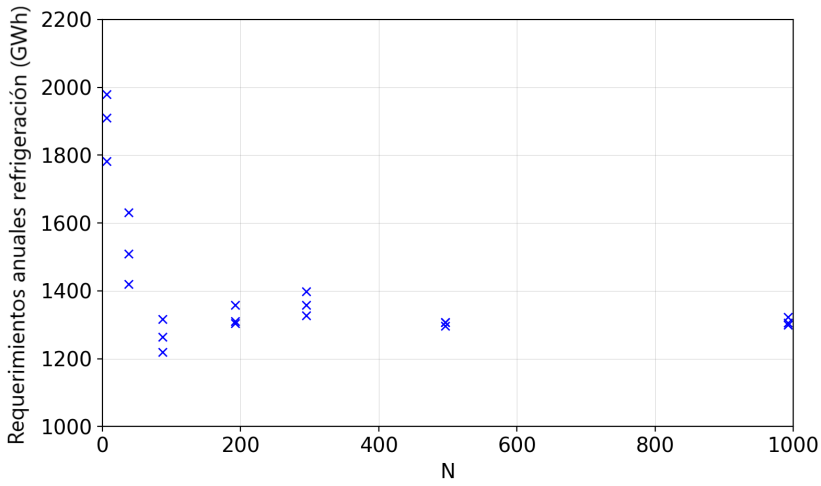


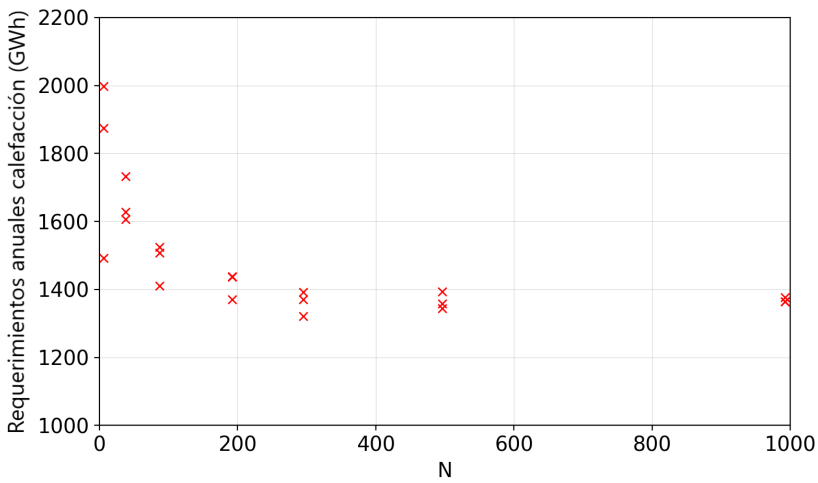
Figura 4.2: Convergencia con  $N$  para un ocupante eficiente de los requisitos térmicos anuales globales.

En los tres gráficos se observa que para valores pequeños de  $N_c$ , los resultados son sobrestimados, y que a partir de  $N_c = 192$  se observa que los valores han convergido. Además, se puede observar que la dispersión de los resultados

<sup>1</sup>Con el objetivo de minimizar el tiempo de cómputo, estas simulaciones se realizaron sin procesar los resultados individuales.



(a) Refrigeración.



(b) Calentamiento.

Figura 4.3: Convergencia con  $N$  para un ocupante eficiente, distinguiendo los requisitos de calefacción y refrigeración anuales globales.

disminuye con el valor de  $N_c$ . Debido a esto, se define utilizar un valor de  $N_c = 296$ , para minimizar el alto costo computacional ya que la simulación será repetida varias veces para evaluar el impacto de posibles mejoras.

## 4.2. Resultados de requerimientos energéticos

Se presentan en la Tabla 4.2 los valores obtenidos de requerimientos energéticos para acondicionamiento térmico del sector residencial uruguayo. Estos resultados son asumiendo ocupantes eficientes (usuario P).

Tabla 4.2: Requerimiento térmico anual.

Refrigeración (GWh)	Calefacción (GWh)	Total (GWh)
1296	1345	2641

Dado que estos resultados representan requerimiento térmico y no demanda de energía, verificar si son valores cercanos a la realidad es una tarea compleja, y ciertamente impracticable con los datos disponibles. Sin embargo, con el fin de chequear su orden de magnitud se utilizaron los datos preliminares del Balance Energético Nacional (BEN) del 2019 [60]. En dicho informe se establece que en el sector residencial se utilizaron 3328GWh para calefacción con madera o carbón. Asumiendo un 30 % de eficiencia en su conversión en energía útil, este consumo resulta en 998GWh de energía útil.

Por otro lado, en la Encuesta Continua de Hogares (ECH) del 2019 [61] se especifica que el 90 % de las viviendas uruguayas usan sistemas de calefacción y que el 43 % utiliza aires acondicionados. Por lo tanto hay un 47 % de viviendas que usan otros sistemas de calefacción. Asumiendo que todos estos utilizan madera o carbón, y que se utiliza todo para calefacción, resultaría en una demanda de  $998/0,47 = 2123\text{GWh}$ . Teniendo en cuenta que este valor es una aproximación muy gruesa debido a las suposiciones realizadas, y que las cargas de calefacción de la Tabla. 4.2 son para ocupantes cuyos requerimientos se calculan de acuerdo al confort adaptativo y que hacen un uso ideal de la apertura de ventanas para ventilación y de las protecciones solares, los resultados parecen razonables.

Es importante resaltar que los resultados presentados corresponden a los requerimientos energéticos del sector residencial uruguayo para acondicionamiento térmico basados en la caracterización del parque habitacional realizada, para un año meteorológico típico y bajo las hipótesis de uso de las viviendas y de criterios para acondicionar. Se observa que aunque las cargas de calefacción son mayores a las de refrigeración, son muy similares, al menos para todo el país. Diferencias entre regiones y deciles socioeconómicos se analizarán en las secciones siguientes.

En el presente trabajo los requerimientos energéticos se calculan teniendo en cuenta que se acondicionan sólo áreas ocupadas (y sólo durante las horas

en que están ocupadas). Debido a esto es interesante presentar los resultados relativos al área ocupada, que corresponde al área de las salas de estar y los dormitorios que se utilizan según la cantidad de habitantes de la vivienda. Esto debido a que en las viviendas más grandes, por como se definió la ocupación, el porcentaje de área que se utiliza (y por ende que se acondiciona térmicamente) puede ser bastante bajo y los resultados relativos al área total de la vivienda no servirían para caracterizarla desde el punto de vista de su diseño y construcción. Además, y dado que las casas y apartamentos se suelen comportar de maneras muy diferentes, los resultados también se presentan distinguiendo entre ambos casos como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Requerimientos térmicos anuales relativos al área ocupada.

<b>Tipo</b>	<b>Refrigeración (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Calefacción (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Total (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>A<sub>ocup</sub>/A<sub>tot</sub> (%)</b>
Casa	32,6	33,4	66,0	73,2
Apartamento	20,5	14,2	34,7	64,7
Total	30,9	30,6	61,5	71,9

De la Tabla 4.3 se puede notar que los apartamento se comportan notoriamente mejor que las casas ya que sus requerimientos son casi la mitad. Se comportan mejor tanto para calefacción como refrigeración, siendo la diferencia más pronunciada para calefacción (en cuyo caso la demanda de apartamentos es del orden del 40% respecto de la de casas). Otra diferencia entre los dos tipos de viviendas es el tamaño de área ocupada relativo al total; el cual es mayor en casas. Esta diferencia puede explicarse al analizar cómo los deciles socioeconómicos considerados se distribuyen en los tipos de vivienda (ver Figura 4.4). Sabiendo que la distribución de tamaños de viviendas es la misma para ambos tipos de vivienda (20% menos de 40m<sup>2</sup>, 40% entre 40m<sup>2</sup> y 70m<sup>2</sup> y 40% más de 70m<sup>2</sup>) y considerando las diferencias en número de residentes para los diferentes deciles (menor cantidad para los deciles más altos), es claro que los apartamentos tendrán, en promedio, menos ocupantes. Por lo tanto, dado que los dormitorios estarán ocupados o no dependiendo del número de residentes, en apartamentos se tendrá menos área ocupada que en casas.

Por lo tanto, si los resultados se presentaran como requerimientos energéticos por vivienda (no relativo al área ocupada), las diferencias en el comportamiento térmico de casas y apartamentos serían aún mayores. Sin embargo, si los resultados se analizaran relativo al número de ocupantes (lo cual representaría la cantidad de energía que requeriría cada persona para estar en confort) las diferencias serían menores (ver Tabla 4.4), especialmente para requerimientos

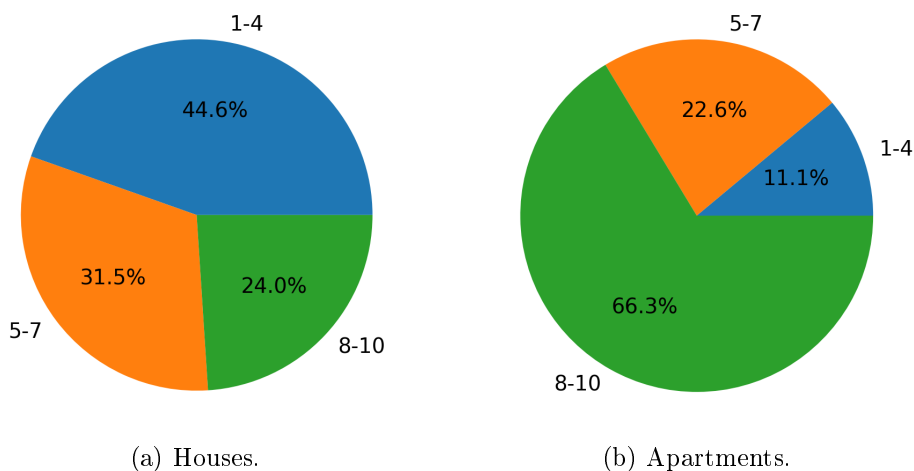


Figura 4.4: Distribución de deciles para tipos de vivienda.

de refrigeración, que terminan siendo muy similares. En cualquier caso, los apartamentos presentan menores requerimientos en general.

Tabla 4.4: Requerimientos térmicos anuales relativos a la cantidad de ocupantes.

Type	Refrigeración (kWh/person)	Calefacción (kWh/person)	Total (kWh/person)	Occupants
House	380,0	493,2	873,3	3,2
Apartment	361,7	261,4	623,1	2,3
Total	377,4	459,8	837,2	3,1

El hecho de que los apartamentos requieran menos energía se debe principalmente a las diferencias en porcentaje de área expuesta. Mientras que en las casas es en promedio un 87 %, en apartamentos es un 32 %. Además, basado en el impacto que el decil socioeconómico tiene en las calidades de la construcción, la prevalencia de decil en cada tipo de vivienda también contribuye a que los requerimientos en apartamentos sean menores que en casas.

Un aspecto final a señalar es que los requerimientos globales totales presentados en la Tablas 4.3 y 4.4 son muy similares a aquellos calculados para casas. Esto se debe a que las casas representan un 85 % de las viviendas del parque habitacional uruguayo.

A continuación se analizan los resultados obtenidos desagregados por las características más relevantes de las viviendas.

### 4.2.1. Desagregados por región

En primera instancia los resultados obtenidos fueron desagregados por región, los mismos se presentan en la Figura 4.5. Se puede observar que Montevideo representa la mayor parte de las edificaciones residenciales, y consecuentemente, también de los requerimientos energéticos para acondicionamiento. Luego se tienen S-SE y SO-Centro-NE con cantidades similares de viviendas. Sin embargo, mientras que para Montevideo y S-SE sus requerimientos son menores en proporción a su número de viviendas, lo opuesto es cierto para N-NO y S-Centro-NE (ver Figura 4.5a). Esto puede ser explicado a partir de la Figura 4.5b, donde se observan las demandas de energía relativas al área ocupada. En este caso, los resultados relativos a la cantidad de ocupantes presentan las mismas diferencias entre regiones dado que los tamaños y deciles de viviendas están distribuidos de manera uniforme entre regiones.

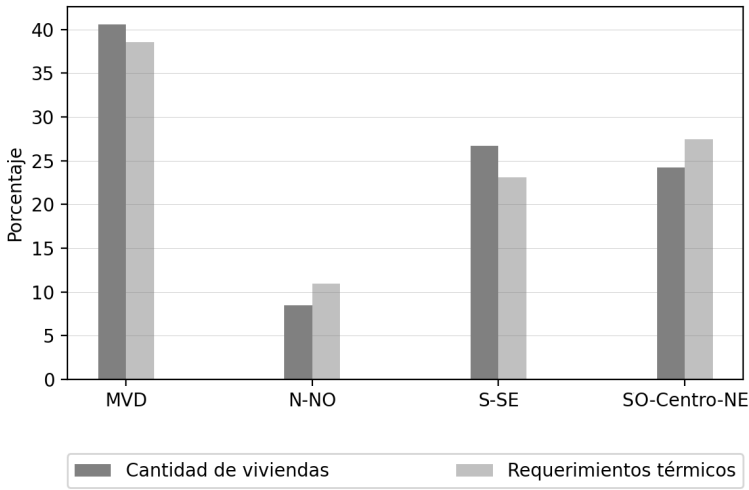
De la Figura 4.5b, se puede observar que la demanda total de Montevideo y la de S-SE son menos de  $60\text{kWh/m}^2$ , mientras que para N-NO es alrededor de  $80\text{kWh/m}^2$  y para SO-Centro-NE es aproximadamente  $70\text{kWh/m}^2$ . Para el caso de N-NO la diferencia se debe a los requerimientos de refrigeración que son el doble que en otras regiones. Por otro lado, SO-Centro-NE tiene mayores requerimientos tanto para refrigeración como calefacción que Montevideo y S-SE; aunque las diferencias son mucho más sutiles que para N-NO.

Las cargas de refrigeración y calefacción de la Figura 4.5b son coherentes con las diferencias en las temperaturas medias de la Tabla 4.5 (y también con los mapas de radiación solar y de viento de la Figura 2.4). Las temperaturas medias para cada región se determinaron basados en los archivos climáticos (EPWs) utilizados en este proyecto. Nótese que la región SO-Centro-NE tiene la mayor amplitud de temperatura, teniendo la segunda mayor temperatura media en la temporada de refrigeración y la menor en la de calefacción. Esto explica el porqué de que ambos requerimientos, calefacción y refrigeración, son mayores en esta región que, por ejemplo, para Montevideo.

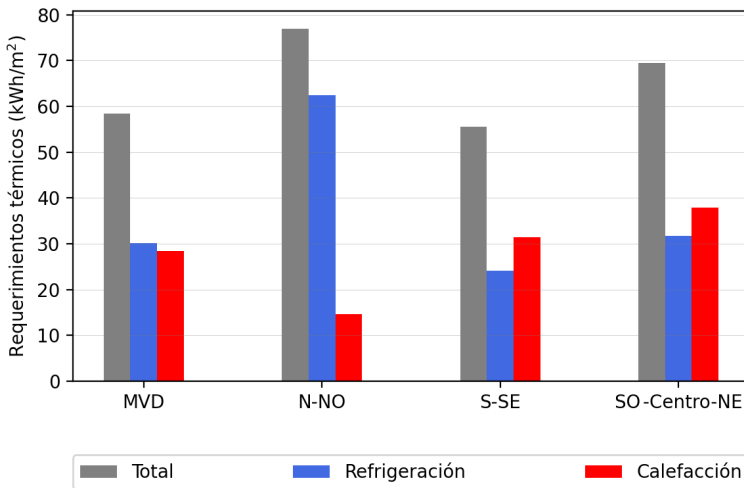
Tabla 4.5: Temperatura media de las regiones.

	Temperatura media (°C)			
	MVD	N-NO	S-SE	SO-Centro-NE
Período de refrigeración	21,7	25,4	21,5	23,1
Período de calefacción	10,8	13,7	11,0	10,7

El 88% de los apartamentos de Uruguay se ubican en Montevideo, debido a esto los apartamentos representan un 33% de las viviendas en dicha región, mientras que para el resto del país representan sólo un 3,3%. En las



(a) Distribución de viviendas y requerimientos por región.



(b) Requerimientos de Calefacción y Refrigeración por región.

Figura 4.5: Requerimientos desagregados por región.

simulaciones realizadas en este proyecto los apartamentos muestran un mejor comportamiento térmico que las casas, por lo que esto puede ser una de las razones por las cuales los requerimientos en Montevideo son menores que en N-NO y SO-Centro-NE. Si se consideran solo las casas, los requerimientos térmicos en Montevideo crecen de  $57,1 \text{ kWh/m}^2$  a  $68,4 \text{ kWh/m}^2$ . De esta forma,

sólo considerando casas, Montevideo sigue teniendo menores requerimientos que N-NO y SO-Centro-NE (aunque muy cercano a este último), pero mayor que S-SE.

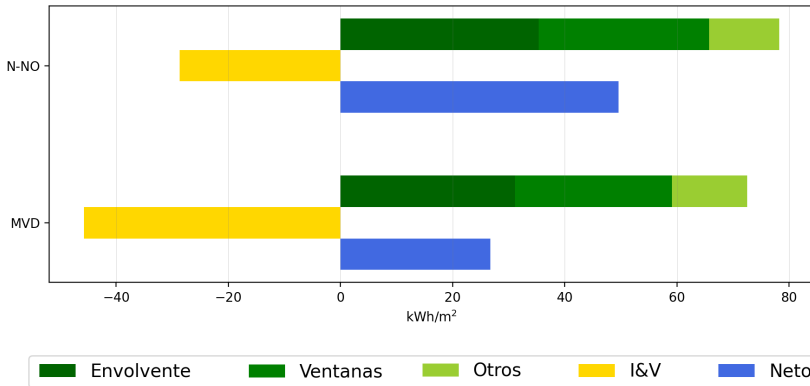
Con el fin de comparar las diferencias entre regiones y al mismo tiempo identificar las principales causas de los requerimientos, se presentan en la Figura 4.6 las ganancias y pérdidas de calor a través de los diferentes componentes durante los períodos de calefacción y refrigeración definidos en este trabajo para las regiones Montevideo y N-NO. Para realizar la comparación se seleccionaron estas regiones ya que presentan requerimientos muy diferentes tanto de calefacción como refrigeración. Además, para evitar las diferencias debido al comportamiento de los apartamentos y poder enfocar en el análisis en las características de las regiones, sólo se consideraron las casas.

Las categorías en que se distinguen ganancias y pérdidas en la Figura 4.6 son “Envolvente” que incluye el calor transferido por las paredes, techo y piso, “Ventanas” que considera la radiación solar transmitida y la transferencia de calor por el vidrio y los marcos, “I&V” que representan las cargas por infiltraciones y ventilación natural y “Otras” que incluye las ganancias internas debido a los ocupantes, iluminación y equipos. Además, la categoría “Envolvente” se puede separar en “Paredes”, “Techo” Y “Piso” las cuales además se pueden separar (para paredes y techo), entre ganancia solar y otras (como radiación de longitud de onda larga y convección). La categoría “Ventanas” por otro lado, también puede dividirse para cuantificar por separado la radiación solar transmitida y el intercambio neto a través del vidrio y del marco.

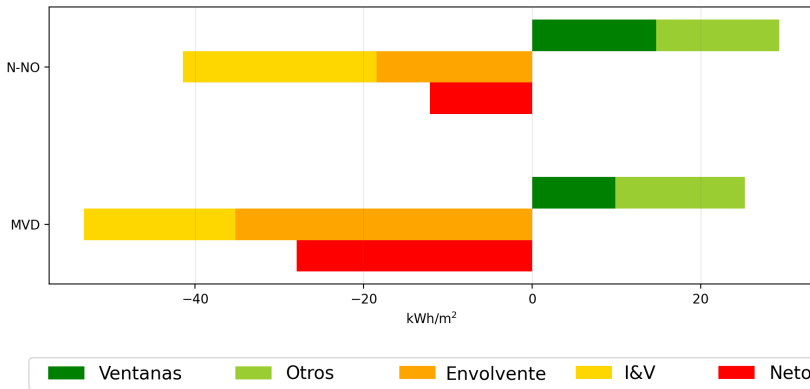
Los mayores requerimientos que se observan en la región N-NO durante el período de refrigeración se explican por mayores ganancias y por menores pérdidas como se observa en la Figura 4.6a. Lo mismo ocurre para Montevideo durante el período de calefacción ya que se tienen mayores pérdidas y menores ganancias que en N-NO, lo que explica que los requerimientos de calefacción sean más elevados en dicha región. Estas diferencias también están relacionadas con las temperaturas medias de las regiones, GHI y velocidad de viento (ver la Tabla 4.5 y las Figuras 2.4a y 2.4b). En la región N-NO se tienen mayores valores de irradiación y temperatura, lo que repercute en mayores ganancias que en Montevideo, mientras que debido a las mayores velocidades de viento que se tienen en Montevideo se tienen mayores pérdidas por infiltración y ventilación natural.

Para las ventanas, se observa que aún durante el período de calefacción estas tienen un efecto neto de ganancias de calor tanto en la región N-NO como en MVD (aunque con mayor incidencia en la primera). Esto es debido a que la radiación solar incidente es mayor que las pérdidas totales a través del





(a) Período de refrigeración.



(b) Período de calefacción.

Figura 4.6: Ganancias y pérdidas de calor por zonas en los períodos considerados.

vidrio y marco. Este efecto podría ser diferente en caso de un mal uso de las protecciones solares (no activarlas en períodos nocturnos, por ejemplo).

Considerando el período de refrigeración, por la envoltente se dan las mayores ganancias netas en ambas regiones y valen  $38 \text{ kWh/m}^2$  en N-NO contra  $32 \text{ kWh/m}^2$  en Montevideo. De esos  $38 \text{ kWh/m}^2$ , hay  $34 \text{ kWh/m}^2$  que se ganan a través del techo,  $9 \text{ kWh/m}^2$  por las paredes y hay  $5 \text{ kWh/m}^2$  de pérdidas por el piso. Por lo tanto la contribución mayor a las ganancias por la envoltente en N-NO se dan por el techo y se deben a la radiación solar absorbida.

Además, dado que el ocupante P sólo toma ventaja de la ventilación natural cuando la temperatura operativa está en el rango de confort (ya que en caso contrario utiliza HVAC), las mayores temperaturas exteriores e irradiación solar en N-NO generan que la temperatura interna esté menos tiempo en el rango de confort y, debido a esto, que se tenga menos tiempo de ventilación natural. Esto, combinado con menores velocidades de viento, resultan en menores pérdidas de calor debido a infiltraciones y ventilación natural.

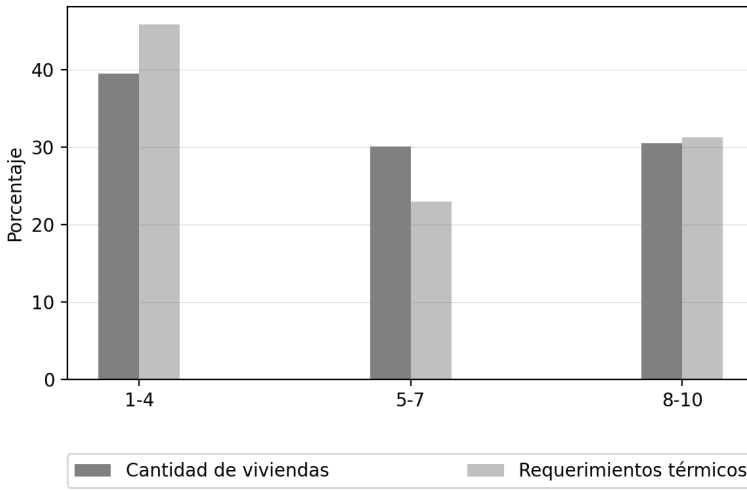
Durante el período de calefacción, en Montevideo las mayores pérdidas de calor también se dan por la envolvente y son  $36 \text{ kWh/m}^2$ , mientras que en N-NO son  $20 \text{ kWh/m}^2$ . Esta diferencia también se debe a que la radiación solar absorbida en paredes y techo, ya que en N-NO es un 34% mayor que en Montevideo. En este caso, que en N-NO se tengan mayores pérdidas de calor debido a infiltraciones y ventilación natural indican que durante el período de calefacción las ventanas permanecen más tiempo abiertas en la región N-NO.

#### 4.2.2. Desagregados por decil socioeconómico

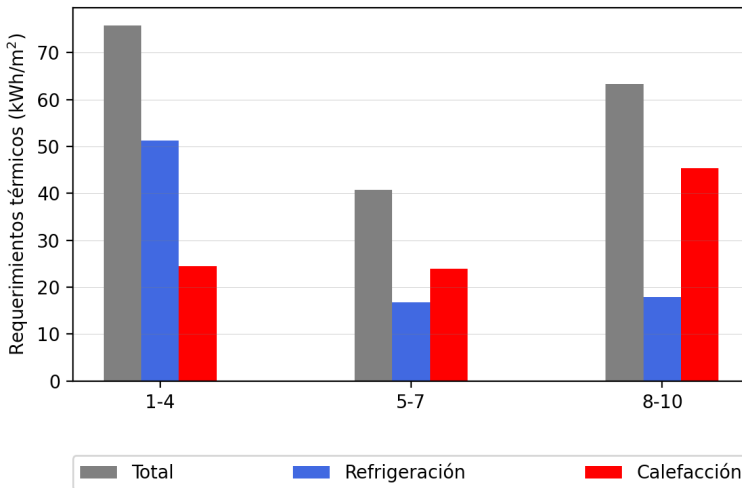
Además de entre regiones, los resultados se pueden analizar distinguiendo entre deciles socioeconómicos de los ocupantes de las viviendas. Las diferencias en este caso están relacionadas con variaciones en los materiales constructivos, cantidad de ocupantes y porcentaje de área ocupada. La comparación entre las proporciones de cada categoría en términos de cantidad de viviendas y de requerimientos energéticos para todo el país se puede encontrar en la Figura 4.7, junto con los requerimientos térmicos de las categorías relativos al área ocupada.

En la Figura 4.7a se puede observar que la mayor proporción en cantidad de viviendas y también en requerimientos energéticos corresponden a los deciles 1-4. El resto de viviendas se distribuye equitativamente entre los otros dos rangos de deciles, pero los requerimientos energéticos no, siendo mayores los correspondientes a los deciles 8-10. El único rango de deciles con menor porcentaje en requerimientos que en número de viviendas es el 5-7. Los deciles socioeconómicos altos (8-10) requieren energía casi en la misma proporción que su número de viviendas y los deciles bajos (1-4) requieren mayor proporción de energía.

Estas diferencias quedan claras también en la Figura 4.7b donde se presentan los requerimientos térmicos relativos al área ocupada. Mientras que para deciles 1-4 se tiene el mayor requerimiento, los deciles 5-7 tienen los menores. Es más, cuando se distingue entre calefacción y refrigeración se evidencia que los deciles 1-4 tienen requerimientos elevados debido a las cargas de refrigeración, mientras que lo opuesto es cierto para los deciles 8-10.



(a) Porcentaje de viviendas y de requerimientos por rango de deciles.

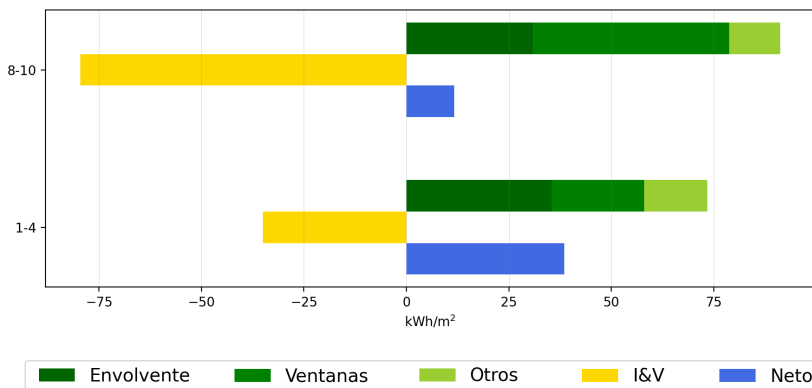


(b) Requerimientos de calefacción y refrigeración por rango de deciles.

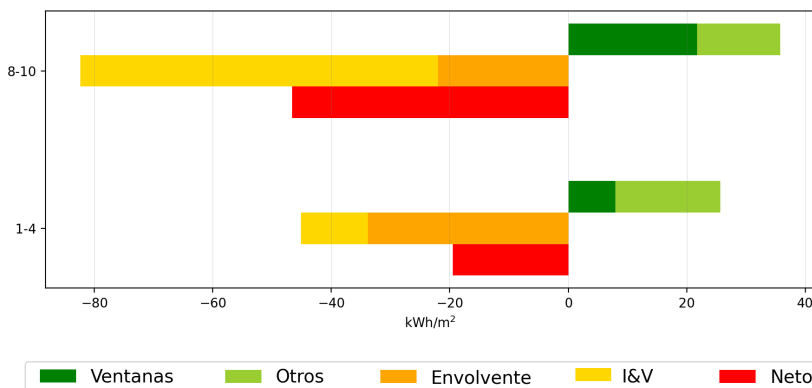
Figura 4.7: Requerimientos para todo el país desagregados por deciles.

Siguiendo el mismo procedimiento que para las regiones, se analiza la contribución de los distintos componentes para interpretar las diferencias entre los rangos de deciles socioeconómicos más bajos (1-4) y los más altos (8-10). Las ganancias y pérdidas durante los períodos de refrigeración y calefacción para

los deciles 1-4 y 8-10 se presentan en la Figura 4.8. Nuevamente el análisis se limita a las casas para aislar el efecto de los deciles.



(a) Período de refrigeración.



(b) Período de calefacción.

Figura 4.8: Ganancias y pérdidas de calor por nivel socioeconómico en los períodos considerados.

En las Figuras 4.8a y 4.8b se puede observar una gran diferencia en las ganancias por las ventanas y en pérdidas por infiltraciones y ventilación entre ambos rangos de deciles y para los dos períodos. Esto se debe a la diferencia que hay en el área vidriada para cada rango: mientras que para deciles 1-4 el área vidriada promedio es  $5,9 \text{ m}^2$ , en los deciles 8-10 es de  $13,5 \text{ m}^2$ . Por el contrario, las ganancias internas (que se incluyen en la categoría “Otros”) son

mayores para los deciles 1-4 durante ambos períodos. Esto se debe a que en esos deciles se tiene más ocupantes para todos los tamaños de casas.

Otra diferencia importante entre rangos de deciles es la proporción de área ocupada, la cual es 84,8% en los deciles 1-4 y 50,9% en los deciles 8-10. En las Figuras 4.8a y 4.8b se presentan la contribución a las ganancias y pérdidas totales a través de cada componente expresados relativos al área ocupada para ambos rangos. Los valores más elevados que se observan para los deciles 8-10 se deben, por ejemplo, a una mayor envolvente para la misma área ocupada.

Para el período de refrigeración se observa que los deciles 1-4 tienen menores ganancias pero también menores pérdidas de calor, lo que resulta en una ganancia neta de energía de 38 kWh/m<sup>2</sup> contra una ganancia neta de 12 kWh/m<sup>2</sup> en los deciles 8-10. La principal contribución en los deciles 1-4 es la envolvente (36 kWh/m<sup>2</sup>), y dentro de la envolvente las ganancias por el techo. El hecho de que los deciles 1-4 tengan mayores ganancias por la envolvente que los deciles 8-10 indica la diferencia en la calidad de las construcciones, más aún considerando que para esos deciles el tamaño de la envolvente relativo al área ocupada es menor. Como se puede ver en la Tabla 2.28 y en las Tablas C.1 a C.4 del Anexo C, las construcciones de los deciles 1-4 tienen mayor transmitancia y absorptividad solar.

Estas diferencias en ganancias de calor también impactan en las pérdidas por infiltración y ventilación. Al igual que se analizó para regiones, mayores ganancias en los deciles 1-4 generan mayores temperaturas operativas, lo que produce que los ocupantes hagan un menor uso de la ventilación natural a costa de mayor requerimiento de HVAC para alcanzar el confort. Esto, combinado con que los deciles 1-4 presentan menor área vidriada, resulta en menores cargas debido a infiltración y ventilación natural.

Durante el período de calefacción, los deciles 8-10 también tienen mayores ganancias y pérdidas que los deciles 1-4 (debido a la diferencia en el porcentaje de área ocupada), pero en este caso significa mayor pérdidas netas de energía relativo al área ocupada. La fuente principal de pérdidas de calor en los deciles 8-10 son las debido a infiltraciones y ventilación natural. Una vez más, las diferencias constructivas de la envolvente son claras, ya que los deciles 1-4 tienen un 60% más de pérdidas por la envolvente con menos área.

A diferencia que para las regiones, al analizar los resultados desagregados por deciles, la decisión de expresar los resultados relativos al área total, al área ocupada o al número de ocupantes tiene mucho impacto. Hasta ahora, todo el estudio sobre los patrones de energía para los deciles se basó en los requerimientos relativos al área ocupada. Sin embargo, si los resultados se expresan como energía por ocupante, la Figura 4.7 se convierte en la Figura 4.9.

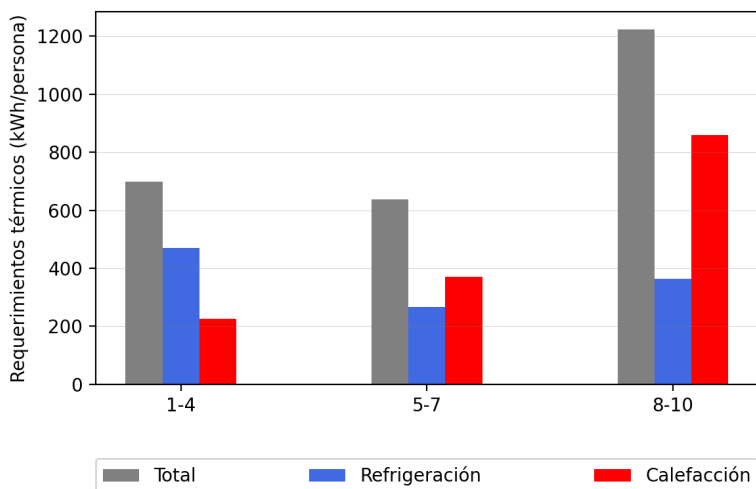


Figura 4.9: Requerimientos de calefacción y refrigeración por ocupante desagregado por deciles.

Una persona de los deciles 8-10 requiere, en promedio, 1223 kWh cada año para mantener el confort térmico, mientras que una persona en los deciles 1-4 requiere 698 kWh; y esto es a pesar de que las viviendas de los deciles 8-10 son constructivamente de mayor calidad. Una vez más los menores requerimientos son para los deciles 5-7 con 639 kWh por ocupante en un año. Estos resultados son muy diferentes que los presentados en la Figura 4.7b, donde los deciles 1-4 presentan los mayores requerimientos. Por lo tanto, la base relativa a la cual se presentan los resultados debe ser elegida cuidadosamente en función del análisis que se desee realizar.

Continuando con el análisis relativo al área ocupada, los resultados obtenidos para cada decil pueden separarse de acuerdo a la antigüedad de la vivienda. De esta manera, se pueden identificar los segmentos con mayor potencial de mejora. Por ejemplo, la contribución de energía durante el período de refrigeración para las casas más antiguas y las más modernas en los deciles 1-4 se presentan en la Figura 4.10. Las ganancias netas en casas construidas hace más de 30 años son un 84 % mayores que en las casas más nuevas durante el período de refrigeración. La mayor diferencia se da en las ganancias por la envolvente, debido a las diferencias entre los materiales constructivos, en particular en el techo.

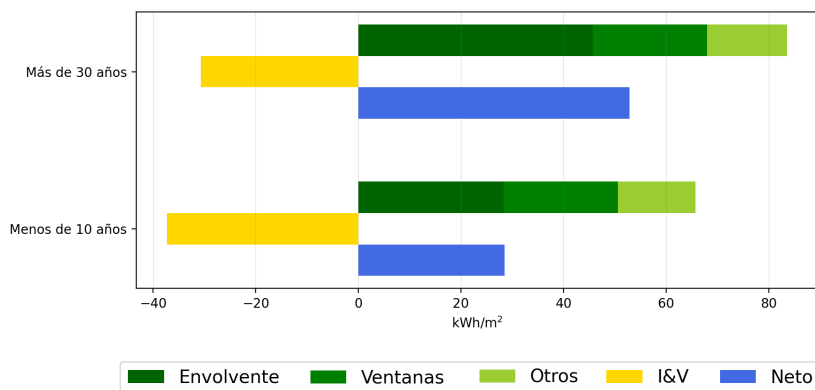


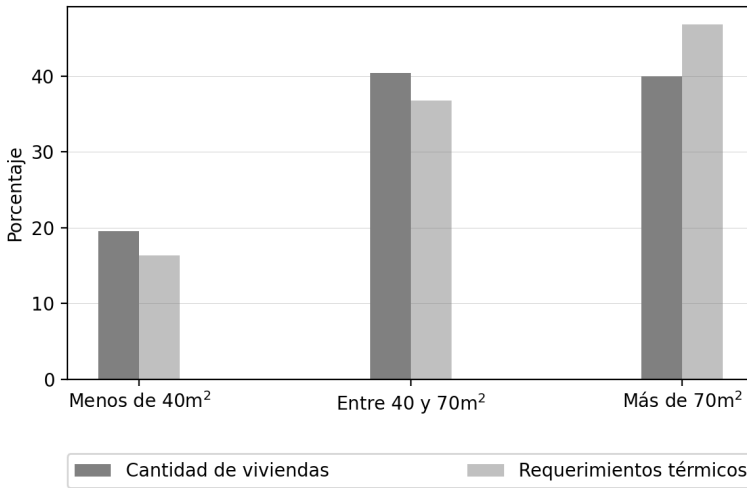
Figura 4.10: Ganancias y pérdidas de calor por antigüedad durante el período de refrigeración en los deciles 1-4.

### 4.2.3. Desagregados por tamaño

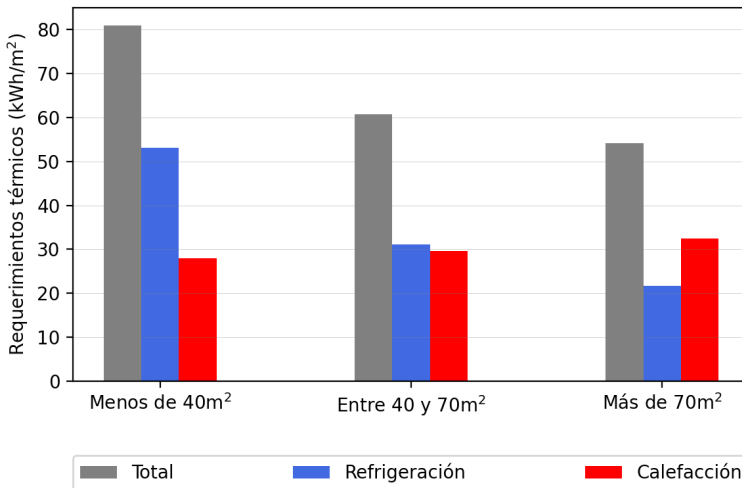
En la Figura 4.11 se presentan los resultados desagregados por tamaño de vivienda. Se puede observar que el 80% de las viviendas tienen área mayor a  $40\text{m}^2$  y concentran el 85% de los requerimientos de energía. Las viviendas más grandes son aquellas con los requerimientos totales mayores, pero relativo al área ocupada esto no es cierto. Las viviendas más pequeñas son las de mayor requerimientos relativo al área ocupada (ver Figura 4.11b), y esto se debe principalmente a los elevados requerimientos de refrigeración, que son prácticamente el doble que para las viviendas más grandes.

En la Figura 4.12 se comparan las contribuciones de los distintos componentes para los distintos tamaños de viviendas. Durante el período de refrigeración, las grandes diferencias entre requerimientos térmicos se deben a que las ganancias por la envolvente son mucho mayores en las viviendas pequeñas (ver Figura 4.12a). Por otro lado, las ganancias por las ventanas son mayores en las viviendas de mayor tamaño, pero se compensa con mayores pérdidas debido a infiltración y ventilación. Durante el período de calefacción, las mayores pérdidas por infiltración que se observan en las viviendas más grandes respecto a las viviendas pequeñas se compensan con que las pérdidas por la envolvente son mayores en las viviendas pequeñas, con lo cual se terminan observando requerimientos similares para los distintos tamaños (ver Figura 4.12b).

Estos resultados de aportes de los distintos componentes al total de carga térmica tienen cierto parecido a aquellos obtenidos al comparar entre deciles (Figura 4.8). Esto se debe a que las categorías de decil entre los tamaños de



(a) Porcentaje de requerimientos de acuerdo al tamaño.



(b) Requerimientos de calefacción y refrigeración de acuerdo al tamaño..

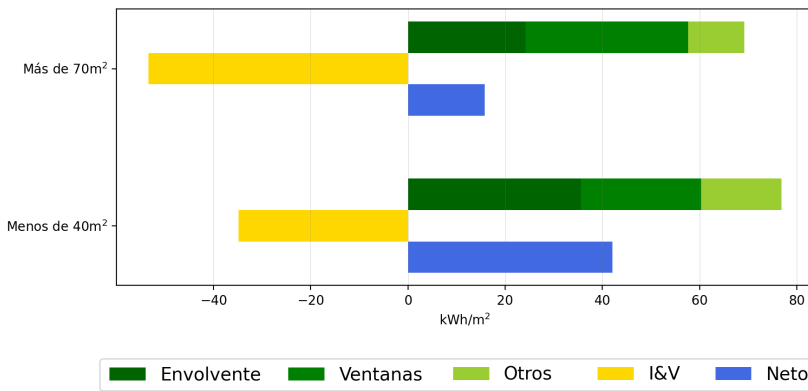
Figura 4.11: Requerimientos desagregados por tamaño.

vivienda no son independientes, como se puede observar en la Figura 4.13 (en general, menores tamaños en deciles más bajos y mayores en más altos).

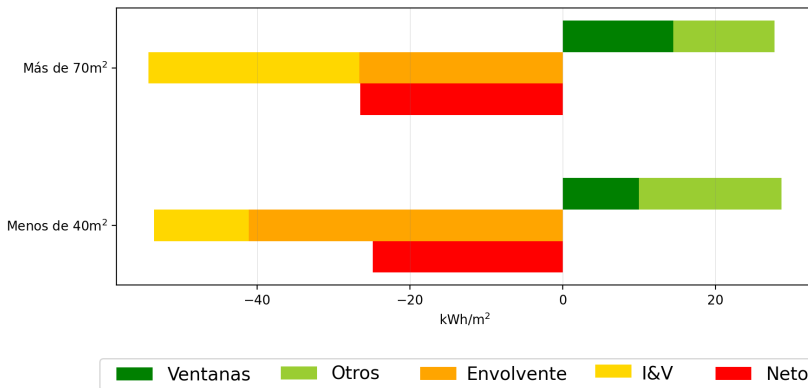


4.2.4. Desagregados por antigüedad

La última característica que se utilizó para determinar un arquetipo es la antigüedad de la vivienda. A continuación se analizan los resultados desagregados por esta categoría. En la Figura 4.14 se presentan entonces las proporciones de viviendas y requerimientos energéticos para las tres categorías de antigüedad que se definieron. Casi la mitad de las viviendas en Uruguay tienen más de 30 años de construidas, mientras que solo el 17% se corresponde a viviendas de menos de 10 años. Además, los requerimientos de las viviendas más antiguas



(a) Período de Refrigeración.



(b) Período de calefacción.

Figura 4.12: Ganancias y pérdidas de calor por tamaño en los períodos considerados.

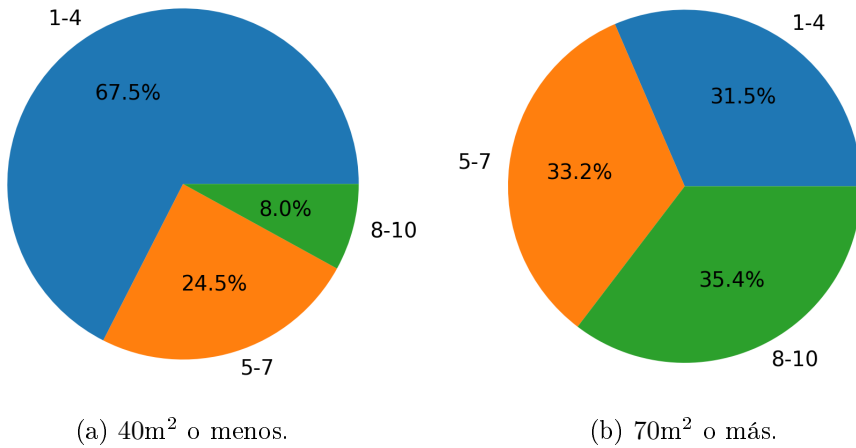
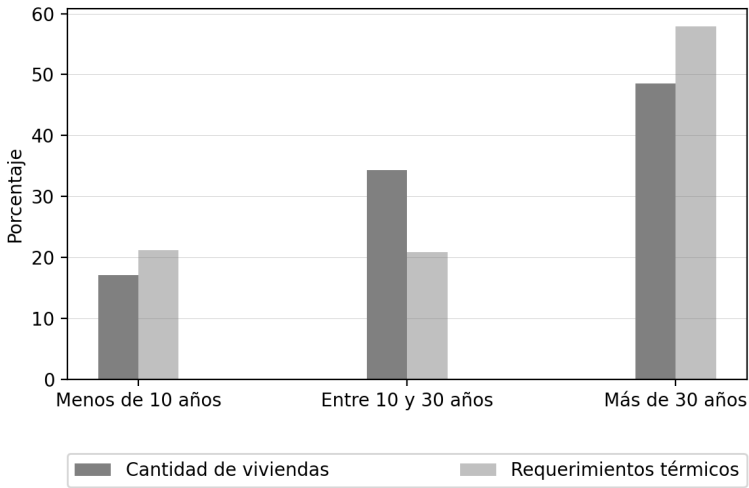


Figura 4.13: Distribución de tamaño de viviendas según los deciles socioeconómicos.

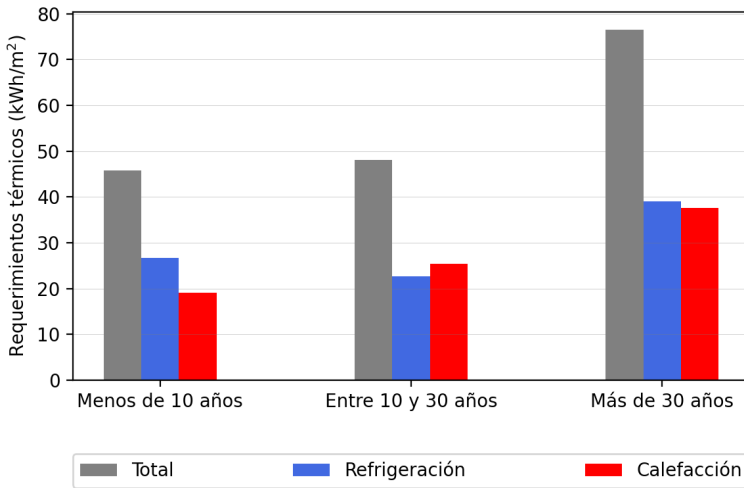
es casi el 60 % del total, mientras que para las más nuevas es de un 13 % (ver Figura 4.14a).

Estas diferencias entre el porcentaje de viviendas y el porcentaje de requerimientos se puede explicar observando los requerimientos energéticos relativos al área ocupada para cada categoría presentes en la Figura 4.14b. El gráfico muestra que cuanto más nueva la construcción menores son los requerimientos, a pesar de que la distribución por tamaños es la misma en cada categoría y que se tiene un mayor porcentaje de apartamentos en la categoría de mayor antigüedad (12,9 % en las de 10 años o menos y 17,4 % en la de 10 años o más). Esto muestra una mejoría en el tiempo de los materiales de construcción desde el punto de vista térmico. Las viviendas con menos de 10 años de construidas requieren 43,7kWh/m<sup>2</sup> de los cuales 26,8kWh/m<sup>2</sup> son para refrigeración y 16,9kWh/m<sup>2</sup> son para calefacción. Las viviendas con una antigüedad de 10 a 30 años requieren 48,4kWh/m<sup>2</sup> de los cuales 21,7kWh/m<sup>2</sup> son para refrigeración y 26,7kWh/m<sup>2</sup> son para calefacción. Finalmente, las viviendas con más de 30 años requieren 76,8kWh/m<sup>2</sup> de los cuales 36,7kWh/m<sup>2</sup> son para refrigeración y 38,1kWh/m<sup>2</sup> son para calefacción.

La comparación de la contribución de los distintos componentes para las categorías de mayor y menor antigüedad se presentan en la Figura 4.15. La mayor diferencia entre ambas categorías en ambos períodos es en las ganancias y en las pérdidas por la envolvente. Esto se debe a las diferencia en los materiales constructivos, que implican valores muy distintos de transmitancia,



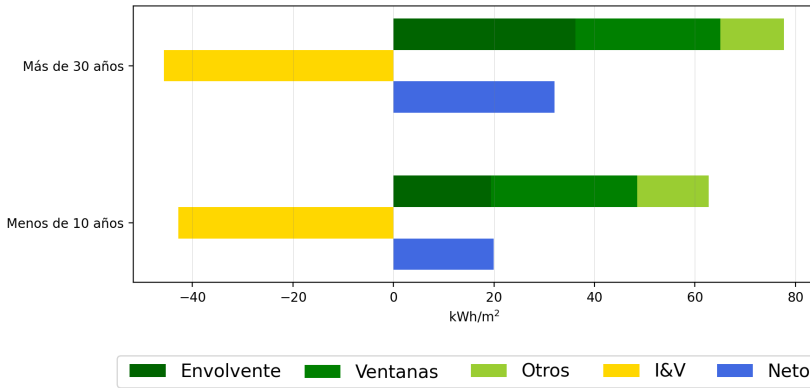
(a) Porcentajes de viviendas y requerimientos de acuerdo a la antigüedad.



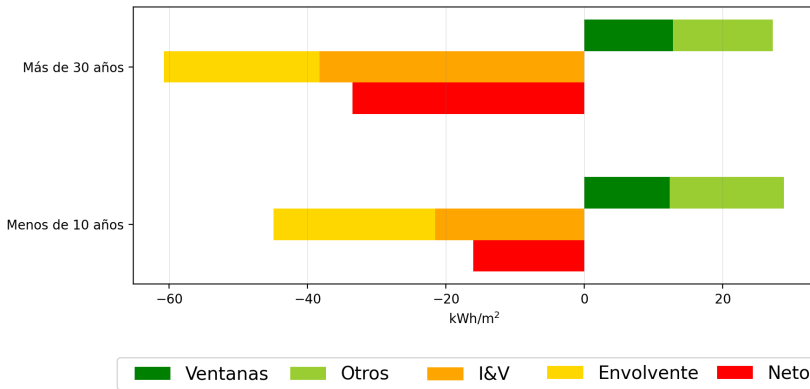
(b) Requerimientos de calefacción y refrigeración de acuerdo a la antigüedad.

Figura 4.14: Requerimientos desagregados por antigüedad.

que (incluyendo los coeficiente de convección) valen en promedio  $1,66\text{W/m}^2\text{K}$  y  $2,92\text{W/m}^2\text{K}$  para las viviendas más nuevas y más antiguas respectivamente.



(a) Período de refrigeración.



(b) Período de calefacción.

Figura 4.15: Ganancias y pérdidas de calor por antigüedad en los períodos considerados.

#### 4.2.5. Impacto del usuario

Como se describió en el Capítulo 2, se modelaron tres tipos de usuario para el presente trabajo. El usuario P, que se utilizó como usuario tipo y sobre el cual se realizó el análisis de resultados hasta ahora, representa un usuario eficiente que opera las ventanas y protecciones solares (en las zonas ocupadas) para minimizar los requerimientos energéticos. Se definieron también otros dos usuarios, el usuario S que es un usuario eficiente pero que contempla en su comportamiento algunas características diferentes al usuario P (como cerrar protecciones solares cuando no hay nadie en la vivienda u operar las protec-

ciones de todas las zonas, no sólo las ocupadas). Por último se tiene también el usuario V, que a diferencia de los usuarios P y S, no hace uso de la ventilación natural o de las protecciones solares y por lo tanto sólo logra el confort por medio del sistema HVAC. En esta sección los resultados obtenidos para los usuarios S y V se analizan para estudiar el impacto del usuario en el comportamiento térmico de la vivienda, presentándolos relativos a los resultados obtenidos para el usuario P.

Para el usuario ineficiente (V) se obtuvo un incremento del 61 % en los requerimientos energéticos respecto al usuario P, lo que muestra un gran impacto del usuario en el comportamiento de la vivienda desde el punto de vista térmico. En la Figura 4.16 se muestran las variaciones de requerimientos totales para las distintas categorías definidas en la caracterización del parque habitacional. Respecto a las diferencias por tipo de vivienda, se observa que los apartamentos son mucho más sensibles al comportamiento del usuario que las casas. Esto se debe al menor porcentaje de superficie expuesta en apartamentos, lo que los hace mucho más dependientes de la ventilación y las protecciones solares para la refrigeración. Respecto a las regiones, las variaciones en el usuario V son más similares, sin embargo, la región N-NO es la menos afectada ya que en esa región, incluso el usuario eficiente no es capaz de aprovechar demasiado la ventilación natural (ver Figura 4.6a).

Respecto a los deciles socioeconómicos, la influencia del usuario V es más importante para los deciles 5-7 con un aumento del 75 %, mientras que para los deciles 1-4 crecen un 57 % y para los deciles 8-10 en un 30 %. El mayor impacto del usuario V se observa en un aumento de las cargas de refrigeración al no aprovechar la ventilación natural; lo que explica que el impacto sea más bajo en los deciles 8-10 ya que dichas cargas son solamente un 28 % en ese caso (ver Figura 4.7b). Por otro lado, el tamaño de la vivienda o su antigüedad muestran menor incidencia en el porcentaje de aumento de requerimientos del usuario V.

El usuario S también muestra cierta variación, aunque en menor medida, estimándose un aumento del 1 %. La pequeña diferencia observada en este usuario se debe a que la principal diferencia entre los usuarios S y P está en la operación de las protecciones solares, y en la caracterización del parque habitacional se definió que un gran porcentaje de viviendas no tienen protecciones solares. Las variaciones diferenciadas por categoría se muestran en la Figura 4.17. En todas las categorías las variaciones porcentuales son pequeñas, en el caso de los deciles 1-4 no hay variación, debido a que para estos deciles se consideró que no hay protecciones solares y por lo tanto los usuarios terminan siendo iguales. Las variaciones más altas se observan para la región N-NO (una

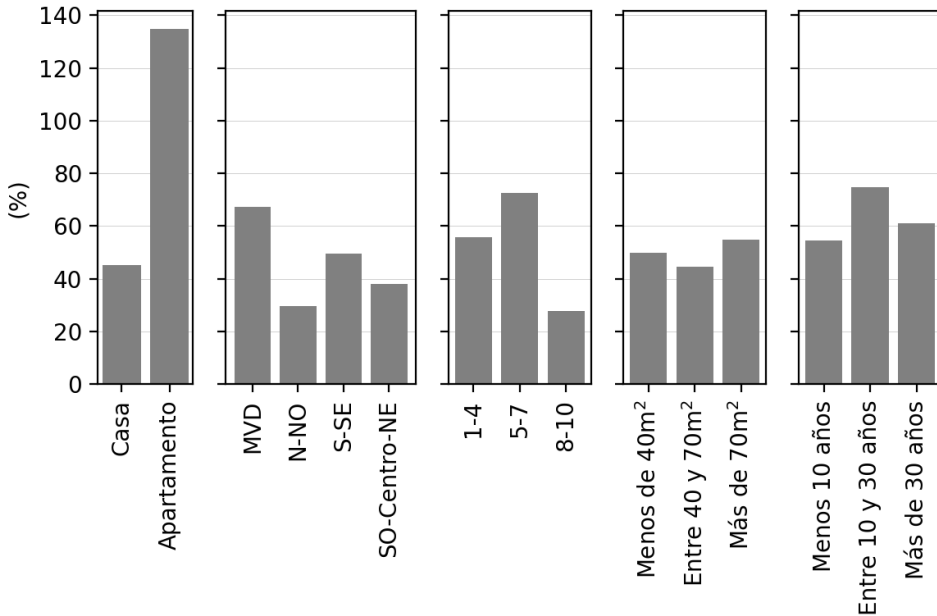


Figura 4.16: Variación porcentual de los requerimientos para el usuario ineficiente (V) relativo al usuario eficiente (P).

reducción del 5,5% para el usuario S) y para las casas de más de 30 años de antigüedad (con una reducción del 7,3%). Para el caso de la región N-NO esto se debe a que tiene altas cargas de refrigeración y un alto aporte relativo de las ganancias por las ventanas (ver Figuras 4.5b y 4.6a), y el usuario S logra reducirlas al operar las protecciones solares (mientras haya ocupantes en alguna zona) en toda la vivienda, a diferencia del usuario P que opera sólo en las zonas ocupadas. Lo mismo explica el caso de las viviendas de más de 30 años de antigüedad, para las cuales se observa una alta carga de refrigeración y un aporte porcentual elevado de las ganancias por las ventanas en el período correspondiente (ver Figuras 4.11b y 4.12a).

En resumen, para el usuario ineficiente (V) se observa un importante aumento de los requerimientos para todas las categorías, y variaciones más moderadas para el usuario S debido a ser también un usuario eficiente con algunas diferencias en la operación de las protecciones. En cualquier caso, los efectos de los usuarios son más pronunciados para las cargas de refrigeración, por lo que se observan mayores variaciones en aquellas categorías que tengan mayor carga de refrigeración y mayor aporte de las ganancias por las ventanas, pero

que a su vez cuentan con protecciones para ser operadas. Otro factor en el que puede influir el usuario es la definición de confort térmico, sin embargo en el presente estudio no se analizó y para todos los usuarios se utilizó el mismo criterio.

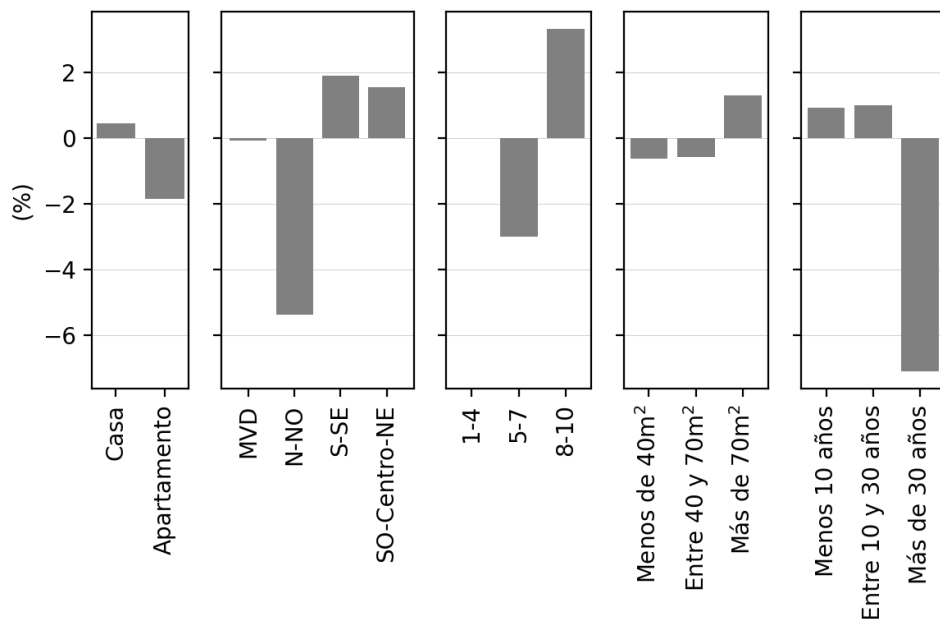


Figura 4.17: Variación porcentual de los requerimientos para el usuario (S) relativo al usuario eficiente (P).

Asimismo, si bien los usuarios P y S son considerados eficientes, es posible imaginar usuarios cuyos comportamientos sean aún más eficientes. Por ejemplo, al actuar sobre las aberturas de las habitaciones no ocupadas para mejorar la ventilación natural en toda la vivienda o incluso en las zonas ocupadas. Dada la extensión y alcance de este trabajo, estas opciones no fueron consideradas, así como tampoco la inclusión de protecciones solares “parciales” o menos eficientes, como las cortinas interiores. Todas estas cuestiones pueden ser objeto de otros estudios o modificaciones en los resultados aquí presentados.

### 4.3. Resultados de confort térmico en viviendas sin acondicionar

En la Tabla 4.6 se presentan los valores obtenidos de disconfort por vivienda en el sector residencial cuando las viviendas no tienen acondicionamiento térmico. Estos resultados son asumiendo un comportamiento eficiente de las viviendas (usuario P). Es importante resaltar que, al igual que en la sección anterior, los resultados presentados se basan en la caracterización del parque habitacional realizada, para un año meteorológico típico y bajo las hipótesis de uso de las viviendas. Los valores se expresan en grados-hora de disconfort en todo el año simulado, el cual se obtiene, para cada vivienda, sumando para cada hora del año la cantidad de grados por fuera del rango de confort en que se encuentra el interior de la vivienda.

Tabla 4.6: Disconfort térmico anual por vivienda.

Disconfort por calor	Disconfort por frío	Disconfort Total
757 °Ch	2581 °Ch	3337 °Ch

Se observa que el disconfort debido a bajas temperaturas es notoriamente mayor que el debido a altas temperaturas, al menos para el país en su conjunto. Este comportamiento es diferente al observado en el análisis de la Sección 4.2, donde los requerimientos térmicos eran similares para refrigeración y calefacción, o sea debido a altas y bajas temperaturas respectivamente. Para analizar las causas de esta diferencia en ambos escenarios, se presentan los gráficos de la Figura 4.18, donde se comparan las ganancias y pérdidas de los distintos componentes de la vivienda. Lo primero que cabe señalar es que en el caso sin acondicionamiento, la temperatura de la vivienda evoluciona de manera tal que las pérdidas y ganancias prácticamente se igualan, en ambos períodos, ya que no hay aporte del sistema HVAC para mantener la temperatura en el rango deseado y compensar las diferencias entre ganancias y pérdidas. Es decir, en un período dado, casi todo el calor que entra a un edificio termina saliendo de él. La pequeña diferencia entre entradas y salidas se debe a la acumulación (o liberación) de calor en la estructura entre los estados al inicio y al final del período en cuestión, que pueden ser de diferentes temperaturas. Esta diferencia será menor cuanto mayor sea el período de estudio.

En la Figura 4.18a se presenta la comparación de los aportes al balance energético de las viviendas en las situaciones con y sin acondicionamiento para el período frío. Como es evidente, en este período las ganancias son favorables a los efectos del confort térmico. En este caso esas ganancias corresponden al



calor aportado por fuentes internas (personas y equipos) y al ganado por las ventanas (principalmente radiación solar que se transmite por el área vidriada). Puede observarse que estas ganancias no sufren variaciones considerables entre la situación con y sin acondicionamiento, apenas se observa cierto aumento en las ganancias por las ventanas. La diferencia importante que se aprecia es la disminución de las pérdidas, con lo cual se logra el balance.

Las pérdidas se deben a el intercambio de calor por la envolvente y a las infiltraciones y ventilación natural. En el caso de las pérdidas por la envolvente, las mismas dependen fuertemente de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, por lo que como es natural la disminución respecto al caso acondicionado es debido a temperaturas interiores más cercanas a las exteriores, lo que genera las horas de discomfort térmico. Por otro lado, las pérdidas por infiltraciones y ventilación además de depender de la diferencia de temperatura, dependen de la operación de las ventanas que en ambos casos puede ser levemente diferente. Entonces, la no tan pronunciada disminución en esas pérdidas se debe a que la disminución de la diferencia de temperatura se compensa en parte con menor tiempo de ventanas abiertas. En definitiva, se observa que la forma de que las ganancias compensen las pérdidas es por una disminución de estas últimas, esencialmente por un acercamiento de la temperatura interior a la exterior, si se toma como base al caso acondicionado.

Para el período de calor la comparación de balances energéticos se presenta en la Figura 4.18b. En este caso las ganancias son negativas en lo que respecta al confort, mientras que las pérdidas favorecen que las temperaturas no aumenten por encima de los valores de confort. Al comparar las situaciones con y sin acondicionamiento se observan diferencias respecto al período frío. En este caso se nota una disminución no despreciable de las ganancias, y también un aumento considerable de las pérdidas. En el caso de las ganancias, estas se componen de ganancias internas (no varían entre ambas situaciones), ganancias por las ventanas y por la envolvente. Las ganancias por las ventanas disminuyen, lo cual se debe principalmente a una operación diferente de las protecciones solares (más tiempo activas). En menor medida las ganancias por la envolvente también disminuyen, esto sólo puede deberse a que la temperatura interior sea mayor en el caso sin acondicionar que en el acondicionado. Por otro lado, las pérdidas se deben en este caso solamente a las infiltraciones y ventilación natural. Estas pérdidas aumentan notoriamente, lo cual se debe a una operación diferente de apertura de ventanas entre ambas situaciones. Como se mencionó anteriormente, si está encendido el sistema HVAC el usuario no puede ventilar, por lo que en esa situación está más limitado el aprovechamiento de la ventilación natural, y por eso hay un incremento notorio en la

pérdidas por este mecanismo en el caso sin acondicionamiento. En resumen, en el período de calor el balance entre pérdidas y ganancias de calor se logra en gran medida por una operación diferente de protecciones solares y apertura de ventanas, y en menor medida a un aumento de la temperatura en el interior de la vivienda, siempre comparando con el caso acondicionado.

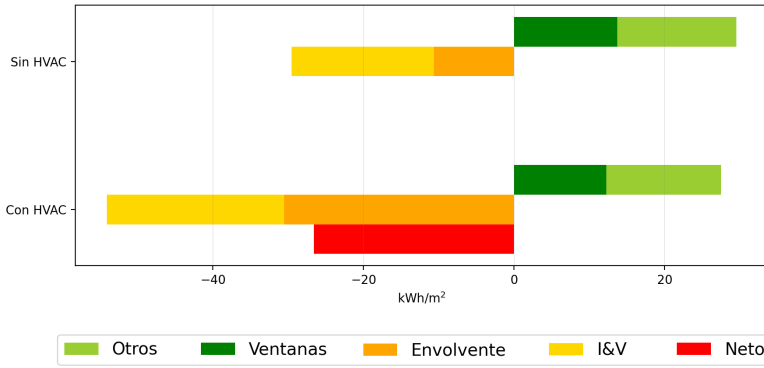
Las diferencias de cómo se logra el balance entre pérdidas y ganancias en ambos períodos explican las diferencias de los resultados globales entre ambas situaciones. Mientras que en el período frío el cambio es esencialmente por la modificación de temperatura interna, en el período de calor se debe principalmente a un mejor aprovechamiento de la ventilación natural y a un mejor uso de las protecciones solares, y no tanto a la variación de la temperatura. Es por esto que para el caso con acondicionamiento se tenía que los requerimientos de refrigeración y calefacción eran similares, mientras que en el caso sin acondicionamiento el desconfort en el período frío es más de tres veces mayor que en el período de calor. Por lo tanto, es claro que ambos análisis pueden otorgar resultados diferentes y por lo tanto se debe ser cuidadoso en cuál se utiliza, y además esta diferencia resalta también la importancia del comportamiento de los usuarios.

Sin volver a repetir el análisis en la profundidad presentado en la sección anterior, en las siguientes sub-secciones se presentan someramente resultados desagregados por región y por decil socioeconómico.

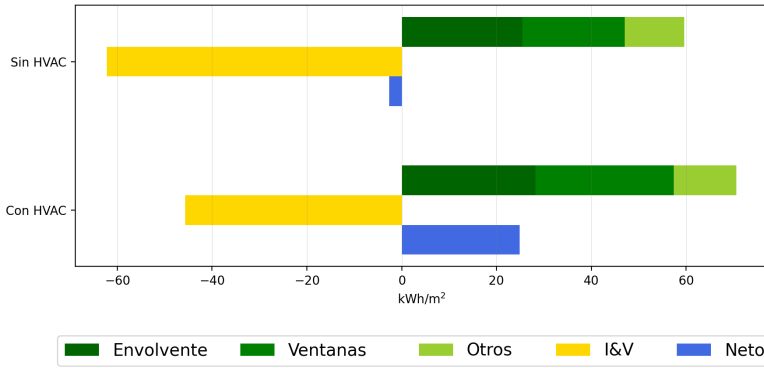
### 4.3.1. Desagregados por región

Los resultados desagregados por región se presentan en la Figura 4.19a. Se puede observar que todas las regiones tienen un porcentaje similar de desconfort al porcentaje de viviendas, lo que indica que las edificaciones respecto a este indicador se comportan de manera similar en todas las regiones. Esto mismo se puede observar en la Figura 4.19b, si bien el desconfort total medio de las viviendas es muy similar en todas las regiones, la región SO-Centro-NE presenta valores levemente superiores al resto, a diferencia de lo que se observó en la Sección 4.2.1, donde se muestra que para viviendas acondicionadas el requerimiento térmico es mayor en la región N-NO.

En la Figura 4.19b también se puede observar por separado el desconfort por temperaturas altas y por temperaturas bajas, aquí se observa que si bien en términos totales en todas las regiones se obtienen valores similares de desconfort, la composición del mismo varía entre regiones. En la región N-NO se observa que el desconfort por calor es algo superior al desconfort por frío, mientras que en todas las otras regiones el desconfort por frío es muy superior al desconfort por calor. Estos resultados son coherentes con las diferencias en



(a) Período frío.



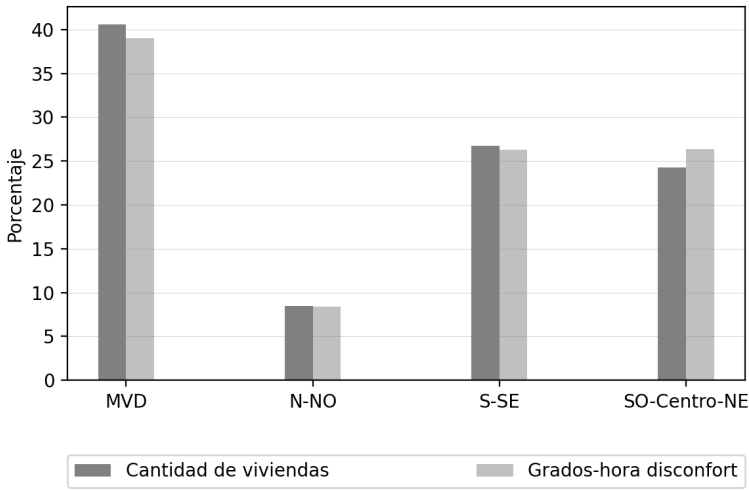
(b) Período de calor.

Figura 4.18: Ganancias y pérdidas de calor globales, en los períodos considerados de frío y calor.

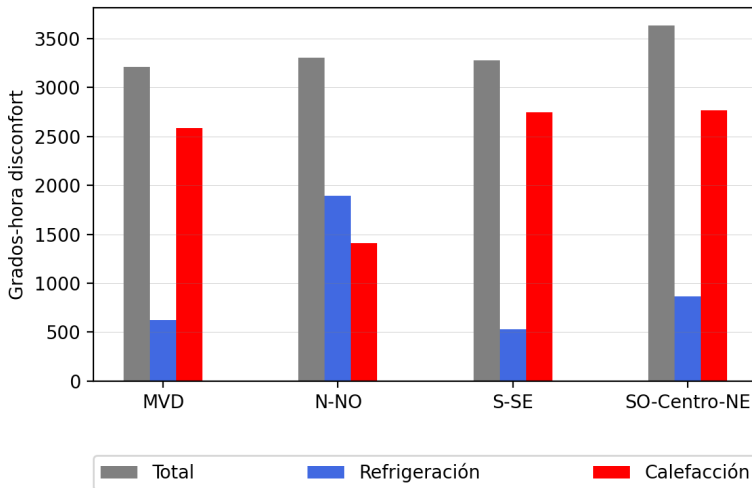
las temperaturas medias de las regiones, y también con los mapas de radiación solar y de viento, como se analizó en la Sección 4.2.1.

### 4.3.2. Desagregados por decil socioeconómico

En esta sección se analizan los resultados desagregados por decil socioeconómico. La comparación entre las proporciones de cada categoría en términos de cantidad de viviendas y de disconfort para todo el país se presentan en la Figura 4.20a, se puede observar que el peso relativo más grande en cuanto a disconfort lo aportan los deciles 1-4, incluso por encima del porcentaje de viviendas. Esto se debe a que el disconfort medio de una vivienda de esos deciles



(a) Distribución porcentual de viviendas y desconfort.

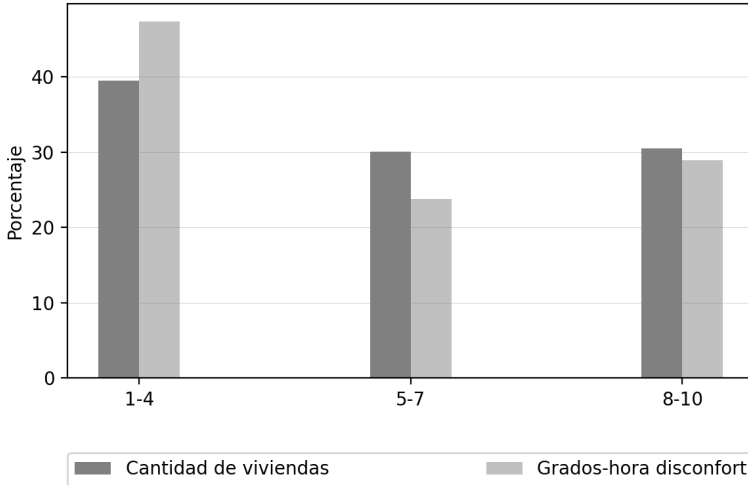


(b) Desconfort por calor y frío.

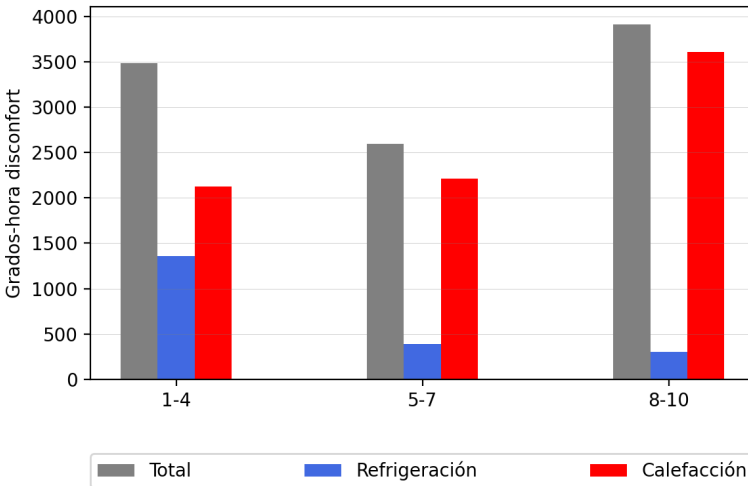
Figura 4.19: Desconfort desagregado por región.

es mayor que la media en todo el país. Esto último se puede deducir del gráfico de la Figura 4.20b. En dicha Figura se puede ver también que para los deciles 1-4 el desconfort por altas temperaturas es notoriamente mayor que para los demás deciles, más de tres veces mayor. Asimismo para bajas temperatu-

ras en esos mismos deciles el disconfort es menor que para los demás deciles, especialmente comparando con los deciles 8-10.



(a) Distribución porcentual de viviendas y disconfort por decil socioeconómico.

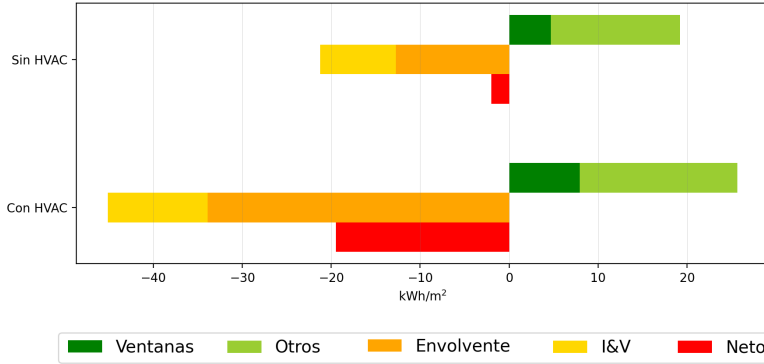


(b) Disconfort diferenciando por período de calor y frío.

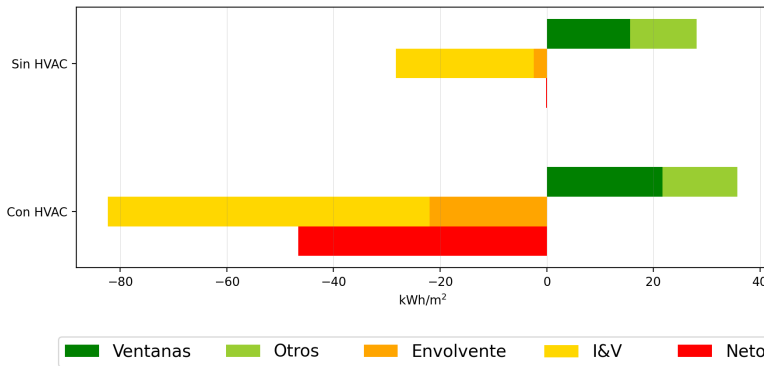
Figura 4.20: Disconfort desagregado por decil socioeconómico.

Estas diferencias se deben a variaciones en los materiales constructivos, área vidriada y protecciones solares. Para analizar esto se presentan los aportes al

balance energético de la vivienda de los distintos componentes para los casos con y sin acondicionamiento térmico, para el período frío en la Figura 4.21 y para el período caliente en la Figura 4.22.



(a) Deciles socioeconómicos 1-4.

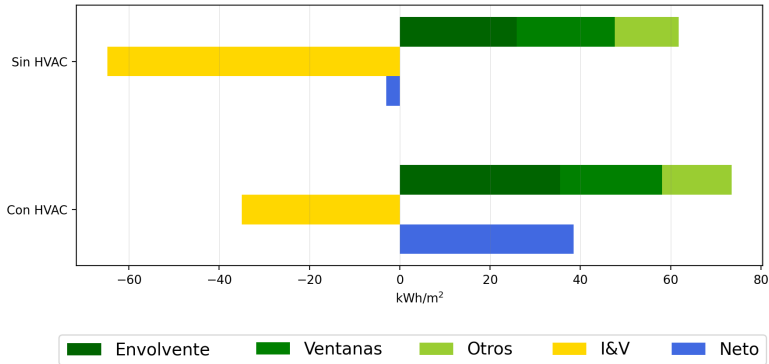


(b) Deciles socioeconómicos 8-10.

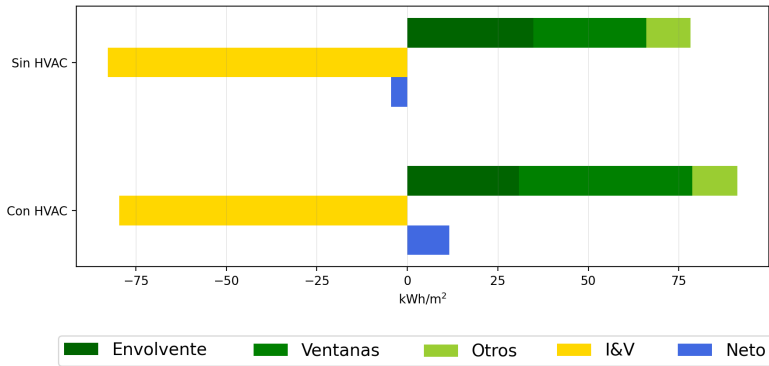
Figura 4.21: Aportes al balance energético de la vivienda con y sin HVAC para período frío.

Para el período de bajas temperaturas los valores de desconfort son mayores y por tanto los cambios de temperatura de un caso con HVAC a un caso sin HVAC son más notorios. En las viviendas de los deciles 8-10 se observa, respecto al caso con HVAC, que las ganancias disminuyen levemente mientras que las pérdidas se reducen en más de un 50 % para alcanzar un balance entre ambas. La reducción en las pérdidas es a costa de una importante disminución de las temperaturas en el interior de la vivienda, siempre comparando con el caso acondicionado donde el interior se mantiene en confort. Esas menores

temperaturas (más cercanas a la exterior) producen una importante reducción en las pérdidas por infiltraciones y ventilación, y también una notoria reducción de las pérdidas por la envolvente. Para los deciles 1-4 el comportamiento en términos generales es análogo, la diferencia radica en que la reducción de pérdidas necesaria en términos relativos es menor debido al peso relativo de la envolvente en el balance de la vivienda.



(a) Desiles socioeconómicos 1-4.



(b) Deciles socioeconómicos 8-10.

Figura 4.22: Aportes al balance energético de la vivienda con y sin HVAC para el período caluroso.

Para el período de altas temperaturas se observa que en los deciles 8-10 las ganancias por la envolvente varían muy poco entre un caso y otro, lo cual es consecuencia de que en el caso sin HVAC se mantienen niveles de temperatura similares. Tampoco se observan importantes diferencias en las pérdidas por infiltraciones y ventilación natural. En ese caso los cambios más grandes se dan

en las ganancias por las ventanas, disminuyendo gracias a un mayor uso de las protecciones, con lo cual prácticamente se logra mantener el confort térmico a pesar de no tener acondicionamiento térmico. Esta diferencia se debe a la definición del usuario respecto al criterio de uso de las ventanas entre un caso y el otro.

Por otro lado para los casos de los deciles 1-4, se observa que las ganancias por las ventanas prácticamente no varían (no hay protecciones solares en estos arquetipos) y también que hay un importante aumento de las pérdidas gracias por ventilación, lo cual se debe principalmente al mayor tiempo de apertura de ventanas, aunque también a una mayor diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. Este efecto, sin embargo, no es suficiente y se observa cierta disminución de las ganancias por la envolvente para compensar, lo cual se logra con mayores temperaturas en el interior, y por tanto mayor disconfort debido a altas temperaturas. En definitiva se observa un mayor disconfort por altas temperaturas en los deciles 1-4 debido a la ausencia de protecciones que pudieran disminuir ganancias por las ventanas y al peso relativo de las ganancias por la envolvente, de peor calidad constructiva, que generan que el aumento de la ventilación natural no sea suficiente para compensar dichas ganancias.

#### 4.4. Análisis de sensibilidad para un arquetipo y región

El caso seleccionado para realizar el análisis de sensibilidad corresponde al arquetipo utilizado para representar casas con un área entre 40 m<sup>2</sup> y 70 m<sup>2</sup>, de una antigüedad mayor a 30 años y con ocupantes de los deciles socioeconómicos del 5 al 7. El caso es uno de los de mayor representatividad dentro del parque habitacional y tiene la construcción más típica respecto a la envolvente. Debido a esto, el análisis de resultados es de mayor relevancia y más fácilmente extrapolable al resto de las edificaciones del país.

El archivo climático (EPW) utilizado para estas simulaciones es el correspondiente a Montevideo. Al igual que en la simulación general del parque habitacional, el archivo está generado por Lawrie y Crawley [58] basado en el Año Meteorológico Típico de Uruguay (AMTU) desarrollado por Alonso-Suárez et al. [24]. La excepción es que los datos de viento fueron reemplazados por mediciones de Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE) como se presenta en el Anexo A, y a dichas mediciones se le aplicó un factor de abrigo de 0,5 para considerar el efecto de los alrededores



#### 4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA UN ARQUETIPO Y REGIÓN117

(ver Anexo B). El archivo incluye también una corrección en los datos de irradiancia solar, debido a que se detectó un desfase entre los datos del AMTU y los datos en el EPW (detalles sobre el desfase horario y su corrección en el trabajo de Gervaz 59, Apéndice C).

Las propiedades térmicas de la envolvente, las paredes interiores y puertas se presentan en la Tabla 4.7. Respecto a las ventanas, el arquetipo seleccionado tiene ventanas de vidrio simple con espesor de 4mm y marco de hierro, sus propiedades térmicas se detallan en la Tabla 4.8. Además, se considera que se tienen protecciones solares en las ventanas de la sala de estar y de los dormitorios, y que estas consisten en persianas de PVC que se modelan como totalmente opacas.

Tabla 4.7: Propiedades térmicas de las superficies opacas.

Construcción	U (W/m <sup>2</sup> K)	$\alpha_{SWR,i}$	$\alpha_{SWR,o}$	$\alpha_{LWR,i}$	$\alpha_{LWR,o}$
Pared exterior	3,02	0,20	0,20	0,90	0,90
Pared interior	4,66	0,20	0,20	0,90	0,90
Techo	4,28	0,20	0,55	0,90	0,93
Piso	9,02	0,45	-	0,95	-
Piso de dormitorios	5,47	0,90	-	0,60	-
Puerta exterior	3,42	0,90	0,90	0,60	0,60
Puertas interiores	1,12	0,90	0,90	0,60	0,60

Tabla 4.8: Propiedades térmicas de las superficies no opacas.

Construcción	U (W/m <sup>2</sup> K)	$\tau_{SWR}$	$\tau_{LWR}$	$\rho_{SWR}$	$\varepsilon_{LWR}$
Ventanas	312,5	0,88	0,00	0,08	0,84

Para este arquetipo se asume que las infiltraciones de aire se dan en todas las aberturas (ventanas y puertas) y también en grietas que se asume están en el techo. Con el fin de modelar los flujos de aire debido a las infiltraciones y la ventilación natural y sus respectivas cargas térmicas se utiliza el modelo *AirflowNetwork* (AFN), como se explica en el Capítulo 3. El mismo requiere que cada componente se caracterice con un  $C_Q$  y un  $n$  (ver Ecuación 3.11 del Capítulo 3).

El valor de  $C_Q$  por unidad de largo de perímetro de ventana o puerta utilizado para este arquetipo se presenta en la Tabla 4.9. El valor final de  $C_Q$  para cada ventana o puerta se obtiene multiplicando dicho valor por su perímetro. Además, para considerar el flujo de aire por puertas y ventanas cuando están abiertas, fue utilizado un coeficiente de descarga de 1.

Tabla 4.9: Propiedades de infiltración para puertas y ventanas relativas al perímetro.

Construcción	$C'_Q$ (g/smPa <sup>n</sup> )	n
Ventana	0,898	0,682
Puerta interior	1,896	0,590
Puerta exterior	0,046	0,660

Tabla 4.10: Propiedades de infiltración para el techo.

Construcción	Type	$C''_Q$ (g/sm <sup>2</sup> Pa <sup>n</sup> )	$C'_Q$ (g/smPa <sup>n</sup> )	n
Techo	Pesado	0,156	0,132	0,7

Los valores utilizados por unidad de área ( $C''_Q$ ) y por unidad de largo ( $C'_Q$ ) definidos para este arquetipo se presentan en la Tablas 4.9 y 4.10. El valor final de  $C_Q$  se calcula luego con la Ecuación 4.1:

$$C_Q = C''_Q A_{roof} + C'_Q P_{roof} \quad (4.1)$$

donde  $A_{roof}$  es el área del techo y  $P_{roof}$  es su perímetro expuesto.

De las geometrías definidas para representar este arquetipo se seleccionó el “Modelo 11” (ver Anexo D), esto se debe a que al ser una geometría relativamente simple permite evitar resultados muy dependientes de las peculiaridades del caso. De esta manera se simplifica el análisis, pero también permite sacar conclusiones más generales. En la Figura 4.23 se muestra la planta de la vivienda, y su representación en EnergyPlus se muestra en la Figura 4.24. El “Modelo 11” tiene un área vidriada total de 6,91 m<sup>2</sup>, de los cuales 4,22 m<sup>2</sup> están en la fachada frontal, 1,54 m<sup>2</sup> están en la fachada trasera y 1,15 m<sup>2</sup> están en la fachada que está 90° en el sentido horario respecto a la fachada frontal.

Este arquetipo se caracteriza con tres personas viviendo en la casa, quienes operan las aberturas (ventanas), protecciones solares (persianas) y el sistema HVAC con los criterios definidos de uso del usuario P y con el fin de alcanzar el confort térmico (definido de acuerdo a ASHRAE 55 [62]). Este usuario aprovecha la ventilación natural abriendo las ventanas cuando la temperatura operativa de la zona es mayor que la de confort pero dentro de los límites de aceptación de 80 % de acuerdo a ASHRAE 55 ( $\pm 3, 5^\circ\text{C}$ ). Cuando esta condición no se logra, se utiliza el sistema HVAC. Siempre que el sistema HVAC esté encendido en modo de enfriamiento, si la radiación solar incidente es mayor a 300W/m<sup>2</sup> se utilizan las protecciones solares (se bajan las persianas).

Cabe destacar que todas las acciones del usuario están sujetas a la presencia de ocupantes en la zona térmica, entonces en los momentos que no hay

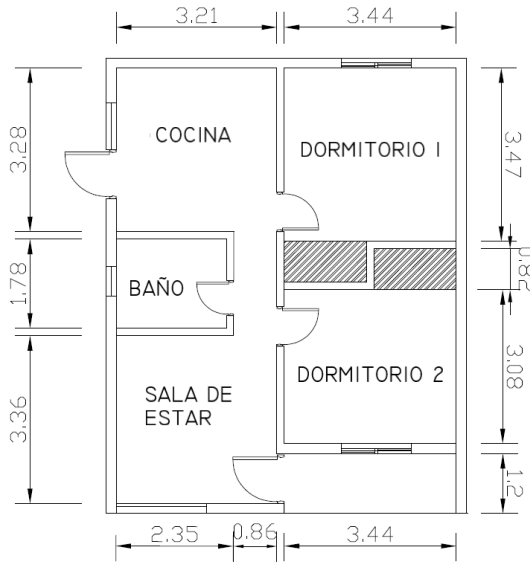


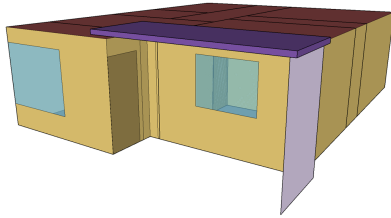
Figura 4.23: Geometría del Modelo 11.

nadie en la zona no se tiene sistema HVAC funcionando, las ventanas permanecen cerradas y las protecciones solares desactivadas (persianas abiertas) para cualquier condición de temperatura. La ocupación de las zonas se definió de acuerdo a la norma NBR 15575 [63], esto es que en la sala de estar de 14:00 a 22:00hs y en los dormitorios de 22:00 a 8:00 horas hay ocupantes, mientras que en la cocina y el baño nunca hay ocupantes.

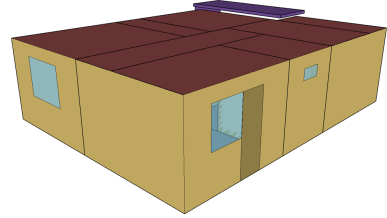
#### 4.4.1. Escenarios

Dado que en el presente proyecto el arquetipo seleccionado en esta sección se utilizó para representar numerosas viviendas, es importante analizar cómo ciertas diferencias entre esas viviendas impactan en el comportamiento térmico del arquetipo. Como ya se ha mencionado en este estudio esas diferencias son: orientación de la fachada frontal, presencia de árboles generando sombra en la vivienda, presencia de otro edificio generando sombra sobre la vivienda y cantidad de fachadas apareadas.

Ya que el arquetipo estudiado se localiza en Montevideo, donde las direcciones de las calles dependen fuertemente del barrio, la fachada frontal puede tomar cualquier orientación entre  $0^\circ$  a  $360^\circ$ ; donde un valor de  $0^\circ$  corresponde a la fachada frontal mirando al norte y se incrementa en sentido horario (ver



(a) Fachada frontal.



(b) Fachada Trasera.



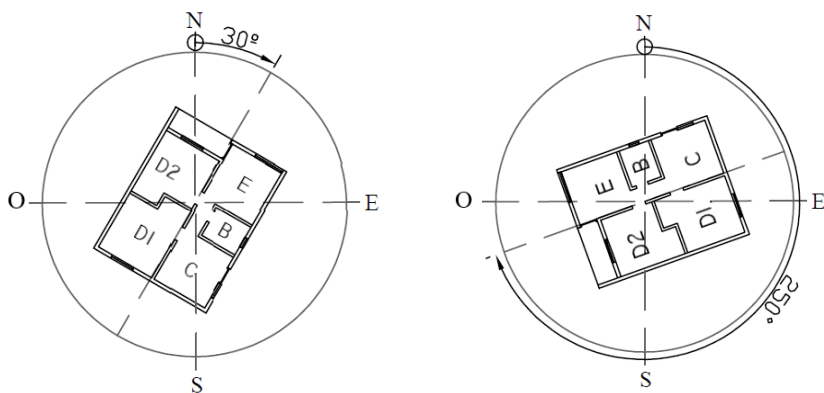
(c) Zonas térmicas.

Figura 4.24: Representación del Modelo 11 en EnergyPlus.

Figura 4.25 con ejemplos de orientación). Debido a esto, los posibles escenarios se definieron seteando los parámetros relacionados a los alrededores (sombras y fachadas apareadas) y luego fueron simuladas para orientaciones variando cada  $5^\circ$  desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$ . Por lo tanto se realizaron 72 simulaciones para cada posible escenario definido.

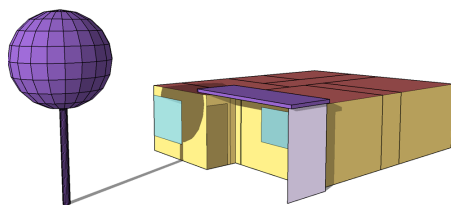
Respecto al sombreado debido a la presencia de árboles, dada las características del arquetipo sólo se consideraron dos variaciones: o no hay ningún árbol sombreando la envolvente de la vivienda o bien hay un árbol frente a la fachada frontal como se muestra en la Figura 4.26a. Análogamente, para el caso de sombras debido a otros edificios las posibilidades son: que no hayan sombras o que exista un edificio generando sombras en la fachada lateral ubicada  $90^\circ$  en sentido horario respecto a la frontal, como se muestra en la Figura 4.26b.

#### 4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA UN ARQUETIPO Y REGIÓN121

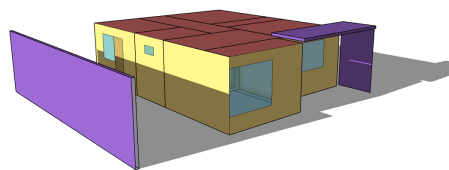


(a) Vivienda con orientación de  $30^\circ$ . (b) Vivienda con orientación de  $250^\circ$ .

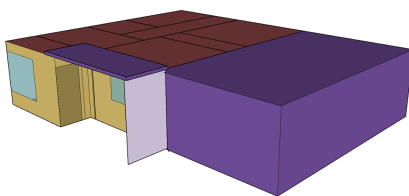
Figura 4.25: Ejemplos de orientación.



(a) Sombra por árbol.



(b) Sombra por edificio vecino.



(c) Fachada apareada.

Figura 4.26: Variaciones posibles de presencia de sombra y fachada apareada.

Dada la geometría del arquetipo y la ubicación de las aberturas, se tiene sólo una fachada que puede estar apareada a otra vivienda. Por lo tanto, también se consideraron dos configuraciones relativas a este aspecto: no apareada o apareada en la fachada ubicada  $270^\circ$  en sentido horario respecto a la frontal, como se muestra en la Figura 4.26c. En el presente trabajo las paredes apareadas se modelan como adiabáticas, lo cual es razonable suponiendo que el edificio apareado tiene temperaturas interiores similares a la vivienda estudiada.

Los posibles escenarios se resumen en la Tabla 4.11. Al definirse 5 escenarios posibles para cada una de las 72 orientaciones posibles se tiene un total de 360 modelos a simular. Debido a eso también se desarrolló un código específicamente para este análisis basado en el lenguaje Eppy, el cual se encarga de generar de manera automática los archivos IDF, ejecutar las simulaciones y procesar los resultados. Dicho proceso llevó 11hs 40min en una PC personal con un procesador Core i7 y memoria RAM de 16,0 GB.

Tabla 4.11: Escenarios definidos.

Escenario	Árbol	Edificio	Apareado
I	No	No	No
T	Sí	No	No
B	No	Sí	No
A	No	No	Sí
TBA	Sí	Sí	Sí

#### 4.4.2. Resultados y discusión

Los requerimientos térmicos anuales para cada escenario se presentan como función de la orientación para cada orientación en la Figura 4.27. Se observa una gran incidencia del escenario así como también una fuerte dependencia con la orientación. Los requerimientos varían de 1458kWh para una casa apareada orientada a  $355^\circ$  a 1967kWh para una casa aislada orientada a  $310^\circ$ . Esto significa una diferencia de 35 % para dos casas representadas con el mismo arquetipo, resaltando la importancia de considerar los diferentes escenarios.

Además, diferentes casos y orientaciones pueden resultar en diferentes contribuciones relativas de cada componente al total de los requerimientos de calefacción y refrigeración. Tener en cuentas estas diferencias del aporte de cada componente puede ser muy importante a la hora de analizar mejoras para

#### 4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA UN ARQUETIPO Y REGIÓN123

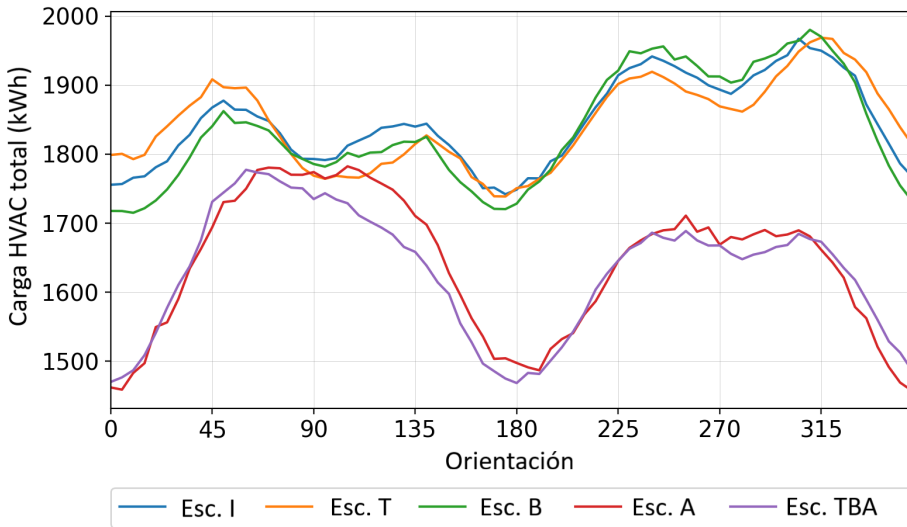


Figura 4.27: Requerimiento total anual.

el comportamiento térmico de la vivienda, ya que las mejoras más eficientes pueden diferir para distintos escenarios y orientaciones.

Por ejemplo, en las Figuras 4.28a y 4.28b se presentan las contribuciones relativas para los requerimientos de refrigeración para el escenario I orientado a  $130^\circ$  y para el escenario A orientado a  $355^\circ$  respectivamente. En ambos casos el techo y las ventanas son los elementos que más contribuyen, pero en 4.28a sus aportes son similares, mientras que en 4.28b el techo es responsable del 54,4% de la carga de refrigeración y las ventanas del 28,6%. La categoría “Otros” se compone de los elementos con contribuciones menores a 3%, que en este caso son el piso, las infiltraciones y ventilación natural, equipos e iluminación.

Lo mismo es cierto para los requerimientos de calefacción. En las Figuras 4.29a y 4.29b se presentan las contribuciones relativas para los requerimientos de calefacción para el escenario B orientado a  $0^\circ$  y escenario TBA orientado a  $250^\circ$  respectivamente. Mientras que en el primero tanto techo, paredes como infiltraciones y ventilación tienen una relevancia similar, en el segundo las paredes significan solo un 11,6% del total de las cargas de calefacción.

El impacto de los alrededores en los requerimientos térmicos se explica por diferencias en las superficies de la vivienda expuestas al sol y a las condiciones del entorno. Los escenarios tendrán debido a esto diferencias en las ganancias solares y en las pérdidas por la envolvente. En los resultados presentados en la Figura 4.27 se observa claramente el efecto de los alrededores. Para este caso

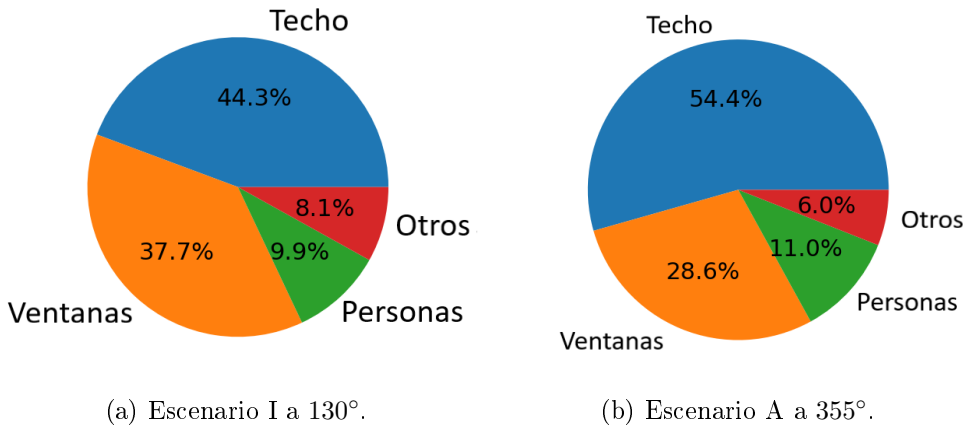


Figura 4.28: Contribuciones relativas a los requerimientos de refrigeración: Escenario I: casa aislada sin sombras. Escenario A: casa apareada sin sombras.

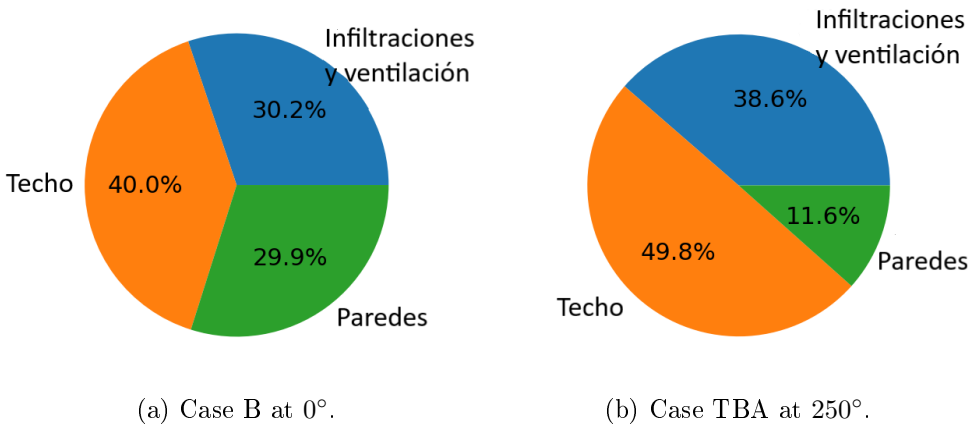


Figura 4.29: Contribuciones relativas a los requerimientos de calefacción: Escenario B: casa aislada con sombra de edificio vecino. Escenario TBA: casa apareada con sombras de árbol y edificio vecino..

se puede ver que la característica que más impacta en los requerimientos es si la casa tiene una fachada apareada, para prácticamente todas las orientaciones los casos apareados tienen menores requerimientos que los no apareados. Esto sólo no se cumple para orientaciones cercanas a  $90^\circ$  (fachada frontal mirando al Este), para las cuales todos los escenarios tienen requerimientos similares.



Respecto a la orientación de la casa, su impacto en los requerimientos se explica principalmente por la posición del sol relativa a las fachadas de la vivienda, y en menor medida a diferencias en las cargas por infiltración y ventilación natural. Debido a esto, la influencia de la orientación en este caso de estudio se analizará a través de las variaciones de las ganancias solares y las cargas de infiltraciones y ventilación natural. En este análisis no se incluye un estudio específico del intercambio de calor por la envolvente, ya que sus variaciones se deberán principalmente a la influencia de las diferencias en las ganancias solares.

Debido a que lo que es favorable durante el período de calefacción es lo opuesto en el período de refrigeración, y que las ganancias solares y las cargas por infiltraciones y ventilación son muy diferentes en dichos períodos, el análisis se realizará por separado para cada período. En este caso el período de refrigeración se define de noviembre a marzo y el de calefacción de mayo a septiembre.

### **Impacto de la orientación y los alrededores en las ganancias solares**

Respecto a la posición del sol, y dado que en el hemisferio sur el recorrido del sol es principalmente en el norte del cielo, las fachadas orientadas al norte capturan más radiación solar directa; especialmente durante el invierno cuando el sol está más bajo en el cielo. Lo opuesto es cierto para las fachadas orientadas al sur. Las fachadas orientadas al este y al oeste capturan más radiación solar directa durante el verano, cuando la altitud solar es mayor. Esto se puede verificar en la Figura 4.30, donde se indica la radiación solar incidente por unidad de área en una pared de acuerdo a su orientación. Estos valores son resultados obtenidos con EnergyPlus utilizando el archivo climático (EPW) correspondiente a Montevideo.

Entonces, de la Figura 4.30 se puede concluir que la dirección norte es la preferida para paredes y ventanas ya que reciben más radiación solar en invierno que en verano. Además, la posición del sol durante el verano permite reducir su impacto con elementos de sombreado como aleros o techo voladizo (como en el caso de estudio). Fachadas orientadas al este y oeste son las peores en términos de requerimientos de refrigeración ya que son las que reciben mayor radiación solar durante el verano, mientras que las fachadas orientadas al sur son las peores durante el período de calefacción ya que no reciben radiación solar directa.

De esta forma, en el caso de estudio la orientación de la fachada frontal tiene efectos opuestos en energía solar capturada por la vivienda. Esto se debe a que la mayor área vidriada de la casa está en la fachada frontal pero el eje

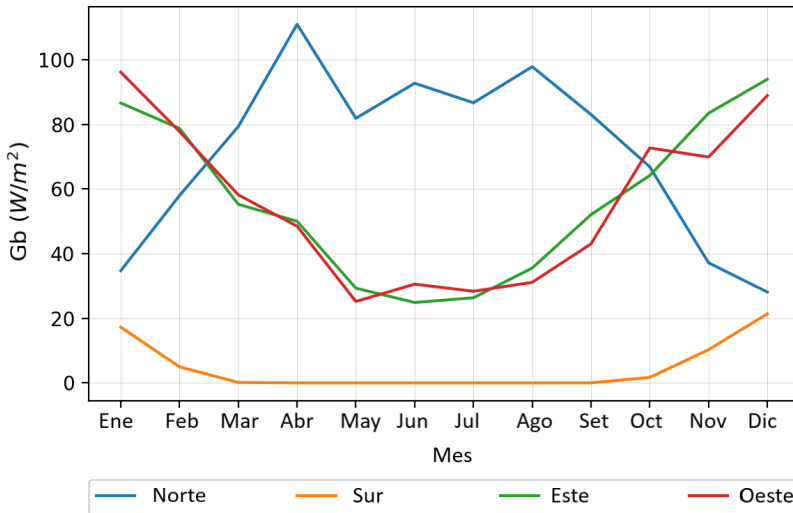


Figura 4.30: Radiación solar incidente en un plano vertical en Montevideo.

largo de la casa es perpendicular a esta, lo que significa que hay mayor masa para absorber radiación solar en la fachada perpendicular a la fachada frontal. Además, para los distintos escenarios están las posibilidades de tener objetos de sombreado y una fachada apareada, lo que afectará a las ganancias solares de distinta forma dependiendo de la orientación. Por todo ello no es fácil predecir la relación entre ganancia solar y orientación para cada escenario, ya que hay varios aspectos que deben ser considerados.

### Período de calefacción

Los requerimientos de calefacción anuales para cada escenario como función de la orientación de la fachada frontal se presentan en la Figura 4.31. Cuando se comparan los escenarios sin aparear (I, T y B) con los apareados (A y TBA), no sólo varían los valores sino también los patrones generales. Los casos no apareados presentan los menores requerimientos a  $0^\circ$  y aumentan con la orientación de la fachada frontal hasta alcanzar el pico a  $225^\circ$ . Por otro lado, los escenarios apareados tienen su máximo relativo a  $105^\circ$  el A y  $115^\circ$  el TBA, y el mínimo se da a  $325^\circ$  en el escenario A y a  $280^\circ$  en el escenario TBA.

Algo similar ocurre con las ganancias solares durante el período de calefacción, las cuales se presentan en la Figura 4.32. Su relación con la orientación es bien diferente en los escenarios apareados respecto a los no apareados. Mien-

#### 4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA UN ARQUETIPO Y REGIÓN127

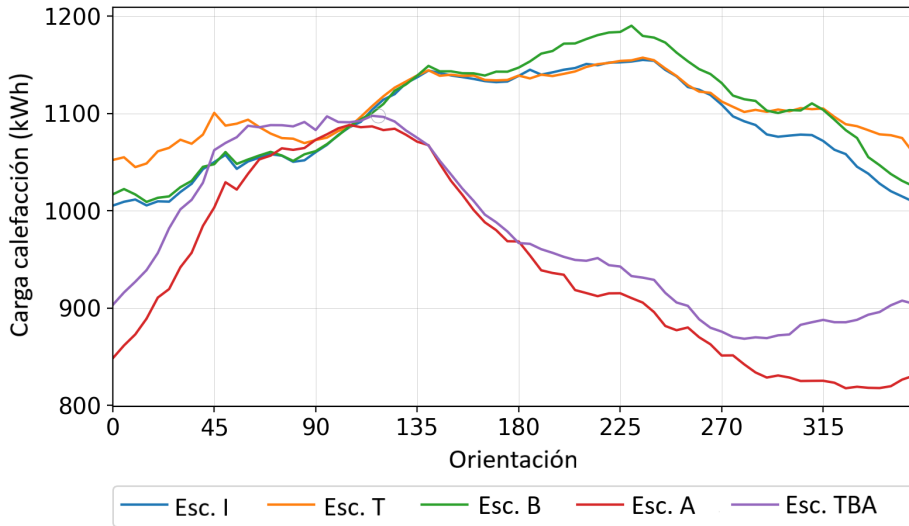


Figura 4.31: Requerimientos de calefacción anuales.

tras que en los escenarios apareados se observan variaciones importantes, de hasta 23 %, esto no es así para los no apareados donde las variaciones no llegan a 6 %.

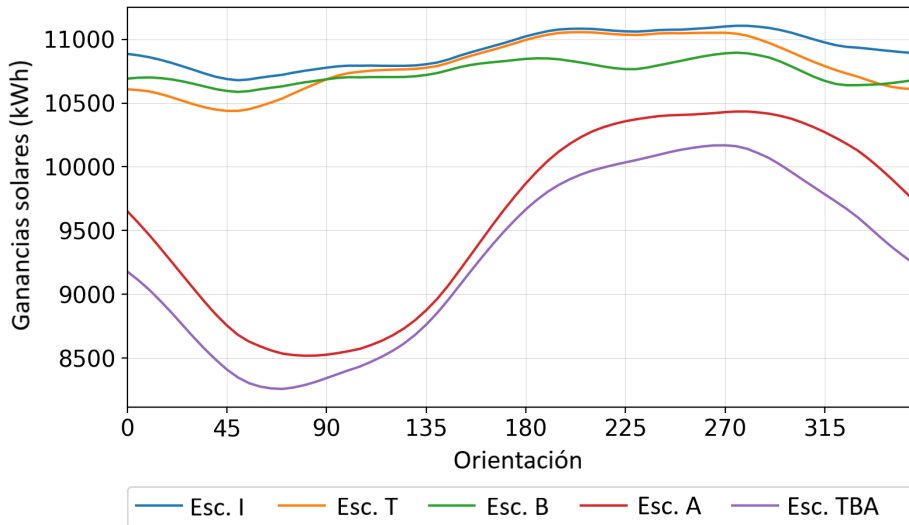


Figura 4.32: Ganancias solares durante el período de calefacción.

Teniendo en cuenta las grandes diferencias observadas en las Figuras 4.31 and 4.32 los escenarios no apareados y apareados se analizarán por separado. Por simplicidad el escenario I (geometría aislada) será utilizado para analizar los del primer tipo, mientras que el escenario A (la geometría apareada sin sombras) será la elegida para los casos del segundo grupo.

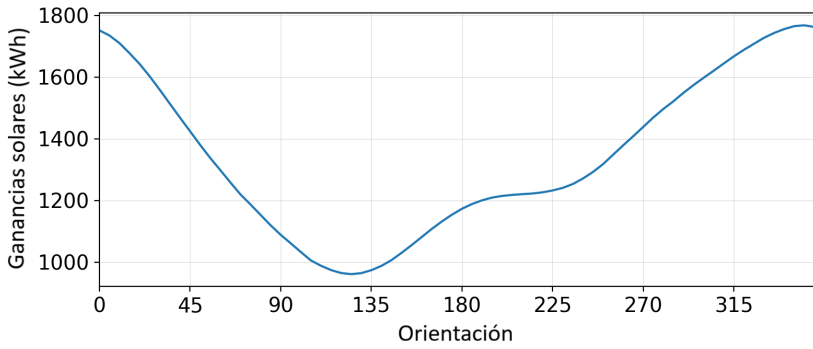
Las ganancias de calor por cada componente y el total resultante durante el período de calefacción para el escenario I se muestran en la Figura 4.33. Al contrastar las Figuras 4.33a y 4.33b se puede observar que la orientación tiene efectos opuestos para las ganancias por las ventanas y por las paredes. Mientras que la radiación solar transmitida por las ventanas alcanza su valor máximo para orientaciones cerca de la norte y presenta sus valores más bajos para orientaciones sud-este, lo opuesto es cierto para la radiación solar absorbida por las paredes.

Los patrones del gráfico de la Figura 4.33a se deben a que la mayor área vidriada de la casa se da en la fachada frontal, mientras que la fachada ubicada anti-horaria respecto a la frontal no tiene ninguna ventana. Por lo tanto, cuando la casa está orientada al norte la mayor área vidriada apunta al norte y cuando la casa está orientada al este no hay área vidriada orientada al norte. Además, a  $125^\circ$ , no sólo no hay prácticamente área vidriada orientada al norte, si no que también la fachada con mayor área vidriada apunta al sur, minimizando las ganancias solares por las ventanas.

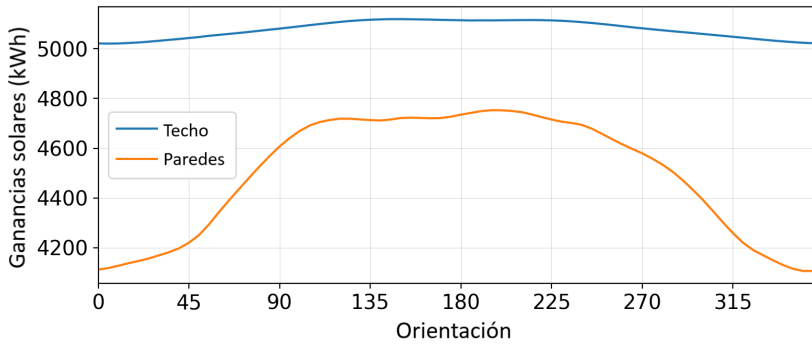
Para ilustrar estas diferencias, la radiación solar transmitida a través de las ventanas durante el medio día del 21 de Junio se presenta en la Figura 4.34 para las dos orientaciones extremas. En ese momento, para la casa orientada a  $0^\circ$  (Figura 4.34a), el sol da directamente a las ventanas más grandes que se encuentran en la sala de estar y en uno de los dormitorios. En cambio, para la casa orientada a  $125^\circ$  (Fig. 4.34b), la radiación solar directa sólo alcanza la ventana del otro dormitorio y con un ángulo incidente de  $55^\circ$ .

Por otro lado, las ganancias solares en las paredes son máximas (y muy similares) para las orientaciones de  $95^\circ$  a  $265^\circ$ , y mínimas a  $0^\circ$  como se puede observar en la Figura 4.33b. Esto evidencia que el voladizo del techo es lo que más impacta en las ganancias solares por las paredes, más que la orientación del eje largo de la casa. Cuando la fachada frontal mira al norte (orientación= $0^\circ$ ), el voladizo la sombrea, y cuando mira al sur (orientación= $180^\circ$ ) el voladizo no tiene efecto ya que no hay radiación solar directa en la fachada frontal. También hay que considerar que la planta de la casa no es exactamente un rectángulo ya que la pared frontal de la sala de estar no está alineada a la del dormitorio contiguo (ver Fig. 4.23). Esto resulta en aún más sombreado en la pared frontal del dormitorio cuando la casa está orientada a  $0^\circ$ . Además, al

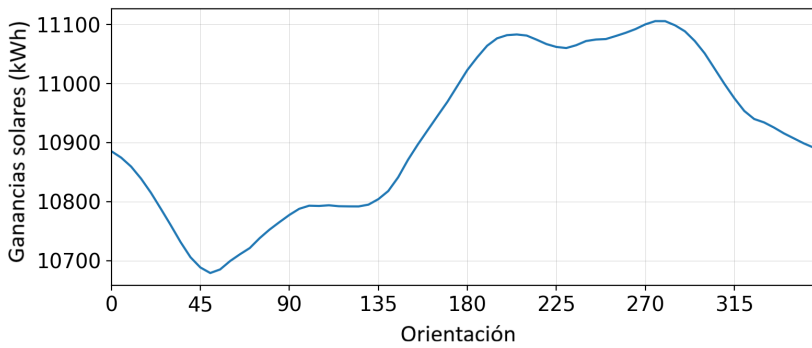
4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA UN ARQUETIPO Y REGIÓN129



(a) Ventanas.



(b) Techo y paredes.



(c) Total.

Figura 4.33: Ganancias solares durante el período de calefacción para el escenario I.

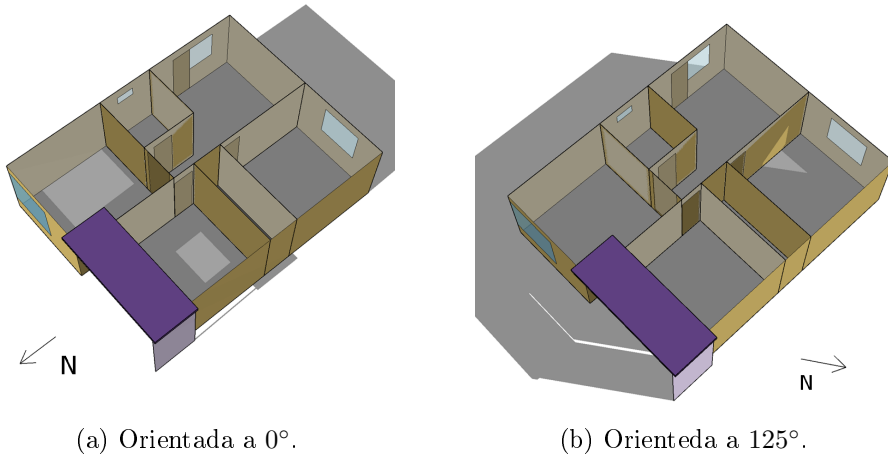


Figura 4.34: Radiación solar transmitida por las ventanas para las orientaciones  $0^\circ$  y  $125^\circ$  para el mediodía del 21 de Junio para el escenario I.

tener la mayor área vidriada la fachada frontal es la que tiene menos masa de pared, lo que también contribuye a que el mínimo de radiación absorbida se dé cuando dicha fachada está orientada al norte.

Los efectos del voladizo y de la geometría de la planta para la orientación  $0^\circ$  se pueden observar en la Figura 4.35. Estas Figuras también corresponden al 21 de junio pero para las 10:00 hs (Figura 4.35a) y para las 15:00 hs (Figura 4.35b). Se puede observar que la fachada frontal está parcialmente sombreada durante todo el día. Durante la mañana se debe a ambas cosas, el voladizo y la pared lateral de la sala de estar, mientras que durante la tarde se debe únicamente al voladizo y su soporte.

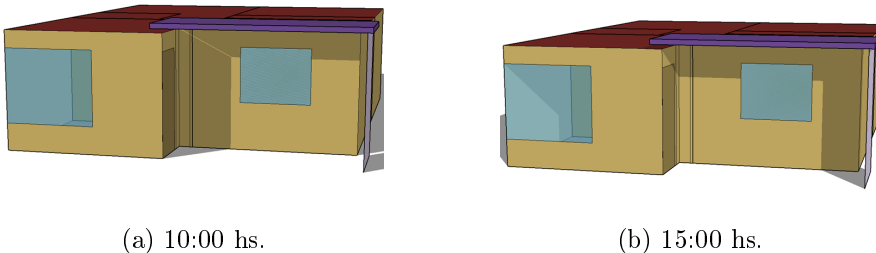


Figura 4.35: Sombras en la fachada frontal para el escenario I a  $0^\circ$ .

Las ganancias solares en el techo son la más altas para cualquier orientación (ver Figura 4.33b). Estas ganancias no dependen de la orientación de la casa ya que es una superficie horizontal, de todas formas se observan leves variaciones debido a que el voladizo está a una altura mayor y termina generando cierta sombra sobre el techo cuando está orientado al norte.

Finalmente, en la Figura 4.33c se presentan las ganancias solares totales para el escenario I, que alcanza su máximo a  $280^\circ$  y su mínimo a  $50^\circ$ . Como consecuencia de las variaciones opuestas de las ganancias por las ventanas y paredes, y a las casi nulas variaciones de las ganancias del techo, que son las mayores, la dependencia de las ganancias solares totales con la orientación es más sutil que la de paredes y ventanas por separado. Mientras que para ventanas y paredes las variaciones alcanzan 84% y 16% respectivamente, para las ganancias totales la variación máxima es de 4,5%. Esto explica los comportamientos observados en la Figura 4.32 para los casos no apareados.

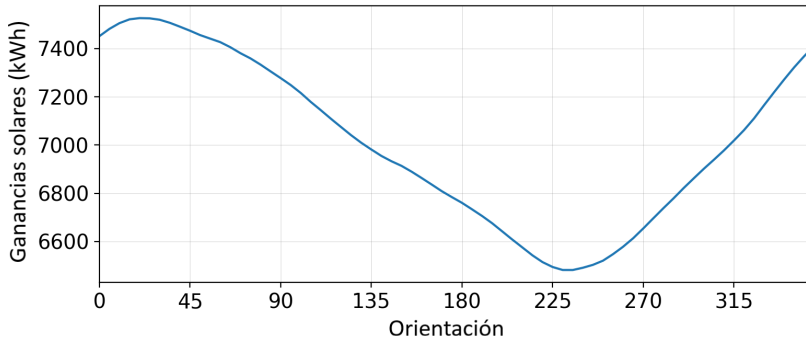
Sin embargo, la relación entre ganancias solares totales y orientación de la Figura 4.33c no parecen correlacionarse con los requerimientos de calefacción presentados en la Figura 4.31 para el escenario I. Por ejemplo, a  $225^\circ$  las ganancias solares son mayores que para  $0^\circ$  pero también los son los requerimientos de calefacción. Esto se debe a que los requerimientos de calefacción fueron considerando solamente para las áreas ocupadas. Dado que en el caso de estudio las áreas ocupadas son solamente el estar y los dormitorios, las orientaciones más favorables serán aquellas que aprovechen las ganancias solares en esas zonas.

Para visualizar esto, en la Figura 4.36a se presentan las ganancias solares para el estar y los dormitorios. En este caso, al comparar estas ganancias con los requerimientos de calefacción de la Figura 4.31, la relación entre ambas es notoria. La diferencias entre las orientaciones con mejor y peor comportamiento en cada gráfico se deben a que los cronogramas de ocupación no se consideraron en la Figura 4.36a, donde se muestran las ganancias solares totales en el estar y en los dormitorios. Sabiendo que durante el día principalmente se ocupa el estar, es de esperar que la orientación de menores requerimientos de calefacción será algo entre medio de las que maximizan las ganancias en las zonas ocupadas como un todo y aquellas que maximicen las ganancias sólo en el estar (ver Figura 4.36b)<sup>2</sup>

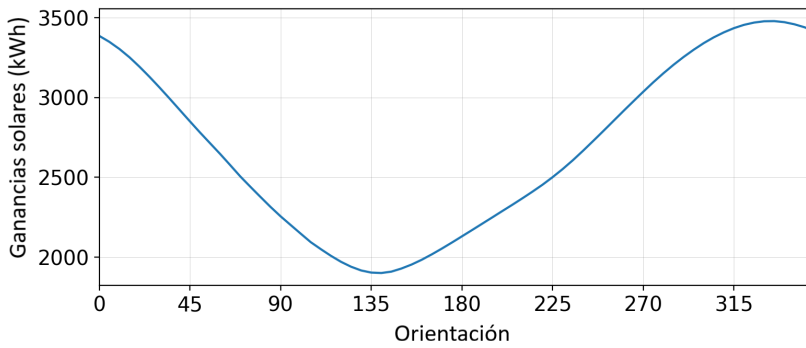
Las cargas de calefacción de los demás escenarios no apareados varían de manera similar que el escenario I. El escenario T tienen mayores requerimientos que el caso I en orientaciones que van de  $270^\circ$  a  $90^\circ$  que es cuando el árbol genera sombra en la ventana y pared del estar. La mayor diferencia se da a  $355^\circ$  que es cuando el árbol está prácticamente al norte de la fachada del estar

---

<sup>2</sup>Nótese que en las Figuras 4.36a y 4.36b se tienen escalas diferentes para las ordenadas.



(a) Estar y dormitorios.



(b) Estar.

Figura 4.36: Ganancias solares en las zonas ocupadas durante el período de calefacción para el escenario I.

y los requerimientos de calefacción del caso T son superiores a los del caso I en un 6%. Por otro lado, el escenario B tiene mayores requerimientos para orientaciones en las cuales las sombras tienen más impacto en las ganancias solares de la pared lateral del estar y de las ventanas del baño y la cocina. Esas orientaciones van de  $160^\circ$  a  $20^\circ$ , y la máxima diferencia entre los casos I y B se da a  $225^\circ$ , donde los requerimientos para el escenario B son un 3% más grandes que para el escenario I.

Para los casos apareados, como hay menos área expuesta, las ganancias solares serán menores pero también las pérdidas por las paredes. Dado que en el período de calefacción las pérdidas superan las ganancias, es razonable pensar que los escenarios apareados tendrán menores requerimientos de calefacción que los no apareados. Observando la Figura 4.31, se puede concluir que esta



afirmación es cierta para cada orientación excepto para orientaciones cercanas a  $90^\circ$ , donde la fachada apareada está al norte, situación en la cual las ganancias solares no aprovechadas debido a estar apareada son mayores que la reducción de las pérdidas por esa misma razón.

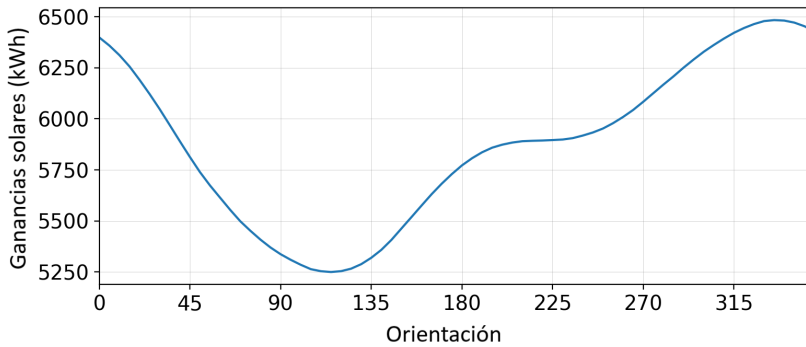
Por lo tanto, los casos apareados se comportan mejor para orientaciones donde la fachada apareada apunta aproximadamente al sur (alrededor de  $270^\circ$ ), donde la radiación solar incidente no aprovechada en esa fachada es muy baja. Por otro lado, las peores orientaciones son con la fachada apareada apuntando aproximadamente al norte, donde la radiación solar no aprovechada es muy relevante. Sin embargo, para relacionar ganancias solares con requerimientos térmicos debe tenerse en cuenta la ocupación de las zonas de la casa. Para incluir esto en el análisis, en la Figura 4.37a se presentan las ganancias solares para el estar y los dormitorios para el escenario A durante el período de calefacción, mientras que las ganancias sólo del estar se presentan en la Figura 4.37b. Comparando estos gráficos con los de la Figura 4.36 se puede notar que mientras que las ganancias solares en las zonas ocupadas son algo menores en el caso apareado, en el estar son iguales. Esto es razonable ya que la fachada apareada solo afecta a paredes de los dormitorios.

Una vez más las variaciones de las ganancias solares en las zonas ocupadas explican los comportamientos de los requerimientos de calefacción. Las ganancias solares máximas en las zonas ocupadas son para la orientación  $325^\circ$ , que corresponde a la orientación con menores requerimientos de calefacción. Las ganancias solares mínimas por otro lado se dan a  $110^\circ$ , orientación que presenta el mayor requerimiento de calefacción (ver Figura 4.31). Por lo tanto, para ambos escenarios, casa apareada y no apareada, la posición de las zonas ocupadas relativa al recorrido del sol termina siendo un factor clave para explicar el impacto de las ganancias solares en los requerimientos de calefacción.

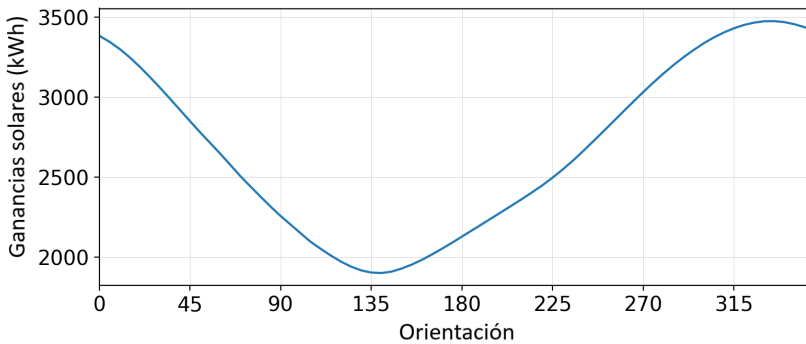
### Período de refrigeración

En la Figura 4.38 se presentan los requerimientos anuales de refrigeración como función de la orientación y el escenario. A diferencia que en el período de calefacción, en este período los distintos escenarios varían de forma similar. Esto se debe a que durante el período de refrigeración la altitud del sol es mayor, y por lo tanto la contribución de las paredes y ventanas al total de las ganancias solares pierden relevancia en comparación con las del techo.

Para todos los escenarios, la orientación que minimiza la carga de refrigeración es cercana a  $175^\circ$ , mientras que la que la maximiza es alrededor de  $305^\circ$ . Al igual que para el período de calefacción, los escenarios de casa apareada se comportan mejor que los de casa no apareada, exceptuando las orientaciones



(a) Estar y dormitorios.



(b) Estar.

Figura 4.37: Ganancias solares en las zonas ocupadas durante el período de calefacción para el escenario A.

de  $230^\circ$  a  $290^\circ$ , que es cuando la fachada apareada apunta aproximadamente al sur.

Las ganancias solares durante el período de refrigeración se presentan en la Figura 4.39. Comparando este gráfico con el de la Figura 4.32 se puede notar que las ganancias solares son mucho mayores durante este período, lo cual es razonable ya que también lo es la radiación solar incidente. Además, se observan diferencias en la dependencia con la orientación, especialmente para los escenarios de casa apareada. Como se mencionó, estas se deben a la diferencia del recorrido del sol en ambos períodos; como en verano la altitud solar es mayor, que la fachada apareada apunte al norte tiene menos impacto que durante el invierno.

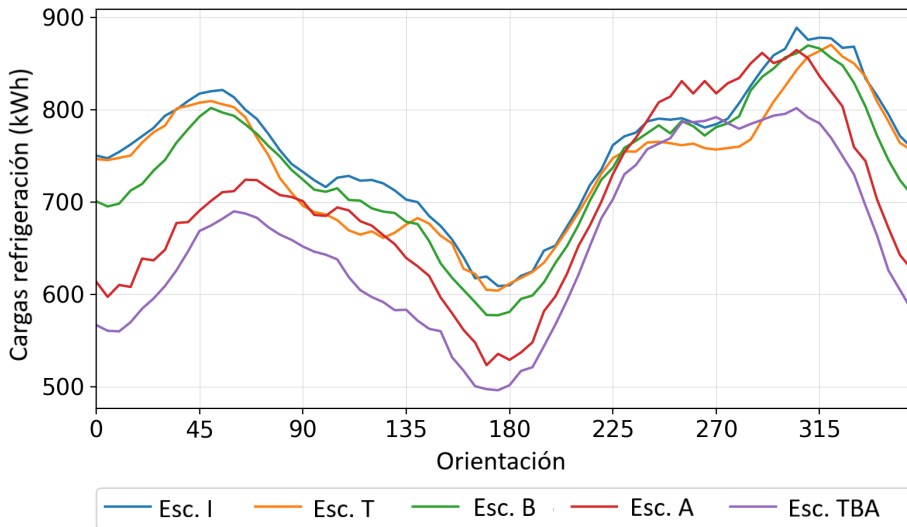


Figura 4.38: Requerimiento de refrigeración anual.

De manera similar que para el período de calefacción, las ganancias solares en los escenarios apareado dependen más fuertemente de la orientación que los no apareados (ver Figura 4.39). Una vez más, estas ganancias solares no explican la relación entre los requerimientos de refrigeración y la orientación ya que no se observa correlación entre estas ganancias y los comportamientos de la Figura 4.38, especialmente para los escenarios de casa no apareada.

En la Figura 4.40a se presentan la variación de las ganancias solares con la orientación exclusivamente para las zonas ocupadas. Ahora sí se puede observar cierta relación entre requerimientos y ganancias solares, aunque aún se observan diferencias para orientaciones alrededor de oeste, donde los requerimientos son tan altos como para las orientaciones cercanas a la este pero las ganancias solares no lo son. Nuevamente, estas diferencias se deben a que se están observando las ganancias totales para estar y dormitorios, mientras que los requerimientos consideran el cronograma de ocupación de las zonas.

Por lo tanto, una vez más, las ganancias solares en el estar tendrán un mayor impacto en los requerimientos de refrigeración que aquellos en los dormitorios, ya que es la zona ocupada durante las horas de alta irradiación solar. Las ganancias solares en el estar en el escenario I (Figura 4.40b), se observa que son mayores para orientaciones alrededor de oeste, lo cual es la causa de que los requerimientos de refrigeración para esas orientación también sean altas.

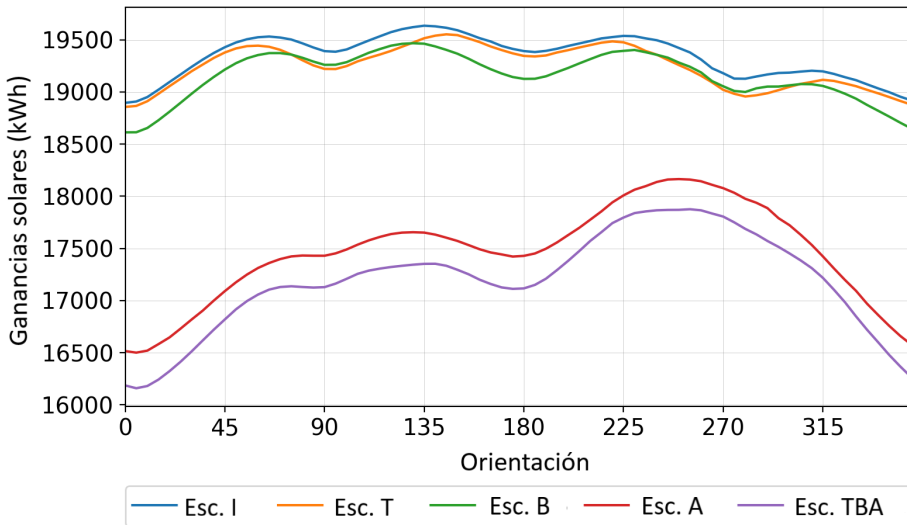
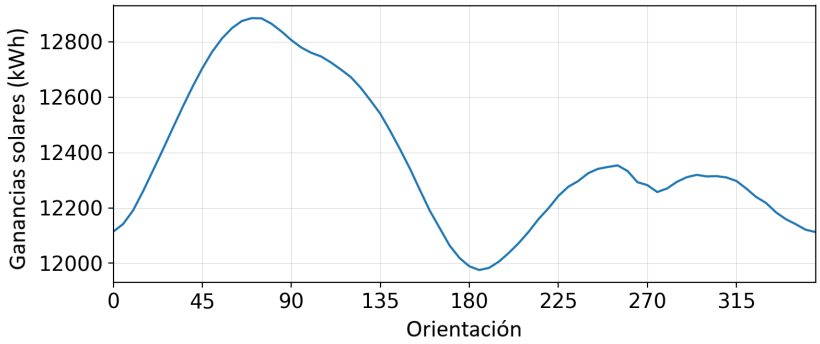


Figura 4.39: Ganancias solares durante el período de refrigeración.

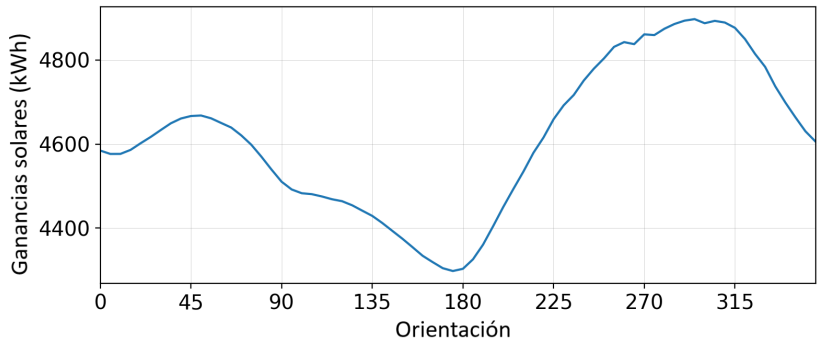
Al igual que en el análisis para los escenarios de casa apareada, se obtuvieron también las ganancias para el escenario A exclusivamente para las zonas ocupadas las cuales se presentan en la Figura 4.41. Estos gráficos tienen los mismos patrones que los requerimientos de refrigeración, orientaciones con mayor ganancia solar se corresponden con mayores requerimientos de refrigeración.

Entonces, para ambos períodos las variaciones de las ganancias solares con la orientación pueden explicarse por la posición relativa del sol respecto a las paredes expuestas, ventanas y objetos de sombreado. Sin embargo, cuando se quiere relacionar las ganancias solares con los requerimientos térmicos, deben considerarse también los cronogramas de ocupación.

En resumen, con el objetivo de entender el impacto de la orientación en el comportamiento térmico de la vivienda, no sólo deben analizarse las ganancias solares sino también los patrones de uso de las distintas zonas térmicas. Estos aspectos de uso incluso son el aspecto clave a la hora de relacionar las ganancias solares con los requerimientos de calefacción y refrigeración. Cabe destacar que esto se observa en el presente estudio ya que se utilizó como hipótesis que solamente las habitaciones ocupadas son acondicionadas para lograr el confort, lo cual es razonable teniendo en cuenta que el confort térmico solo tiene sentido en presencia de personas.



(a) Estar y dormitorios.

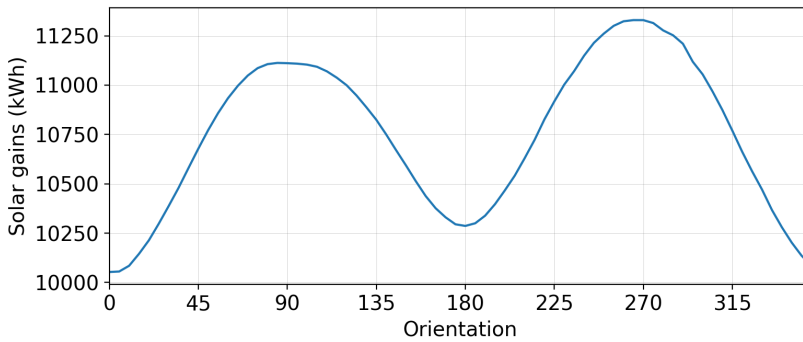


(b) Estar.

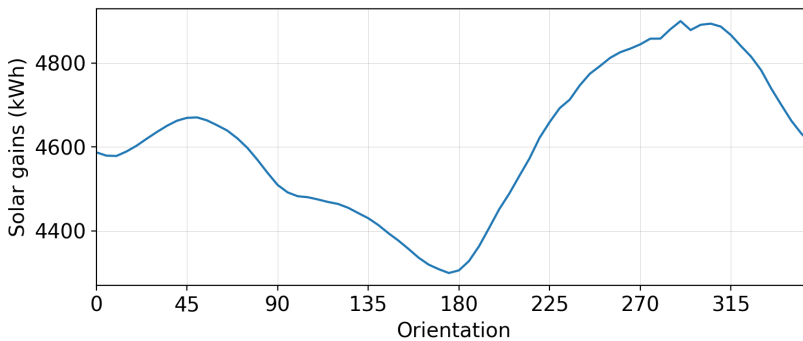
Figura 4.40: Ganancias solares en zonas ocupadas durante el período de refrigeración para el escenario I.

### Impacto de la orientación y los alrededores en las pérdidas por infiltraciones y ventilación

Las cargas de infiltración y ventilación dependen de los flujos máscicos de aire que entran (y salen) de la vivienda a través de las grietas y aberturas, y de la diferencia de temperaturas entre las zonas térmicas y el ambiente exterior. Analizar cómo estas cargas varían con la orientación y sus alrededores es muy complejo ya que hay varios aspectos que deben considerarse. Primero, se tiene que los flujos máscicos varían con la orientación y los alrededores ya que dependen de los perfiles de velocidad local. También, pueden haber variaciones en la diferencia de temperatura por variaciones de la temperatura interna, ya que para distintos escenarios y orientaciones se tienen distintas temperaturas, especialmente en las zonas que no se acondicionan. Además, estas variacio-



(a) Estar y dormitorios.



(b) Estar.

Figura 4.41: Ganancias solares en zonas ocupadas durante el período de refrigeración para el escenario A.

nes de temperatura pueden ocasionar una operación de apertura de ventanas distinta en distintos escenarios, lo que tendrá un gran impacto en los flujos máxicos de ventilación natural. Finalmente, debe mencionarse que la versión de EnergyPlus utilizada en este proyecto no permite diferenciar entre infiltración y ventilación natural. Esto dificulta identificar las razones que generan las variaciones en las cargas de infiltración y ventilación, ya que pueden atribuirse a cambios en los perfiles de velocidad relativa, en la temperatura de las zonas o en el accionar de los ocupantes sobre la apertura de ventanas.

Teniendo en cuenta esto, para realizar el análisis se estudiaron casos simplificados con el objetivo de aislar los distintos efectos y entender el impacto de cada uno y su posible peso en la combinación de todos ellos. En las siguientes secciones se presentan las distintas etapas del análisis. Primero, el estudio se

limitó a las variaciones del flujo másico debido a infiltraciones, luego lo mismo se realizó para el flujo másico debido a la ventilación natural. A continuación, se presentan las diferencias en la operación de las ventanas. Finalmente, los resultados para el caso original se presentan y relacionan con los aspectos estudiados.

#### *Flujo másico por infiltraciones*

El flujo másico por infiltraciones es una función de la diferencia de presión a través de las grietas, donde la presión exterior depende de la geometría de la vivienda y de la velocidad del viento y su dirección relativa a las fachadas. Por lo tanto, sabiendo que el perfil de viento de Montevideo tiene direcciones preferenciales, con mayores velocidades o mayor frecuencia, es de esperar que el flujo másico de infiltración varíe con la orientación de la vivienda. La presencia de obstrucciones en los alrededores también afectan a las infiltraciones. Sin embargo, el modelo de EnergyPlus utilizado no considera el impacto de los alrededores en la velocidad de viento ni en los coeficientes de presión sobre las fachadas, por lo que el análisis se enfocará en el impacto de la orientación.

Para una dirección de viento dada, a mayor velocidad mayores serán las infiltraciones. El impacto de la dirección por otro lado no es obvio, ya que depende de la geometría de la vivienda y de las características de las grietas y su distribución. Por lo tanto, para analizar el efecto de la dirección se realizó una simulación de un período de un año para la geometría del caso de ejemplo en el cual el módulo de la velocidad de viento se fijó en 5 m/s, mientras que los valores de dirección se dejaron sin modificar en el EPW correspondiente a Montevideo<sup>3</sup>. De esta forma, se aísla el efecto de la dirección del viento y se puede analizar su impacto en las infiltraciones de la vivienda. Como el objetivo en esta simulación es estudiar las infiltraciones, todas las aberturas exteriores se mantienen cerradas en todo el período de simulación.

Los resultados obtenidos de renovación de aire como función de la dirección del viento se presentan en la Figura 4.42, donde cada punto corresponde a una hora del año. Se puede notar que las infiltraciones son máximas para direcciones de 0° a 55° relativo a la fachada frontal, alcanzan un mínimo relativo en 90°, un máximo relativo en 130° y presentan sus valores más bajos para direcciones de 270° relativo a la fachada frontal. Para analizar este gráfico se deben considerar principalmente dos aspectos: la distribución de grietas en la envolvente de la casa y la variación de los coeficientes de presión con la dirección del viento.

El primer aspecto se puede observar en la Figura 4.43, donde se muestra la geometría del caso estudiado con las aberturas resaltadas. Los perímetros de

---

<sup>3</sup>Dado que el EPW contiene datos horarios de direcciones de viento, un año de simulación debe ser suficiente para cubrir todas las direcciones.

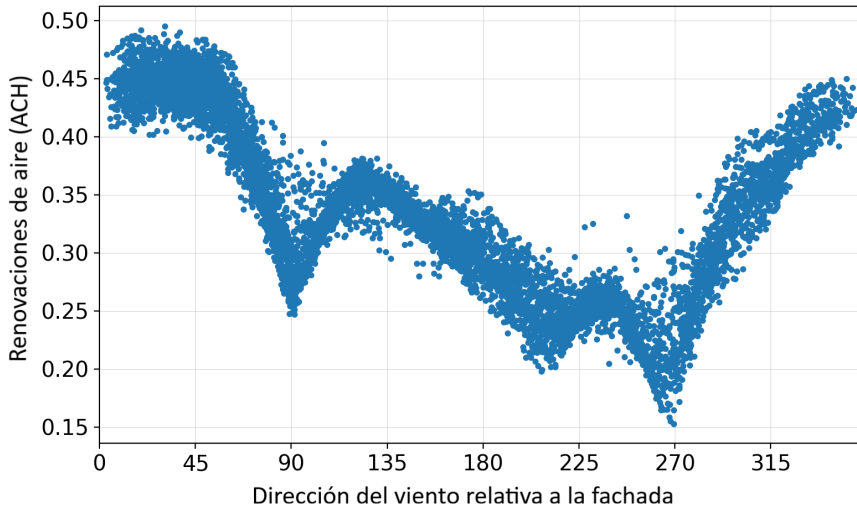


Figura 4.42: Renovación de aire debido a infiltraciones en función de la dirección para una velocidad de viento de 5 m/s.

las aberturas son 17,3m en la fachada frontal, 11,2m en la fachada ubicada a  $90^\circ$ , 5m en la fachada trasera y no hay aberturas en la fachada ubicada a  $270^\circ$ . El segundo aspecto se puede analizar calculando el coeficiente de presión en cada fachada (ver Eq. 3.10) sabiendo que el flujo másico dependerá de la diferencia entre esos coeficientes de presión ( $\Delta C_p$ ) a través de cada grieta de entrada y salida.

Dado que en el caso estudiado las grietas se ubican a lo largo del perímetro de cada abertura y también en el techo, los  $C_p$  relevantes son aquellos en las fachadas a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $180^\circ$  y en el techo. Estos  $C_p$  se muestran en la Figura 4.44a como función de la dirección del viento relativa a la fachada principal. Además, en la Figura 4.44b se presenta el  $\Delta C_p$  medio, el cual se calcula ponderado el peso de cada elemento relativo al  $C_Q$  correspondiente por medio de la siguiente Ecuación:

$$\Delta C_p = \frac{\sum_n (C_{p,n} - C_{p,i}) C_{Q,n}}{\sum_n C_{Q,n}} \quad (4.2)$$

donde  $n$  representa cada fachada en la cual hay grietas y  $C_{p,i}$  es el coeficiente de presión interior, el cual para este análisis fue aproximado como el promedio ponderado de los coeficientes exteriores ( $C_{p,i} = \frac{\sum_n C_{p,n} C_{Q,n}}{\sum_n C_{Q,n}}$ ). Los coeficientes  $C_Q$  se determinan para cada fachada y para el techo de acuerdo a la distribución



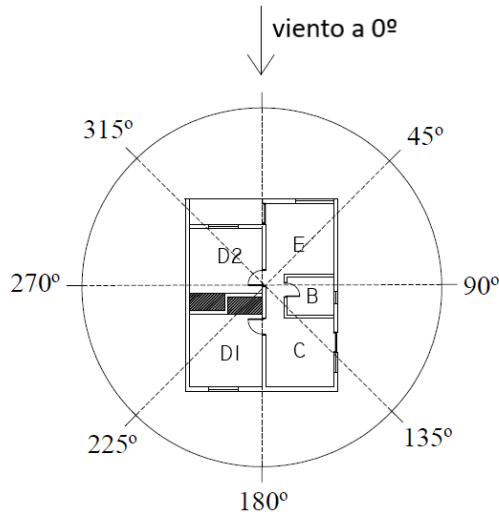


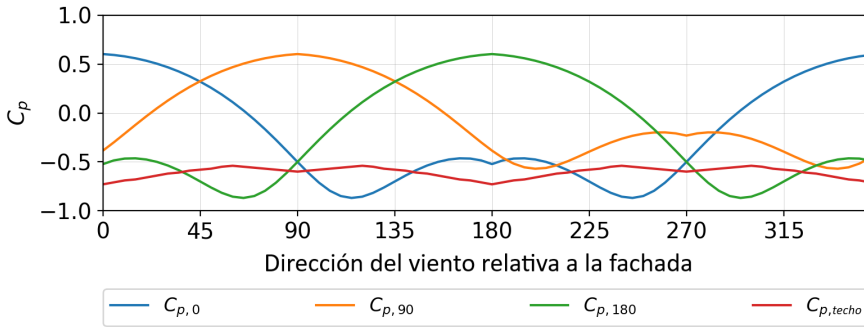
Figura 4.43: Geometría de la casa y ubicación de las aberturas para velocidades de viento relativas a la fachada frontal.

de aberturas observada en la Figura 4.43 y en las características de dichas aberturas y el techo presentadas en las Tablas 4.9 y 4.10.

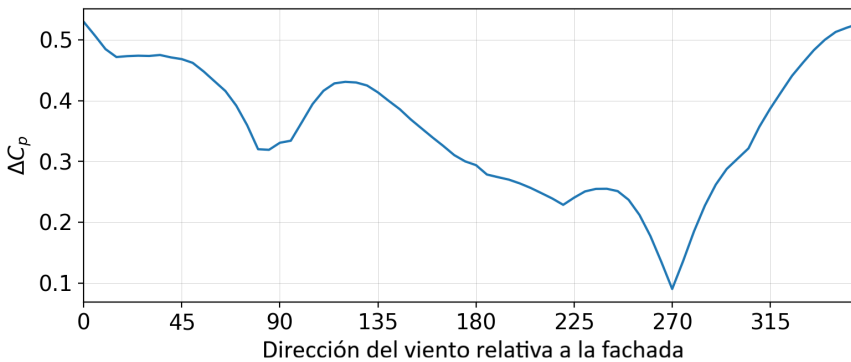
En la Figura 4.44b se puede observar que la renovación de aire presentada en la Figura 4.42 varía con la dirección de viento de acuerdo a la variación del  $\Delta C_p$  medio que se definió. Esto muestra que los flujos máscicos de aire debido a infiltraciones dependen de la dirección del viento y que dicha dependencia la define la ubicación y característica de las grietas.

Finalmente, con el fin de completar el análisis, el mismo caso fue simulado con todas las ventanas cerradas variando la dirección de la casa y para el archivo climático original (esto es con el modulo de la velocidad de viento sin fijar). De esta forma, y sabiendo como varía el flujo máscico de infiltraciones con la dirección y velocidad de viento, los valores obtenidos de renovación de aire pueden relacionarse con el perfil de viento original.

La renovación de aire anual promedio como función de la orientación de la casa resultante de las simulaciones se presenta en al Figura 4.45. Dado que las infiltraciones dependen tanto de la dirección como de la velocidad de viento, y que los coeficientes de presión varían con el cuadrado de la velocidad, el perfil de viento del EPW se representa en la Figura 4.46 como una rosa de viento donde el valor del radio es calculado como la frecuencia relativa de cada



(a) Coeficientes de presión en las fachadas relevantes.



(b) Promedio ponderado de las diferencias de coeficientes de presión.

Figura 4.44: Variación de los coeficientes de presión.

dirección multiplicada por el cuadrado de la velocidad media en cada dirección particular. El resultado luego se normalizó.

La relación entre renovación de aire media anual y la orientación de la casa se puede explicar por cómo las infiltraciones varían con el viento incidiendo en la distintas fachadas (Figura 4.42) y los vientos más (y menos) frecuentes del año (Figura 4.46). Por ejemplo, en la Figura 4.42 se observa que algunos máximos de infiltraciones ocurren a direcciones de viento de  $50^\circ$  relativo a la fachada frontal; para la casa orientada a  $100^\circ$ , esto ocurrirá para direcciones de viento de  $150^\circ$  que es de hecho la dirección de mayor frecuencia en la rosa de los vientos (Figura 4.46). Para vientos alrededor de  $130^\circ$  relativo a la casa también se aprecian valores elevados de renovación de aire en la Figura. 4.42. Para una casa orientada a  $100^\circ$ , esto se corresponde a una dirección de viento absoluta de cerca de  $230^\circ$  donde hay también vientos relevantes de acuerdo a la Figura 4.46.

#### 4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA UN ARQUETIPO Y REGIÓN143

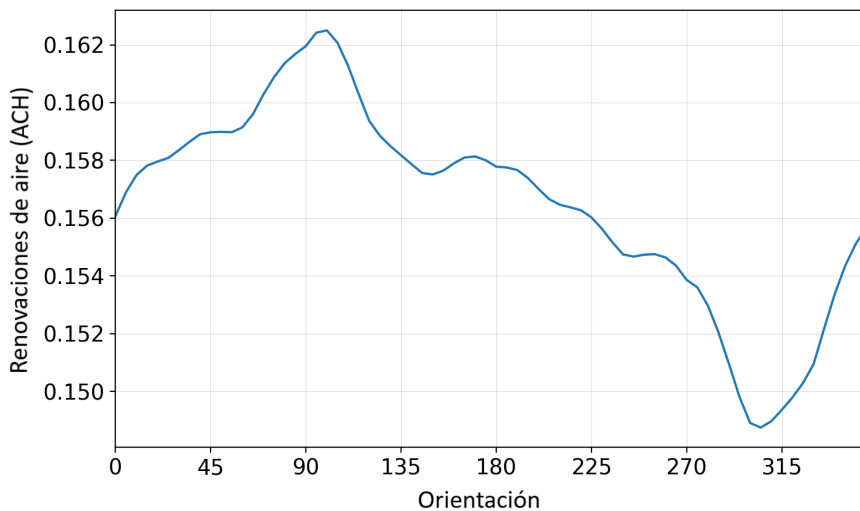


Figura 4.45: Renovación de aire anual promedio.

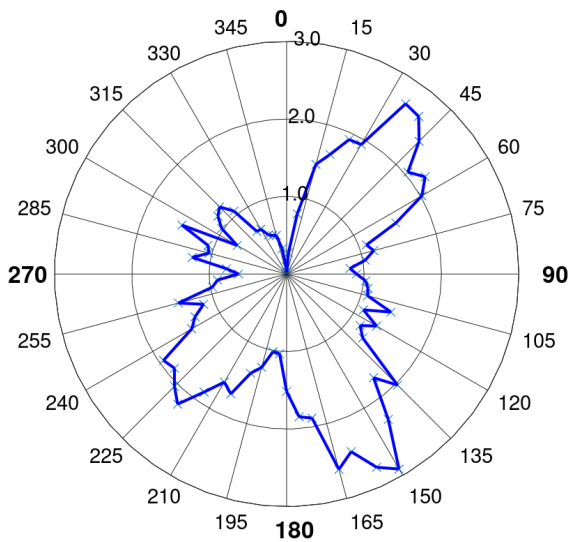


Figura 4.46: Rosa de viento para frecuencia de la dirección multiplicado por el cuadrado de la velocidad.

Finalmente, si los valores mínimos de la Figura 4.42 se convierten en valores absolutos de dirección de viento se observa que para una casa orientada a  $100^\circ$ , estos estarán alrededor de  $10^\circ$  y  $300^\circ$ , valores para los cuales se tiene muy poco viento (Figura 4.46). Por lo tanto, parece razonable que la casa orientada a  $100^\circ$  presente valores elevados de infiltraciones.

Por otro lado, para una casa orientada a  $305^\circ$  las infiltraciones máximas vendrán de direcciones alrededor de  $355^\circ$  y, aunque algo menores, a  $75^\circ$  (estas se corresponden a direcciones relativas de  $50^\circ$  y  $130^\circ$ , que son las que presentan las mayores infiltraciones de acuerdo a la Figura 4.42). Observando la rosa de los vientos, esas son las direcciones con la menor frecuencia de viento. Por el contrario, las infiltraciones mínimas estarán relacionadas a direcciones alrededor de  $215^\circ$  y  $145^\circ$  ( $270^\circ$  y  $200^\circ$  en términos relativos a la fachada frontal de la casa) que son las direcciones de viento más relevantes en la Figura 4.46. Por lo tanto es razonable que la casa orientada a  $305^\circ$  sea la que presente las menores infiltraciones anuales.

En resumen, la relación entre renovación de aire debido a infiltraciones y la orientación de la casa es la que se muestra en la Figura. 4.45. Los patrones del gráfico se pueden entender relacionando las diferencias de los coeficientes de presión y la distribución de las aberturas en la envolvente, junto con el perfil de velocidad local utilizado para la simulación.

### ***Flujo másico de ventilación***

A continuación se analiza la renovación de aire debido a ventilación natural de manera análoga que para las infiltraciones. Una vez más, el impacto de la velocidad de viento en la renovación de aire es muy claro (a mayor velocidad, mayor renovación de aire) mientras que el impacto de la dirección de viento es más compleja y depende fuertemente de la ubicación de las ventanas y sus áreas. Primero, con el objetivo de aislar el efecto de la dirección, se realizó una simulación anual dejando fija la velocidad de viento (a  $5\text{m/s}$ ) pero dejando que la dirección varíe como en el EPW original. Como el objetivo es analizar la ventilación, se estableció que todas las ventanas se mantuvieran abiertas todo el tiempo.

El resultado de las renovaciones de aire por hora en función de la dirección del viento se presenta en la Figura 4.47, donde cada punto corresponde a una hora del año. La ventilación máxima se da a direcciones alrededor de  $0^\circ$  y  $120^\circ$  relativas a la fachada frontal, y se tiene también un máximo relativo a  $240^\circ$ . Los mínimos se dan a direcciones alrededor de  $270^\circ$  y  $90^\circ$  (ver Figura 4.47). Al comparar este gráfico con el de la Figura 4.42 se puede observar que la dependencia con la dirección de la renovación de aire debido a ventilación natural y la debido a infiltraciones son muy diferentes. También, y más importante, se

observa que las renovaciones debido a ventilación son muy superiores a las de infiltraciones, hasta cien veces mayores.

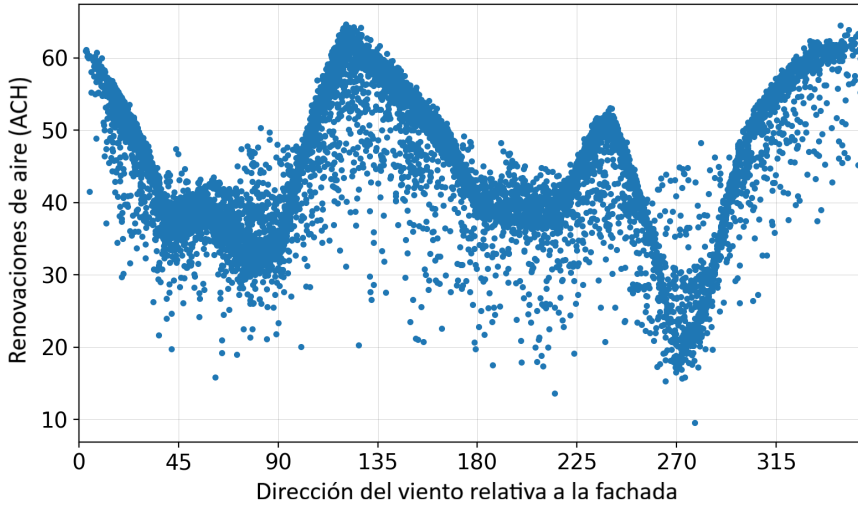


Figura 4.47: Renovación de aire por hora debido a ventilación con velocidad de viento fija (5 m/s).

A diferencia que para las infiltraciones, la ventilación depende principalmente de las áreas de las aberturas en lugar de los valores de  $C_Q$ . Por esto, para relacionar los patrones de la Figura 4.47 con las diferencias de los coeficientes de presión de las fachadas de la casa, la distribución de área de aberturas debe tenerse en cuenta. Estas áreas son de 4,22 m<sup>2</sup> en el frente, 1,15 m<sup>2</sup> en la fachada a 90° y 1,54 m<sup>2</sup> en la fachada trasera. Además, cabe destacar que las diferencias de presión que tendrán mayor impacto en la ventilación serán las que consideren las fachadas que tienen ventanas. Entonces, el promedio ponderado de  $\Delta C_p$  fue determinado en función de la dirección de viento y se presenta en la Figura 4.48. El procedimiento para dicho cálculo es prácticamente el mismo que en la Ecuación 4.2 con la excepción de que en lugar de ponderar con  $C_Q$ , se ponderó con el área de ventanas de cada fachada.

Comparando los gráficos de las Figuras 4.47 y 4.48 se puede observar cómo los patrones en ambos gráficos son muy similares. Esto muestra cómo el modelo AFN utilizado en este trabajo relaciona flujo másico de aire de ventilación con la dirección del viento de acuerdo con la diferencia de los coeficientes de presión entre fachadas y la distribución de viento en la envolvente.

Ahora, el caso se simuló nuevamente con las ventanas abiertas, pero utilizando el EPW original (o sea considerando la velocidad de viento variables)

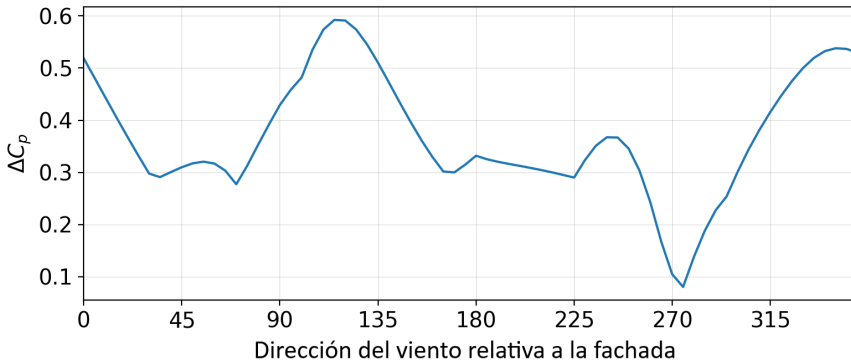


Figura 4.48: Diferencia de coeficientes de presión entre fachadas ponderado con el área de ventanas.

y variando la orientación de la casa. Al hacer esto, y sabiendo cómo varía la ventilación con la dirección del viento incidente en la casa, la relación de la renovación de aire y el perfil de velocidades del EPW puede analizarse. La renovación de aire por hora promediada en todo el año como función de la orientación de la casa se presenta en la Figura 4.49. Los máximos en este caso se obtienen para orientaciones de la casa de  $60^\circ$  y  $270^\circ$  y el mínimo para  $325^\circ$ .

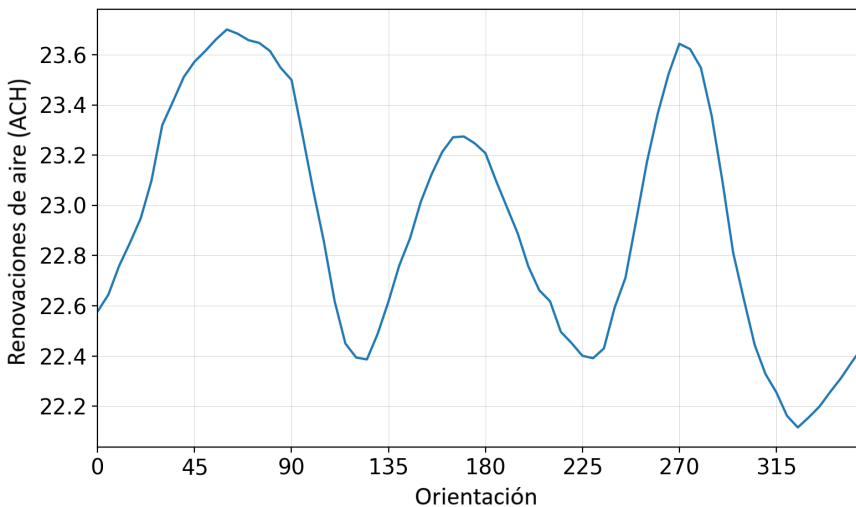


Figura 4.49: Renovaciones de aire por hora promedio.

El gráfico de la Figura 4.49 se puede explicar analizando las Figuras 4.47 y 4.46 para distintas orientaciones de la casa. Por ejemplo, de acuerdo a la Figura 4.47 la mayor renovación de aire se da para direcciones de viento de  $300^\circ$  a  $30^\circ$  y de  $105^\circ$  a  $165^\circ$  relativo a la fachada frontal. Estos rangos, para una casa orientada a  $60^\circ$ , corresponden a direcciones de viento absolutas de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y de  $165^\circ$  a  $225^\circ$ ; lo cual de acuerdo a la rosa de vientos de la Figura 4.46 incluyen orientaciones con alta frecuencia y velocidad de viento. Además, las renovaciones de aire más bajas ocurren para velocidades de viento relativas de  $260^\circ$  a  $285^\circ$  (ver Fig. 4.47). Para la casa orientada a  $60^\circ$ , dicho rango corresponde a direcciones absolutas de  $320^\circ$  to  $345^\circ$  que tienen baja frecuencia o velocidad de viento de acuerdo a la rosa de los vientos (Figura 4.46).

Por lo tanto, al igual que para infiltraciones, la relación entre renovaciones de aire por ventilación y la orientación de la casa se puede entender al relacionar la diferencia entre fachadas de los coeficientes de presión y la ubicación de las ventanas, con el perfil de velocidad local utilizado en la simulación. Sin embargo, la grandes diferencias entre infiltración y ventilación sugieren que el aspecto más relevante en la carga térmica de infiltración y ventilación es el comportamiento del ocupante en relación a la operación de las ventanas.

#### ***Comportamiento de los ocupantes***

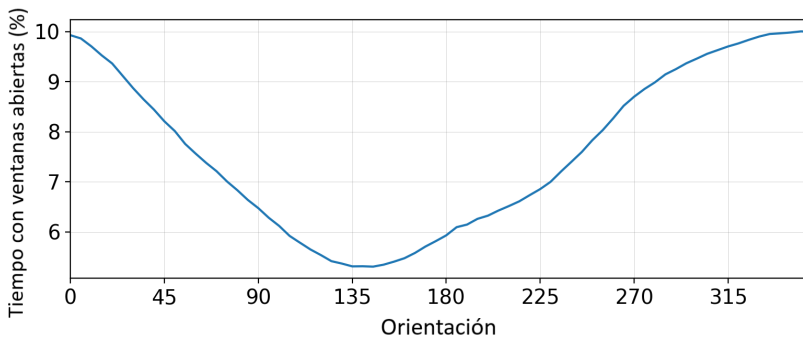
En el caso de ejemplo los ocupantes operan las ventanas con el objetivo de alcanzar el confort térmico con el menor requerimiento de HVAC posible. Al igual que en el resto del presente proyecto, el criterio de confort se determina de acuerdo a ASHRAE 55 [62] y se basa en si la temperatura operativa de la vivienda se encuentra dentro de cierto rango. La temperatura operativa depende de la temperatura del aire y de la temperatura de las paredes.

Si la temperatura operativa de la zona es mayor que la de confort, pero dentro de los límites superior e inferior aceptados, el ocupante abre las ventanas en lugar de usar el sistema HVAC. Por el contrario, si la temperatura operativa de la zona es mayor que el límite superior aceptado, las ventanas se cierran y se enciende el sistema HVAC. Por lo tanto la operación de las ventanas depende de la temperatura de las paredes y del aire, que ya se observó que varían con la orientación de manera similar que las ganancias solares.

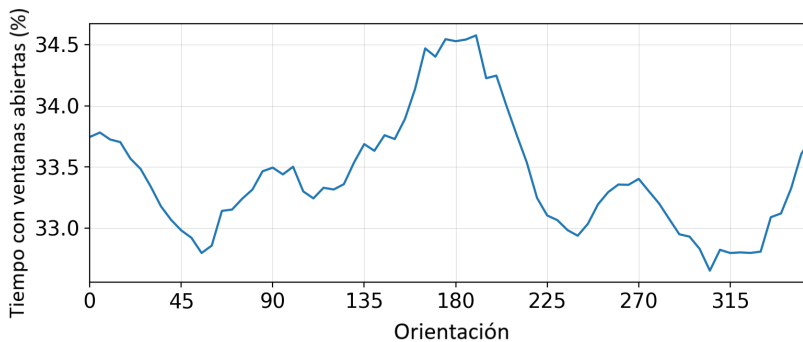
Sin embargo, esto sólo es cierto para las zonas ocupadas (estar y dormitorios) y sólo durante las horas en las cuales están ocupadas. Para las horas en las que no están ocupadas, las ventanas permanecen cerradas. Por el contrario, las ventanas de la cocina y el baño están siempre abiertas si hay personas en la casa, y están cerradas en caso contrario. Entonces, con el fin de analizar la influencia de la orientación en el comportamiento de los ocupantes, el estudio se enfocará en el estar y los dormitorios.

La temperatura de las paredes varía no sólo con la orientación, sino también con los alrededores, entonces, lo mismo ocurrirá con el comportamiento de los ocupantes. Sin embargo, por simplicidad, solamente el escenario I será estudiado. Este análisis se basa en la simulación original, o sea para el EPW original y operando la apertura y cierre de ventanas con los criterios de usuario explicados.

La cantidad de tiempo (como porcentaje) que las ventanas del estar y/o dormitorios permanecieron abiertas se muestra en la Figura 4.50 como función de la orientación de la casa. 100% significaría que todas las ventanas permanecieron abiertas durante todo el período. Debido a la gran diferencia de comportamiento que se tiene en los períodos de calefacción y refrigeración, los resultados se presentan por separado en las Figuras 4.50a y 4.50b respectivamente.



(a) Período de Calefacción.



(b) Período de refrigeración.

Figura 4.50: Porcentaje de tiempo con ventanas abiertas en zonas ocupadas.

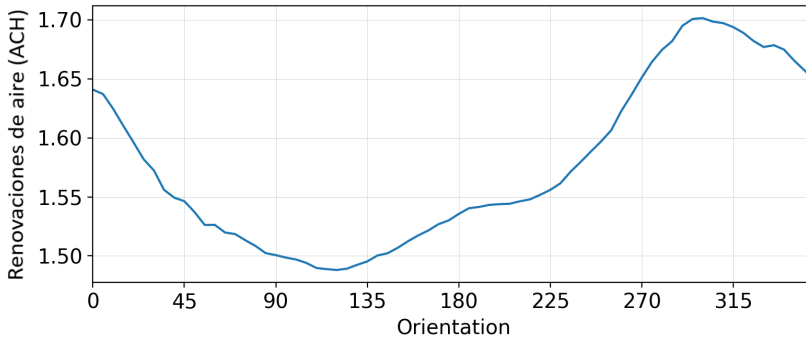


Si los gráficos de la Figura 4.50 se comparan con las correspondientes ganancias solares se puede notar que el tiempo en que se mantienen abiertas las ventanas durante el período de calefacción varía con la orientación de la misma forma que las ganancias solares del estar presentadas en la Figura 4.36b. Esto es en el entendido de que en invierno, a mayor radiación solar en las paredes, mayores temperaturas operativas y, en consecuencia, mayores tiempos con valores de temperatura operativa por encima de la temperatura de confort pero dentro del rango ASHRAE 55. Además, esto ocurrirá principalmente cerca del mediodía cuando solamente el estar está ocupado, lo que explica que la operación de las ventanas depende de las ganancias solares del estar. Durante el verano ocurre lo opuesto: a mayor radiación en las paredes, menor tiempo en el rango de confort. Por lo tanto, durante el período de refrigeración la variación del tiempo con ventanas abiertas es la opuesta que la variación de las ganancias solares totales (Figura 4.39).

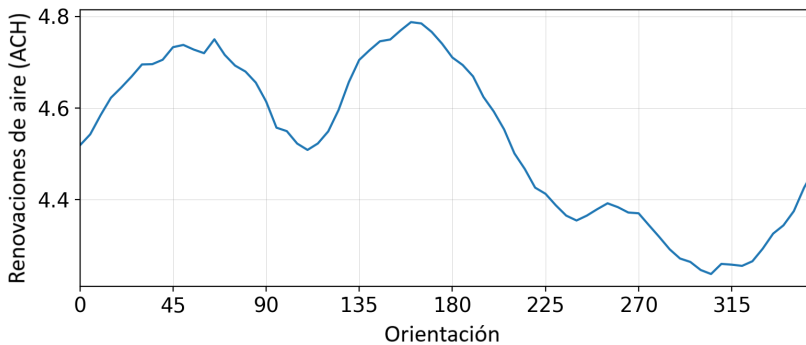
Al comparar las infiltraciones con la ventilación natural se observó que esta última presenta valores de renovaciones de aire un par de órdenes de magnitud mayor que las debidas a infiltraciones. Por esto, las variaciones en la cantidad de tiempo en que las ventanas permanecen abiertas tendrá el impacto más importante en los valores calculados de renovaciones de aire para el caso de estudio. Esto se puede observar en la Figura 4.51, donde se presentan las renovaciones de aire por hora promedio para los períodos de calefacción y refrigeración. Estos gráficos son muy similares a los de las Figuras 4.50a y 4.50b, ya que a mayor tiempo de ventanas abiertas, mayores son las renovaciones de aire.

Las Figuras 4.51a y 4.50a varían de manera similar excepto para orientaciones alrededor de  $0^\circ$ , mientras que lo mismo sucede con las Figuras 4.51b y 4.50b que presentan diferencias cerca de  $45^\circ$ . Estas diferencias se pueden explicar al considerar la relación entre la ventilación y la orientación de la casa presentada en la Figura 4.49; las renovaciones de aire son muy bajas a  $0^\circ$  y muy altas a  $45^\circ$ . Esto evidencia la importancia de modelos con el nivel de detalle del AFN ya que si se utilizaran modelos simplificados no se podría captar esta dependencia con la dirección del viento.

Por lo tanto, para el caso de estudio, la relación entre las infiltraciones y ventilación natural y la orientación de la casa puede explicarse por la influencia de la orientación en el comportamiento de los ocupantes respecto a la operación de las ventanas, y en menor medida en la dependencia directa de las renovaciones de aire debido a ventilación con la orientación de la casa. Como el primer aspecto depende fuertemente de las ganancias solares, que a



(a) Período de calefacción.



(b) Período de refrigeración.

Figura 4.51: Valor promedio de renovaciones de aire por hora para los periodos de calefacción y refrigeración.

su vez varía con los alrededores, el flujo másico de aire debido a ventilación y orientaciones también depende del escenario estudiado.

### ***Carga térmica por infiltraciones y ventilación natural***

Hasta ahora, todo el análisis se enfocó en entender la relación entre el flujo másico de infiltraciones y ventilación y la orientación de la casa. Con el fin de completar el estudio, debe considerarse la carga térmica debido a este flujo de aire. Esta carga es función del flujo másico de aire analizado y de la diferencia de temperatura entre el interior y el ambiente exterior.

Dado un factor de apertura de ventana el flujo de aire que circula será el mismo para los distintos escenarios simulados, ya que el modelo utilizado no considera el impacto de las variaciones en los alrededores entre los escenarios en el perfil de velocidades. Sin embargo, el comportamiento de los ocupantes

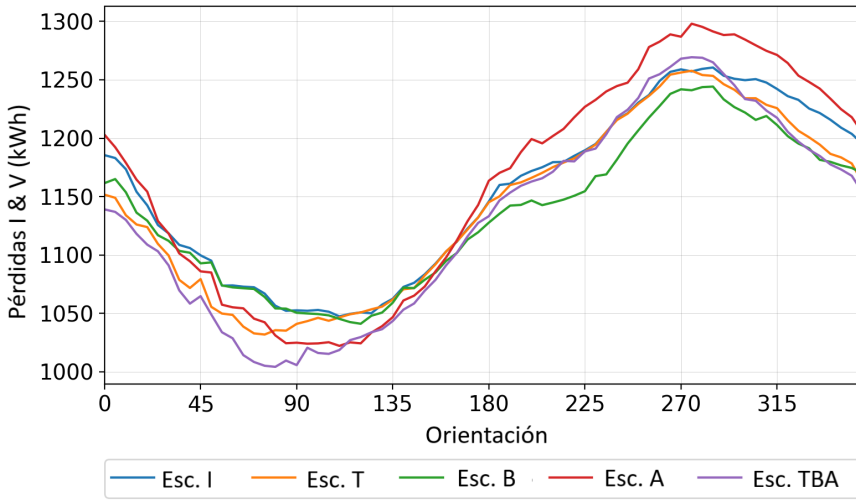
sí variará con los alrededores, por lo que también variarán los flujos máscicos de aire en los distintos escenarios. Debido a esto, y a que también se tendrán ciertas variaciones de temperatura interior en los distintos casos, las pérdidas de energía debido a infiltraciones y ventilación presentarán variaciones.

Las pérdidas de energía debido a las infiltraciones y la ventilación natural durante los períodos de refrigeración y calefacción en función de la orientación para los distintos escenarios se presentan en la Figura 4.52. Se puede observar que hay un importante parecido entre estos gráficos y los presentados en la Figura 4.51, lo cual es razonable ya que la diferencia de temperatura entre el interior y el ambiente no variará tanto como el flujo máscico de aire con la orientación. Además, las diferencias entre los escenarios son más notorias durante el período de refrigeración y entre los casos apareados y no apareados. Esto se debe a que el mayor impacto de la orientación en la temperatura de las paredes se da cuando hay una fachada apareada. Ya que la fachada apareada es la correspondiente a los dormitorios, la influencia no es muy relevante durante el período de calefacción cuando la ventilación varía principalmente con la temperatura operativa de la sala de estar.

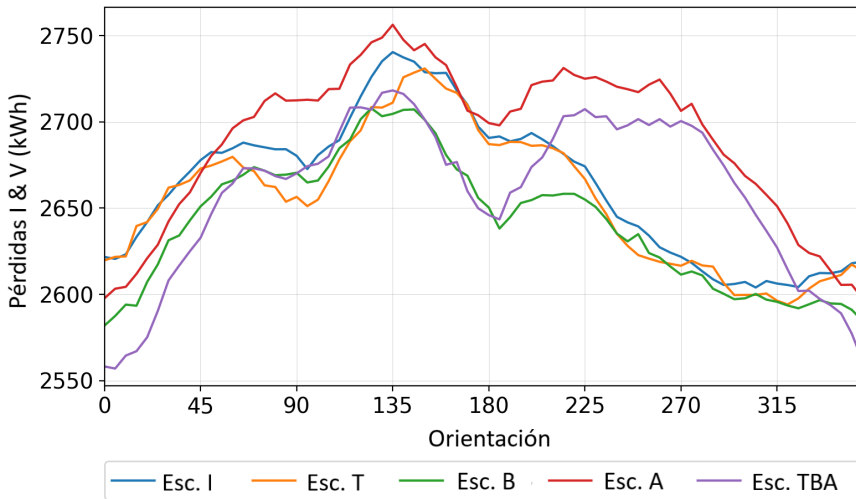
Al analizar las cargas térmicas de infiltraciones y ventilación natural, hay varios aspectos que deben tenerse en cuenta como los cronogramas de ocupación, la operación de las ventanas, operación del sistema HVAC, etc. Por ejemplo, incluso durante el período de calefacción, pueden haber ciertas horas en las cuales la temperatura operativa sea mayor que la de confort y, debido a eso, las pérdidas por infiltraciones y ventilación son beneficiosas y no afectan a la carga de calefacción. Por esto, relacionar esas pérdidas de energía con los requerimientos de refrigeración y calefacción requieren mayor análisis; lo cual excede el objetivo de esta sección.

## 4.5. Conclusiones

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en el proyecto para modelar desde un punto de vista térmico el sector residencial uruguayo. Consiste en el desarrollo de un modelo bottom-up del parque habitacional basado en la física del problema, a partir de simulaciones de edificios típicos y su prevalencia en el sector residencial. Con el fin de conseguir un modelo lo más preciso posible se desarrolló un proceso de automatización como estrategia para poder simular un gran número de casos. Entonces, se implementó una plataforma basada en códigos de Python y la librería Eppy, así como en los resultados obtenidos en la caracterización del parque habitacional. Esta plataforma utiliza



(a) Período de calefacción.



(b) Período de refrigeración.

Figura 4.52: Pérdidas de energía por infiltraciones y ventilación natural.

EnergyPlus como motor de cálculo y es capaz de ejecutar todo el proceso de simulación; incluyendo la caracterización, generación y simulación de modelos y procesamiento de resultados.

Utilizando la plataforma desarrollada se realizaron simulaciones del parque habitacional en dos situaciones; una considerando que las viviendas se mantenían en el confort térmico en las zonas ocupadas gracias a un sistema de acondicionamiento ideal permitiendo estimar los requerimientos energéticos, y otra sin acondicionamiento permitiendo variar libremente la temperatura interna donde se estima el desconfort. Además, en la situación con acondicionamiento se realizó la simulación para tres usuarios diferentes con el fin de evaluar su influencia. Cada simulación de las mencionadas implica el modelado de 300 casos representativos, lo que requirió un total de 43 horas en una PC personal.

Para un usuario eficiente lo requerimientos térmicos se estimaron en 2641 GWh, de los cuales 1296 GWh corresponden a refrigeración y 1345 GWh a calefacción. Al diferenciar entre tipo de vivienda, los apartamentos muestran un mejor comportamiento que las casas debido a su menor área expuesta y mejor calidad constructiva. Respecto a las regiones, en el N-NO se tienen los mayores requerimiento relativos al área de la vivienda debido a que presenta altos requerimientos de refrigeración. Los deciles socioeconómicos 1-4 son los que presentan los mayores requerimiento relativos al área de la vivienda, seguidos por los deciles 8-10. Estos dos grupos presentan características de requerimientos muy dispares, en el caso de los deciles 1-4 el 68 % de los requerimientos corresponden a refrigeración, mientras que para los deciles 8-10 un 72 % corresponden a calefacción. Si se desagregan los resultados por tamaño se puede observar que las viviendas más pequeñas presentan los mayores requerimientos relativos al área, y respecto a la antigüedad son las viviendas más antiguas las de mayores requerimientos, casi duplicando los valores de las viviendas más nuevas.

Siguiendo con los casos con acondicionamiento térmico, se observó una gran influencia del comportamiento del usuario. Respecto al usuario eficiente de referencia (P), el usuario ineficiente (V) requiere un 61 % más de energía para alcanzar el confort en términos medios en el parque habitacional. Este incremento es más notorio para apartamentos, donde alcanza el 140 %, mientras que en las casas es del 50 %. Al comparar los dos usuarios eficientes que se definieron (aunque con ciertas diferencias de criterios, usuarios P y S) se observan variaciones pero mucho más moderadas, en términos medios se estima un aumento del 1 % para los requerimientos de S respecto a los de P. En ambos casos las principales diferencias se observan en las cargas de refrigeración por el impacto del buen uso de protecciones solares para disminuir la carga solar, así como un buen uso de la ventilación para aportar a refrigerar la casa. Estos resultados indican la importancia del usuario para reducir consumos energético, pero también que es importante la definición lo más precisa posible de

su comportamiento para una correcta estimación de los consumos energéticos para acondicionamiento térmico utilizando la presente metodología.

Para el caso sin acondicionamiento térmico y para un usuario eficiente se estimó un discomfort térmico anual medio de  $757^{\circ}\text{Ch}$  por altas temperaturas, mientras que por bajas temperaturas se tiene un valor de  $2581^{\circ}\text{Ch}$ , que es más del triple que el primero. Al comparar con el caso con acondicionamiento térmico, se observa un comportamiento diferente entre los períodos de calor y frío, ya que en ese caso los requerimientos para refrigeración y calefacción eran similares. Esta diferencia se observó que se debe a que en el período frío el balance entre pérdidas y ganancias de calor se logra (respecto al caso con acondicionamiento) principalmente a que la temperatura interior se acerque a la exterior, mientras que en el período de calor el balance se logra por un aprovechamiento mayor de la ventilación natural, un uso diferente de las protecciones solares y en menor medida por un aumento de la temperatura interior. Estas diferencias indican la importancia de incluir ambos casos en el análisis ya que el comportamiento no será el mismo en los períodos de frío y calor en las situaciones con y sin acondicionamiento.

Finalmente, se realizó la simulación de un arquetipo y región particular para analizar el impacto de variables como orientación, apareamiento de la vivienda y alrededores, y realizar un análisis profundo para explicar dicha influencia. Para este caso se encontró que los requerimientos pueden variar hasta un 35 % entre la vivienda sin aparear y la misma vivienda con una fachada apareada. Además, se observó que el aporte relativo de paredes, techo, ventanas, infiltración y ventilación natural es diferente en los distintos escenarios, por lo que a la hora de analizar mejoras las medidas más efectivas pueden ser diferentes incluso para un mismo arquetipo. Se encontró una gran dependencia de los requerimientos energéticos con la orientación de la vivienda, principalmente por la gran dependencia de las ganancias solares con la orientación, y en menor medida por la variación de las infiltraciones y la ventilación natural. Esto demuestra la importancia de considerar estas variaciones a la hora de caracterizar los requerimientos de todo el parque habitacional, así como de analizar posibles mejoras para las viviendas.

## Capítulo 5

# Evaluación de mejoras

Existen varias formas de abordar la evaluación de mejoras para disminuir el consumo energético necesario para alcanzar condiciones de confort en las viviendas. El diseño bioclimático, por ejemplo, que es un proceso de diseño integrado, en el que se utilizan datos numéricos relacionados con el clima y las condiciones de confort humano, para la toma de decisiones relacionados con la forma y la construcción de viviendas [64], nos puede brindar pistas sobre en qué condición se encuentra la vivienda y su entorno, y cuáles pueden ser las acciones para mejorar el consumo energético. En esta línea Givoni [65] presenta una herramienta conocida como la carta bioclimática de cada localidad. En la misma se grafican en un diagrama psicrométrico los valores de temperatura horaria del aire para todo un año, junto con la humedad relativa correspondiente. Estos datos se cruzan con las condiciones de confort térmico y se identifican zonas en el diagrama en las que es posible aumentar las horas del año con condiciones térmicas favorables en el interior de los locales, aplicando estrategias bioclimáticas de diseño integradas (masa + aislamiento térmico + orientación de ventanas para captar el sol en invierno o sombreado y protección solar + orientación de vanos respecto al sol y al viento + masa + aislamiento térmico + ventilación natural para el verano). Algunas de estas estas estrategias se vinculan más a los aspectos formales y otras a los constructivos y tecnológicos.

A modo de ejemplo en la Figura 5.1, se presenta una análisis de una carta bioclimática, donde se observan los valores de los porcentajes de horas de confort al año, debido a diferentes acciones pasivas<sup>1</sup>, para un 80 % de satisfacción según la norma ASHRAE 55, para Montevideo en todo el año. Cabe destacar

---

<sup>1</sup>Se consideran acciones pasivas, aquellas en las que no es necesario un consumo de energía para aplicarla.

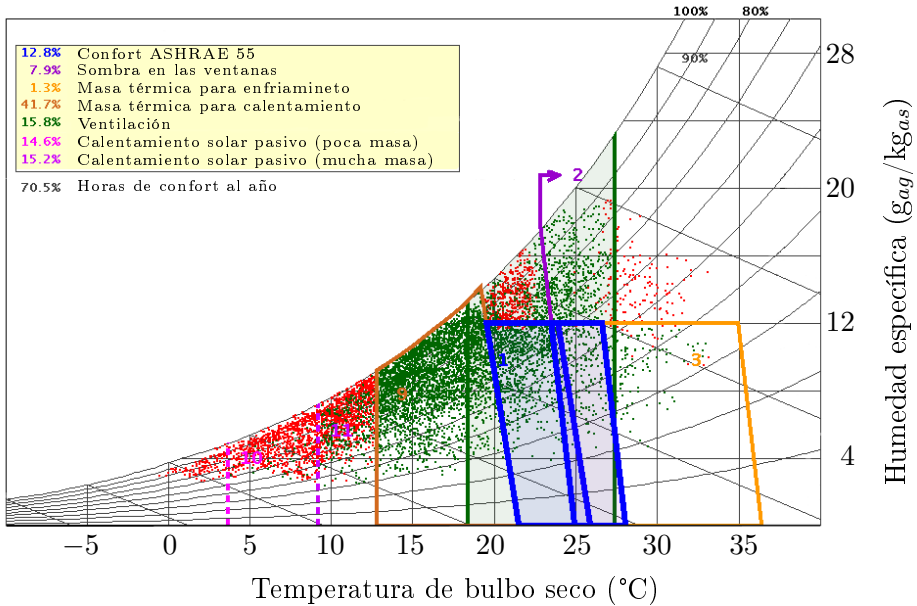


Figura 5.1: Carta bioclimática de Givoni [65].

que la combinación de las acciones pasivas no incrementa las horas de confort de forma lineal, debido a que hay acciones que pueden ser incompatibles, por ejemplo la ventilación natural generalmente implica una construcción de baja masa con grandes aberturas durante el día, mientras que masa térmica generalmente implica un cierre durante el día para mantener el “frío” de la noche anterior en las paredes y pisos [66]. En la Tabla 5.1 se presentan los valores para las ciudades del análisis bioclimático para las ciudades con datos de AMT utilizados en este estudio.

Para la ciudad de Montevideo, los datos que se obtienen de estas cartas bioclimáticas sugieren que tras agotar los recursos de diseño pasivo, tan solo el 2,0% de las horas del año sería necesario la utilización de refrigeración activa para lograr condición de confort térmico en el ambiente interior. Mientras que el uso de la calefacción activa es necesaria un 21,7% de las horas del año siempre que el diseño de la construcción sea el adecuado. Ambos porcentajes aumentan para diseños inapropiados.

En tanto que para las ciudades más norte del país, Salto por ejemplo, la utilización de aire acondicionado corresponde al 9,2% de las horas del año si el diseño de la vivienda es el adecuado, mientras que la calefacción se reduce (en comparación con la capital) al 14,3% de las horas del año, como puede verse en la Tabla 5.1. Es importante notar que en la tabla no se tuvo en cuenta la



acción de deshumidificación (o humectación), debido a que no se consideran controles de humedad en las acciones del Energy Plus, por esta razón las suma de las acciones pasivas y activas no cubren el 100 % de las horas del año.

Tabla 5.1: Porcentaje de horas de confort al año, debido a diferentes acciones (pasivas y activas), para un 80 % de satisfacción según la norma ASHRAE 55, para Montevideo, Salto, Colonia, Rivera y Rocha.

ASHRAE Standard 55	Aportes de horas de confort al año (%)				
	Montevideo	Salto	Colonia	Rivera	Rocha
Confort (sin acciones)	12,8	14,7	11,9	14,4	10,9
Sombra en las ventanas	7,9	14,2	11,2	12,4	8,1
Masa térmica enfriamiento	1,3	3,7	1,8	2,9	0,5
Masa térmica calentamiento	41,7	34,7	31,8	39,2	42,9
Ventilación	15,8	21,2	17,1	18,9	16,3
Calentamiento solar pasivo	29,8	21,6	26,6	24,2	29,2
Pasivas combinadas	70,5	68,0	61,4	70,4	68,8
Refrigeración	2,0	9,2	4,8	6,5	3,0
Calefacción	21,7	14,3	26,4	15,4	22,2

A grandes rasgos habrá diferentes tipos de acciones, cuando se trabaja en mejorar las horas de confort, dependiendo del período del año.

### Período Caluroso

En general las premisas de diseño para este período refieren a dos necesidades básicas: evitar primeramente ganar energía, y luego aumentar las pérdidas de calor. Adicionalmente, dada la amplitud térmica de nuestro clima es necesario almacenar calor, ver Figura 5.2. Para el período caluroso las estrategias con mayor porcentaje serán:

- Sombreamiento
- Masa térmica aislada para enfriamiento
- Ventilación natural

Como el clima de la mayoría de las ciudades estudiadas presenta una gran amplitud térmica, es decir diferencia entre la temperatura máxima y la mínima: mayor a los 10°C, una las estrategias de mejora es disponer de masa

térmica pero aislada. Se debe aclarar que cuando en Givoni [65] indica masa térmica, esta debe estar aislada para el caso de nuestras ciudades, si no se aísla esta masa, la misma intercambiará energía con el exterior, haciendo que su efectividad disminuya. Este es un concepto integrador que vincula la inercia térmica (que en las condiciones climáticas de nuestras ciudades es central ya que relaciona la presencia de masa) y el aislamiento en forma conjunta.

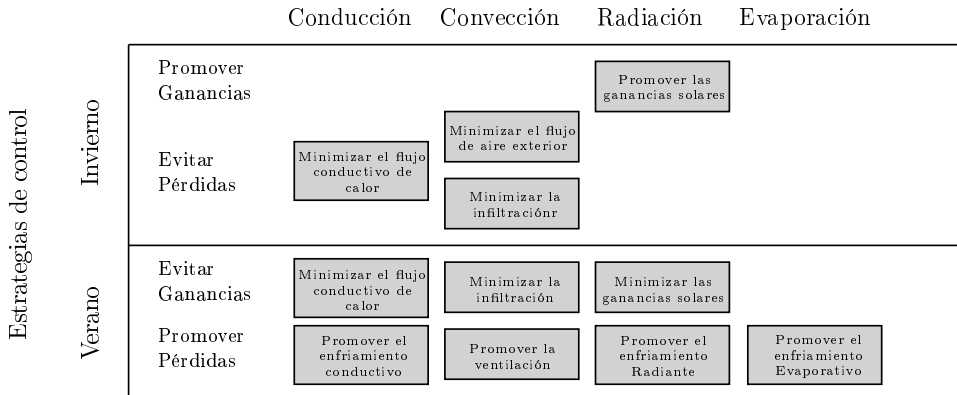


Figura 5.2: Estrategias de diseño y control bioclimático [67].

La masa tiene la capacidad de almacenar calor, actúa al interior de una vivienda tendiendo a disminuir variaciones dinámicas de temperatura en su entorno inmediato. En el caso del período caluroso, en la vivienda existen fluctuaciones diarias de temperatura, fluctuaciones de intensidad de la radiación solar, e incluso, el uso de la vivienda no es regular a lo largo del día, por ende, la transmitancia térmica no basta para comprender el comportamiento térmico de una vivienda, es importante la ubicación de la masa de los cerramientos, que esta se encuentre al interior de los locales y que exista un aislante que separe a esta masa de las condiciones exteriores de altas ganancias de energía. A esto se le debe incorporar el sombreado y ventilación nocturna. Es decir, la envolvente opaca, aislada del exterior durante el período caluroso absorbe calor durante el día, del ambiente interior, debido a la diferencia de temperaturas entre ambos. Esta energía se va almacenando en su masa de manera progresiva, y se disipa durante la noche, con una ventilación nocturna adecuada. A su vez, la envolvente vidriada debe estar diseñada de tal forma que controle las ganancias por radiación (factor solar, existencia de protecciones interiores o exteriores). En esta situación a la mañana siguiente, dicho muro ha reducido su temperatura, para empezar de nuevo el ciclo: absorber calor durante

el día, y emitirlo durante la noche, manteniendo una temperatura constante y reduciendo la necesidad de utilizar el equipo de refrigeración activos.

Por lo tanto, las estrategias de mejora de todo el parque habitacional del Uruguay implicarían modificar los siguientes parámetros: utilizar una envolvente pesada y aislada; ventilar adecuadamente siempre que la temperatura exterior sea inferior a los 30°C y colocar protecciones en los cerramientos vidriados de las viviendas. Eso se traducirá en términos constructivos en elegir un cerramiento horizontal pesado cuya transmitancia térmica sea menor a 0.85 W/m<sup>2</sup>K (cerramiento C3 en Tabla C.3); optar por un muro pesado y de baja transmitancia (muro tipo 8 en Tabla C.1); y la incorporación de protecciones solares en todos los cerramientos transparentes. En términos de uso, se requiere un usuario activo que garantice el uso correcto de las protecciones solares, es decir que obstruyan la radiación solar durante el periodo caluroso, y que facilite la ventilación natural cuando la diferencia de temperaturas exterior-interior lo permita.

## Período Frío

Al analizar el período frío se puede concluir que las premisas de diseño serán opuestas a las del período caluroso. Para este las necesidades se pasan por evitar las pérdidas de energía y aumentar (o promover) las ganancias de energía en los recintos. Complementariamente es altamente recomendable almacenar la energía captada, ver Figura 5.2. Para el período frío las estrategias pasivas, según las cartas bioclimáticas, con mayores porcentajes para aumentar las horas de confort son:

- Masa aislada para calentamiento
- Calentamiento solar pasivo

De estos datos se entiende que será necesario un buen aislamiento térmico para que el flujo del calor en invierno no salga al exterior donde las temperaturas usualmente son más bajas, y permitir que el calor interior permanezca en el ambiente. La alternativa de utilizar masa térmica aislada puede compensar las bajas temperaturas exteriores a través del almacenamiento de la energía solar en los cerramientos, que puede ser cedido a los ambientes en los horarios de menores temperaturas, generalmente en la noche. El uso de aislación garantiza que se eviten las pérdidas de energía al exterior por la envolvente (pérdidas mayores por el cerramiento horizontal) y por el otro lado aprovechar las ganancias internas aumentando así la temperatura interior. Es así como el muro

tendrá un mejor comportamiento si está formado por un aislamiento térmico considerable al exterior y un material interior con cierta inercia térmica que pueda ser activo. Lo mismo sucede con el diseño del cerramiento horizontal.

Para evitar las pérdidas de energía del interior de la edificación, también se deben considerar las infiltraciones, el ingreso de aire exterior no deseado a través de huecos o intersticios en los cerramientos. Las mismas son controlables a partir del correcto sellado de los elementos que componen el cerramiento de la vivienda. Por otro lado, para ganar energía, se deben orientar adecuadamente los cerramientos vidriados de las viviendas y disponer de un diseño de los mismos que permita el ingreso de radiación directa del sol cuando sea necesario.

Por lo tanto, las estrategias de mejora de todo el parque habitacional del Uruguay implicarían modificar los siguientes parámetros materiales: utilizar una envolvente pesada y aislada; controlar las infiltraciones y diseñar adecuadamente los cerramientos vidriados de las viviendas controlando su factor solar y su transmitancia térmica. Eso se traducirá en elegir un cerramiento horizontal pesado cuya transmitancia térmica sea menor a  $0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$ , C3 en Tabla C.3; optar por el muro tipo 8 de la Tabla C.1 que es un muro pesado y de baja transmitancia, bajar las infiltraciones y cambiar los tipos de vidrio, mejorando su transmitancia térmica.

## 5.1. Mejoras propuestas

Se proponen cinco estrategias de mejora a aplicar sobre las viviendas con el objetivo de reducir sus requerimientos energéticos. Por un lado, se tienen mejoras sobre la envolvente que consisten en, la primera, modificar el tipo de construcción de los muros exteriores pasando todas las viviendas a tener el muro ME8 de la Tabla 2.28 y, la segunda, en modificar el tipo de construcción del techo al techo de tipo C3 de la Tabla 2.28. Las siguientes dos mejoras tienen que ver con la transferencia de calor a través de las ventanas; por un lado se propone incorporar protecciones solares en aquellas ventanas que en la configuración original de la vivienda no tienen y, por el otro, cambiar el vidrio simple por doble vidrio hermético (DVH). La última mejora implica anular las infiltraciones que existen a través de las ventanas, puertas y grietas en los techos. Esta última mejora no es realista, pero permite ver el máximo potencial de mejorar la permeabilidad de las viviendas.

## 5.2. Ahorros en requerimientos energéticos

Una vez definidas las estrategias de mejora a evaluar, se repite la simulación del parque habitacional para el usuario P incorporando a los modelos originales cada mejora propuesta. Así, se ejecutaron un total de 1475 nuevos casos, que corresponden a los 295 casos originales por las 5 estrategias de mejora seleccionadas. Los ahorros en requerimientos energéticos obtenidos para el parque habitacional en su totalidad se presentan en la Figura 5.3 para cada estrategia de mejora.

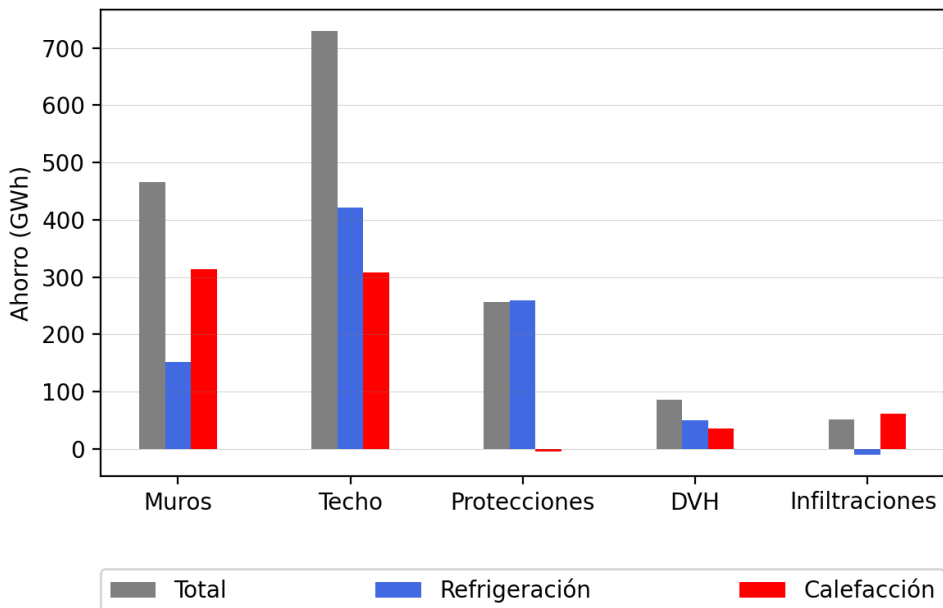


Figura 5.3: Ahorros obtenidos por estrategia de mejora propuesta.

En la Fig. 5.3 se observa como la estrategia con mayor impacto en los requerimientos energéticos a nivel global es la sustitución de los techos. Esta mejora implica un ahorro de 730 GWh que representa un 27% de los requerimientos totales. Los ahorros se dan tanto en las cargas de refrigeración como en las de calefacción, ambas con similar contribución, aunque un poco mayor en las de refrigeración (422 GWh). Esto es razonable si se tiene en cuenta que durante el verano, al haber mayor altitud solar, la irradiación sobre el techo es alta, haciendo que la materialidad del mismo tenga gran impacto sobre la transferencia de calor hacia adentro de la vivienda y, en consecuencia, en las cargas

de refrigeración. El cambio de materialidad en los muros exteriores se traduce en una reducción en los requerimientos energéticos de 466 GWh, siendo esto un 17% de los requerimientos originales. En este caso también se ahorra en ambas cargas térmicas con la diferencia de que el ahorro en calefacción (que es prácticamente igual al ahorro en calefacción logrado con el cambio de techos) duplica al de refrigeración. La tercera estrategia con mayor impacto es la incorporación de protecciones solares en todas aquellas ventanas que en los modelos originales no tenían, lo que produce un ahorro de 257 GWh (10% del consumo original) que se da solamente en la carga de refrigeración. La sustitución del vidrio simple por DVH en todas las ventanas de las viviendas resulta en un ahorro total de 87 GWh (3% del consumo original) que se da en ambas cargas en proporciones similares. Por último, la eliminación de las infiltraciones a través de las aberturas y grietas implica un ahorro total de 51 GWh (2% del consumo original) que se da únicamente en las cargas de calefacción, las de refrigeración incluso aumentan 10 GWh. Anular completamente las infiltraciones, además, es imposible de realizar en la práctica por lo que el ahorro será incluso menor.

Al igual que se hizo para los resultados de requerimientos energéticos en el Cap. 4, los ahorros obtenidos por las distintas estrategias de mejora se pueden ver disgregados de acuerdo a las categorías en las que se caracterizó el parque habitacional. Los ahorros (en energía total y también relativos a los requerimientos originales) disgregados según la zona geográfica se presentan en la Tabla 5.2. La cantidad de viviendas que hay en cada zona impacta directamente en el ahorro de energía, lo que explica valores de ahorro en términos absolutos muy distintos (por ejemplo comparando MVD con N-NO) aún para ahorros relativos similares. Al comparar las distintas estrategias de mejora implementadas por zona geográfica, se mantienen los mismos resultados que para el parque en su totalidad. Esto es, el cambio de techos es la mejora que produce mayor ahorro en las cuatro zonas, seguida por el cambio de muros, la incorporación de protecciones solares, el cambio de vidrio en las ventanas y, por último, la mejora de las aberturas en cuanto a las infiltraciones. Incluso el ahorro producido por cada una relativo al requerimiento original (previo a la aplicación de las mejoras) en cada región son bastante similares.

Las mejoras también pueden ser evaluadas disgregando los resultados de acuerdo al nivel socioeconómico de los ocupantes como se observa en la Tabla 5.3. En este caso sí se observan diferencias en la eficacia de las distintas estrategias para los distintos rangos de deciles socioeconómicos. Si bien el cambio de techo sigue siendo la estrategia que produce más ahorro en los tres grupos, su impacto es bien distinto en cada uno; mientras que en los deciles

	MVD		N-NO		S-SE		SO-Centro-NE	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%	GWh	%
Muros	172.6	17 %	43.3	15 %	117.6	19 %	133.1	18 %
Techo	297.7	29 %	76.1	26 %	175.1	28 %	182.1	25 %
Protecciones	133.6	13 %	25.4	9 %	48.2	8 %	49.4	7 %
DVH	40.5	4 %	8.5	3 %	16.7	3 %	20.8	3 %
Infiltraciones	19.5	2 %	2.6	1 %	11.3	2 %	17.6	2 %

Tabla 5.2: Ahorros en requerimientos energéticos por estrategia aplicada según zonas geográficas.

1-4 se logra un ahorro de un 38 % respecto a sus requerimientos originales, en los deciles 5-7 este valor es de 26 % y en los deciles 8-10 es de un 10 %. En términos energéticos la diferencia es todavía mayor ya que hay más viviendas pertenecientes a los deciles 1-4 que a los demás niveles socioeconómicos. Para los deciles 1-4 y 5-7 la siguiente estrategia con mayor impacto es el cambio de muros (con ahorros relativos de 21 % y 24 %, respectivamente) seguida por la incorporación de protecciones solares (12 % y 7 %), mientras que para los deciles 8-10 la segunda estrategia con mayor impacto es la incorporación de protecciones solares aunque con un ahorro de apenas el 8 % y luego el cambio de muros con un 5 % de ahorro. Las mejoras en la transmitancia de las ventanas y en las infiltraciones implican ahorros bajos y similares entre los distintos rangos de deciles.

Las diferencias observadas en los resultados para las distintas mejoras al disgregarlos por los niveles socioeconómicos se explican por los tipos de construcción que tenían originalmente las viviendas en cada categoría y su relación con los nuevos materiales incorporados. Por ejemplo, en los deciles 8-10 las viviendas de menos de 10 años de antigüedad ya contaban en su construcción original con muros exteriores del tipo ME8 (por lo que no fueron modificadas con la mejora de muros) mientras que las más antiguas contaban con muros con transmitancias similares a la del ME8. En cambio, las viviendas de los deciles 1-4 tenían originalmente muros exteriores con transmitancias entre un 50 % y un 60 % mayores que las del ME8, por lo que el cambio de muros en estos casos implica una mejora relevante.

Por último, se analizan los resultados de ahorros según el tipo de vivienda, esto es diferenciando entre casas y apartamentos. En este caso las estrategias de mejora propuestas producen ahorros bien distintos. Mientras que para las casas el orden de las mejoras de acuerdo a su impacto es el mismo que para el parque habitacional completo, para los apartamentos son las mejoras que

	1 al 4		5 al 7		8 al 10	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%
Muros	263.0	21 %	152.1	24 %	44.4	5 %
Techo	471.1	38 %	165.3	26 %	83.1	10 %
Protecciones	142.7	12 %	43.1	7 %	69.8	8 %
DVH	36.4	3 %	21.8	3 %	28.4	3 %
Infiltraciones	17.3	1 %	15.0	2 %	19.2	2 %

Tabla 5.3: Ahorros en requerimientos energéticos por estrategia aplicada según nivel socioeconómico.

afectan a la transferencia por las ventanas las que tienen mayor relevancia, en particular la incorporación de protecciones solares produce un ahorro del 41 % de los requerimientos en los apartamentos. El bajo impacto de mejorar los muros exteriores y los techos de los apartamentos es debido a que el porcentaje de envolvente apareada en los apartamentos es grande, habiendo entonces poca área de superficie expuesta al exterior. Para el techo en particular, los únicos apartamentos que lo tienen expuesto son los del piso más alto, que son un 9 % de los apartamentos en Montevideo. Para los muros, además del porcentaje de envolvente apareada, influye también que los apartamentos se concentran en mayor medida en los niveles socioeconómicos más altos, donde la mejora de muros ya tiene un impacto pequeño aún en las casas.

	Casas		Apartamentos	
	GWh	%	GWh	%
Muros	448.3	18 %	7.1	3 %
Techo	707.4	29 %	4.7	2 %
Protecciones	176.9	7 %	87.9	41 %
DVH	65.8	3 %	22.3	10 %
Infiltraciones	45.1	2 %	5.7	3 %

Tabla 5.4: Ahorros en requerimientos energéticos por estrategia aplicada según tipo de vivienda.

Los ahorros obtenidos se pueden seguir desagregando hasta llegar al nivel de cada arquetipo en cada región geográfica definida. Este procedimiento se sigue para la mejora de los techos, que es la de mayor impacto, en los arquetipos tipo casa, que son la mayoría del parque habitacional. Los resultados se determinan como el ahorro relativo al consumo original de cada arquetipo y región y se presentan en la Tabla 5.5, las celdas están coloreadas de verde a rojo



de acuerdo al ahorro (verde indica mayor ahorro y rojo menor). Para una casa dada, estos resultados permiten tener una idea más cercana de cuánto será el ahorro al implementar la mejora en los techos que, como se observa, presenta variaciones dentro de la misma región y también dentro de los mismos niveles socioeconómicos. Sin embargo, de acuerdo a lo presentado en el Cap. 4, para un mismo arquetipo en una misma región las viviendas pueden tener desempeños térmicos diferentes y, en consecuencia, ahorros también diferentes. Por lo tanto, si se quisiera conocer el ahorro para una vivienda en particular, esto es, un cierto arquetipo, en un determinado departamento, con una orientación y configuración de entorno en particular, los valores presentados en la Tab. 5.5 sirven como una primer aproximación pero se debería hacer la simulación en particular si se quisiera obtener un resultado más representativo del caso.

Si bien el comportamiento del usuario puede tener incidencia en los valores de ahorro obtenidos (porque es una de las hipótesis sobre la que se modelan las viviendas y que por ende afecta a los resultados de todas las simulaciones), la única estrategia de mejora sobre la que el usuario tiene acción directa, y por lo tanto impacto directo, es la incorporación de protecciones solares. Para analizar este impacto se comparan los resultados de ahorro obtenido para los distintos usuarios. El usuario V, por cómo fue definido, no hace uso de las protecciones solares por lo que la mejora no provocaría ningún ahorro. Para los usuarios P y S los ahorros obtenidos con la incorporación de protecciones solares considerando el total del parque habitacional se presentan en la Figura 5.4. Como se observa, con el usuario S se logra un ahorro de 474 GWh en los requerimientos de refrigeración (80 % mayor que con el usuario P) pero se produce un aumento de 270 GWh en los requerimientos de calefacción contra 4 GWh de aumento con el usuario P. Esto provoca que, en términos anuales, con el usuario P se logre un 26 % más de ahorro que con el usuario S. Es necesario entonces tener en cuenta que los valores de ahorro obtenidos para la mejora de incorporación de protecciones solares son valores altamente sensibles al comportamiento del usuario.

### 5.3. Análisis de costo-beneficio de las mejoras propuestas

La evaluación de las mejoras se completa con un análisis preliminar de los aspectos económicos. Para esto, en base a datos de costos de componentes de obra de INCA <sup>2</sup> ajustados por el Índice de Costo de la Construcción (ICC),

---

<sup>2</sup>Accedido a través de <https://costos.todouy.com/>

Tamaño	Decil	Antigüedad	N-NO	SO-Centro-NE	S-SE	MVD
<=40	1-4	<=10	25 %	27 %	38 %	32 %
		10<X<=30	31 %	30 %	32 %	34 %
		X>30	36 %	42 %	46 %	45 %
	5-7	<=10	-	3 %	3 %	-
		10<X<=30	-	22 %	23 %	23 %
		X>30	25 %	33 %	34 %	33 %
	8-10	<=10	-	-	-	-
		10<X<=30	-	16 %	21 %	-
		X>30	-	29 %	30 %	-
40<x<=70	1-4	<=10	28 %	30 %	34 %	31 %
		10<X<=30	26 %	24 %	29 %	28 %
		X>30	39 %	39 %	47 %	43 %
	5-7	<=10	0 %	3 %	0 %	1 %
		10<X<=30	20 %	26 %	30 %	28 %
		X>30	26 %	31 %	32 %	33 %
	8-10	<=10	-	0 %	0 %	-
		10<X<=30	9 %	8 %	6 %	8 %
		X>30	26 %	20 %	20 %	19 %
>70	1-4	<=10	32 %	36 %	35 %	38 %
		10<X<=30	28 %	28 %	31 %	29 %
		X>30	38 %	44 %	46 %	46 %
	5-7	<=10	0 %	4 %	3 %	3 %
		10<X<=30	24 %	27 %	32 %	35 %
		X>30	31 %	25 %	27 %	27 %
	8-10	<=10	0 %	0 %	0 %	0 %
		10<X<=30	6 %	7 %	7 %	7 %
		X>30	17 %	14 %	15 %	16 %

Tabla 5.5: Ahorros relativos al consumo original por la mejora en los techos en casas.

se estima el sobrecosto que implicaría cada una de las estrategias de mejora y se expresa relativo al ahorro alcanzado en requerimientos energéticos. Este procedimiento se sigue para todas las mejoras propuestas a excepción de la que implica anular las infiltraciones. Esto porque, por un lado, se trata de una mejora hipotética para la cual sería muy difícil asignar un costo y, por otro lado, es una mejora que mostró tener muy bajo impacto en los requerimientos térmicos por lo que no tiene sentido profundizar en su análisis. Esta

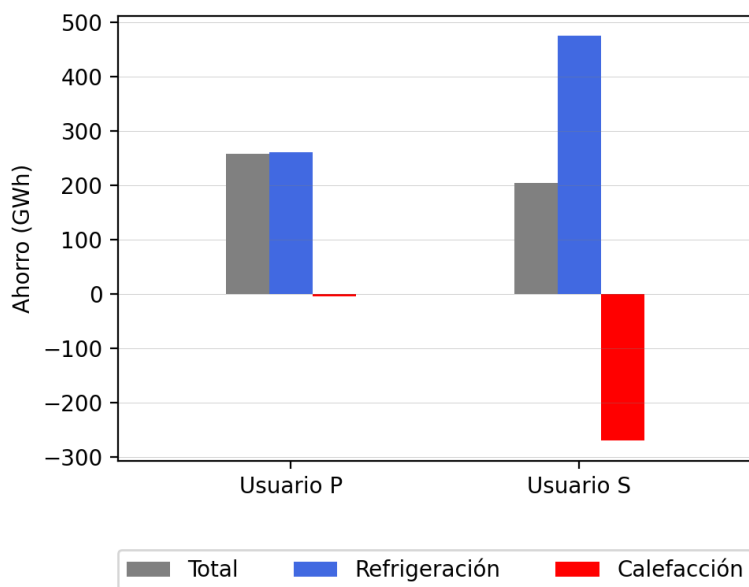


Figura 5.4: Ahorros obtenidos con la incorporación de protecciones solares según el usuario.

metodología resulta en un análisis preliminar de la relación costo-beneficio de las estrategias de mejora ya que, si bien los costos asociados a cada mejora se estiman considerando que se aplican a proyectos nuevos (y no como *retrofits*, lo que implicaría un estudio mucho más complejo), el análisis se hace para el total del parque habitacional actual.

Los costos asociados a cada mejora (considerando que se aplican en proyectos nuevos y no como *retrofits*) relativos al ahorro logrado se presentan en las Tablas 5.6, 5.7 y 5.8 para las distintas categorías de estudio. En todas las regiones geográficas la mejora más costo-efectiva se obtuvo al incorporar protecciones solares (ver Tab. 5.6) a pesar de que en energía implica ahorros de en torno al 10 % contra casi 30 % de la mejora en techos (ver Tab. 5.2). Lo mismo se cumple para el caso en que las viviendas se desagregan de acuerdo al decil socioeconómico (ver Tab. 5.7) y también de acuerdo al tipo (ver Tab. 5.8). En este último caso, la diferencia en costos es particularmente importante debido al escaso ahorro que se logra con el cambio de techos y muros como consecuencia del bajo porcentaje de área expuesta.

	MVD (M\$/GWh)	N-NO (M\$/GWh)	S-SE (M\$/GWh)	SO-Centro-NE (M\$/GWh)
Muros	1051.8	981.1	1005.7	830.4
Techo	171.2	205.8	261.3	229.5
Protecciones	83.7	87.2	142.3	127.4
DVH	738.3	675.9	1056.2	783.1

Tabla 5.6: Costo de estrategias de mejora según zona geográfica.

	1 al 4 (M\$/GWh)	5 al 7 (M\$/GWh)	8 al 10 (M\$/GWh)
Muros	864.9	700.2	2624.7
Techo	216.8	123.2	358.3
Protecciones	87.6	102.2	139.0
DVH	508.3	846.9	1178.6

Tabla 5.7: Costo de estrategias de mejora según nivel socioeconómico.

	Casa (M\$/GWh)	Apartamento (M\$/GWh)
Muros	891.5	7012.2
Techo	196.9	2699.2
Protecciones	121.3	60.4
DVH	839.4	682.3

Tabla 5.8: Costo de estrategias de mejora según tipo.

## 5.4. Conclusiones

En este capítulo se proponen estrategias de mejora de diseño en las viviendas con el objetivo de reducir sus requerimientos de energía para mantener condiciones de confort térmico. Estas estrategias de mejora fueron seleccionadas de acuerdo a la carta bioclimática para el clima local y a las capacidades de la herramienta desarrollada. Las mejoras evaluadas son: sustituir la materialidad original de las paredes exteriores de todas las viviendas por el mejor tipo de muro definido en la Tab. C.1 (ME8), sustituir el techo original de todas las viviendas por el mejor tipo de techo definido en la Tab. C.3 (C3), incorporar protecciones solares en todas las ventanas de todas las viviendas, incorporar doble vidrio hermético (DVH) en todas las ventanas de todas las viviendas y anular las infiltraciones en todas las viviendas.

Para evaluar el impacto de las mejoras propuestas en términos de reducción de requerimientos energéticos, se ejecuta una nueva simulación donde se vuelve

a caracterizar el total del parque para cada mejora considerando al usuario P. El análisis de los resultados de esas simulaciones se realiza para el parque habitacional en su conjunto así como para las distintas categorías en las que se clasificaron las viviendas: zona geográfica, tipo, tamaño, nivel socioeconómico y antigüedad. La mejora en los techos es la que tiene mayor impacto en el global del parque resultando en un ahorro del 27 % de los requerimientos totales de energía para acondicionamiento térmico, que se producen tanto en el período de calefacción como en el de refrigeración, aunque con algo más de peso en este último. Las siguientes estrategias en orden de ahorro energético logrado son la mejora de los muros (17 % de ahorro) y la incorporación de protecciones solares (10 % de ahorro). Finalmente, las estrategias con menor impacto en los requerimientos son la incorporación de DVH en las ventanas y la eliminación de las infiltraciones que logran ahorros del 3 % y 2 %, respectivamente.

Al analizar los resultados disgregando según categorías se observa que al distinguir por zonas geográficas los resultados se mantienen muy similares a los obtenidos para el parque total, mientras que al diferenciar entre niveles socioeconómicos se mantiene el orden de las mejoras en cuanto a su impacto pero existen grandes diferencias entre el ahorro obtenido para las distintas categorías. En términos generales, los niveles socioeconómicos más altos tienen menos margen de mejora en cuanto a los tipos de construcciones utilizados, por lo que las mejoras que apuntan a modificar la materialidad de techos y muros tienen menor impacto en esta categoría. Por ejemplo, la mejora de los techos implica ahorros del 38 % para los deciles socioeconómicos más bajos y del 10 % para los más altos (relativos a sus requerimientos originales). Por otro lado, al distinguir entre casas y apartamentos las diferencias son aún más grandes; mientras que en las casas los ahorros relativos por mejora son similares que para el parque total, en los apartamentos -al tener menor porcentaje de envolvente expuesta y además concentrarse en mayor medida en los niveles socioeconómicos más altos- las mejoras en techos y muros producen ahorros muy pequeños (2 % y 3 % respectivamente).

El análisis se completa con una evaluación económica preliminar de las mejoras propuestas. El análisis implica determinar y comparar el costo de implementar cada mejora relativo al ahorro que se obtiene con su implementación. Tanto para el estudio del parque habitacional total como por categorías, la mejora más costo-efectiva es la de incorporar protecciones solares; sin embargo, los ahorros obtenidos con esta mejora mostraron ser altamente dependientes del usuario. La siguiente estrategia de ahorro más conveniente es la de mejorar la materialidad de los techos a excepción de en los apartamentos, que es la de mejorar las ventanas.



## Capítulo 6

# Conclusiones generales

En el presente proyecto se realizó una caracterización del comportamiento térmico del parque habitacional uruguayo en su situación actual mediante un enfoque bottom-up basado en la termodinámica del problema, y un análisis del impacto que tendrían varias medidas de eficiencia energética. Para ello se desarrolló una metodología que permitió la caracterización el dominio de viviendas nacionales, en el cual se definieron los edificios típicos y su predominio en el parque habitacional, se definieron hipótesis de uso de las viviendas y criterios de confort térmico, y se desarrolló una metodología para automatizar la simulación mediante EnergyPlus de los edificios típicos y procesar los resultados individuales para obtener los valores globales del parque habitacional. A continuación se detallan los resultados y conclusiones más relevantes de este estudio.

- A partir del análisis de datos se estableció una metodología que permitió la caracterización de la distribución de viviendas y se definió una primera aproximación a las probabilidades de pertenecer a uno de los siguientes conjuntos: Tipo de Vivienda (Casa o Apartamento), Tamaño, Antigüedad, Nivel de Ingreso de los Hogares y Región Geográfica. También se estableció en la metodología una caracterización del apareamiento de la vivienda y la orientación, que son parámetros que resultaron ser fundamentales, para caracterizar la demanda energética de una vivienda.
- Uno de los principales productos de este proyecto es la herramienta computacional que permite modelar el comportamiento térmico del parque habitacional en su conjunto, utilizando como motor de cálculo el software EnergyPlus. La herramienta desarrollada permite evaluar los requerimientos térmicos de todo el parque habitacional si se mantiene el

confort térmico bajo cierto criterio, o bien, permite evaluar el grado de disconfort que se tendría en el escenario en que las viviendas no cuenten con acondicionamiento térmico.

Los resultados que se pueden obtener con esta herramienta dependen fuertemente de la caracterización del parque habitacional, de los datos climáticos y de las hipótesis de uso de las viviendas. Por lo que por un lado hay que tener en cuenta que la calidad de los resultados del presente proyecto están sujetos a dicha información, y por otro lado que si cualquiera de estos inputs pudieran ser mejorados en futuros estudios, las simulaciones pueden ser repetidas sin mayor esfuerzo gracias a la flexibilidad con que se implementó la herramienta.

- Si se asume un usuario eficiente para todas las viviendas del país y bajo las hipótesis definidas en el presente estudio, los requerimientos térmicos a nivel nacional se estimaron en 2641GWh, de los cuales 1296GWh corresponden a refrigeración y 1345GWh a calefacción. Los apartamentos muestran un mejor comportamiento que las casas debido a su menor área expuesta y mejor calidad constructiva. En la región N-NO se tienen los mayores requerimientos relativos al área de la vivienda, debido a su alta necesidad de refrigeración (el doble que en otras regiones). Los deciles socioeconómicos 1-4 presentan los mayores requerimiento relativos al área de la vivienda, sus principales necesidades son para refrigeración (68%), a diferencia de los otros deciles donde el principal requerimiento es el de calefacción (en los deciles 8-10 son el 72%).

Se observó una gran dependencia del comportamiento del usuario, obteniendo variaciones de requerimientos totales del 61% entre un usuario eficiente y uno ineficiente. Siendo la diferencia más clara en apartamentos, donde el aumento medio para un usuario ineficiente llega a 140%, mientras que en las casas es del 50%. Estos resultados indican la importancia del usuario para reducir consumos energético, pero también que es importante la definición lo más precisa de su comportamiento para una correcta estimación de los posibles consumos energéticos para acondicionamiento térmico utilizando la presente metodología.

- Al analizar el parque habitacional sin ningún acondicionamiento térmico para un usuario eficiente se estimó un disconfort térmico anual medio de 757°C<sub>h</sub> por altas temperaturas y 2581°C<sub>h</sub> por bajas temperaturas. Al comparar con la situación con acondicionamiento se observó un comportamiento diferente entre los períodos de calor y frío, ya que en ese caso los requerimientos para refrigeración y calefacción eran similares. Este se



debe principalmente a que en el período de calor se tiene un aprovechamiento mayor de la ventilación natural, que es favorable para acercarse al confort.

- Al evaluar distintas propuestas de mejora, la que mostró tener mejor relación entre el costo y el ahorro energético logrado fue la de incorporar protecciones solares en todas las ventanas de las viviendas. Sin embargo, el ahorro producido por esta mejora mostró ser fuertemente dependiente del comportamiento del usuario con respecto a su operación, por lo que los resultados obtenidos para esta mejora aplicada en todo el parque habitacional para un único tipo de usuario no son suficientemente representativos de la realidad.

Por otro lado, al analizar los resultados de ahorro en términos absolutos, la mejora más efectiva fue la de modificar la construcción de los techos. Aplicando esta mejora en todo el parque habitacional se alcanzó un ahorro del 27% de los requerimientos térmicos originales. Además, a diferencia de la incorporación de protecciones solares, la mejora en techos es una mejora sobre la que el usuario no tiene acción directa. Esto conduce a que los resultados obtenidos para esta mejora sean más representativos que para la incorporación de protecciones solares, en el sentido que no están tan sujetos a cómo fue definido el usuario.



# Bibliografía

- [1] Li W., Zhou Y., Cetin K., Eom J., Wang Y., Chen G., y Zhang X. Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy*, 141:2445–2457, 2017.
- [2] Swan L. G. y Ugursal V. I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(8):1819–1835, 2009.
- [3] Pérez-García J. y Moral-Carcedo J. Analysis and long term forecasting of electricity demand through a decomposition model: A case study for Spain. *Energy*, 97:127–143, 2016.
- [4] Zhang Q. Residential energy consumption in China and its comparison with Japan, Canada, and USA. *Energy and Buildings*, 36(12):1217–1225, 2004.
- [5] Kavacic M., Mavrogianni A., Mumovic D., Summerfield A., Stevanovic Z., y Djurovic-Petrovic M. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7):1683–1697, 2010.
- [6] Raffio G., Isambert O., Mertz G., Schreier C., y Kissock K. Targeting residential energy assistance. *Proceedings of the Energy Sustainability Conference 2007*, pages 489–496, 2007.
- [7] Aydinalp-Koksal M. y Ugursal V. I. Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector. *Applied Energy*, 85(4):271–296, 2008.
- [8] Aydinalp M., Ugursal V. I., y Fung A. S. Modeling of the appliance, lighting, and space-cooling energy consumptions in the residential sector using neural networks. *Applied Energy*, 71(2):87–110, 2002.

- [9] Cerezo-Davila C., C. Reinhart, y Bemis J. Modeling Boston: A workflow for the generation of complete urban building energy demand models from existing urban geospatial datasets. Technical report.
- [10] Wilson E. y Merket N. An Interactive Visualization Tool for Large-Scale Building Stock Modeling. *Proceedings of 2018 Building Performance Modeling Conference and SimBuild*, pages 338–345, 2018.
- [11] Wilson E., Christensen C., Horowitz S., Robertson J., y Maguire J. Energy Efficiency Potential in the U. S. Single-Family Housing Stock. (National Renewable Energy Lab, United States), 2017.
- [12] DNE-MIEM. Estudio de medidas de eficiencia energética en el sector residencial y evaluación de costos y beneficios asociados en Uruguay. 2015.
- [13] Cramer J. C., Miller N., Craig P., Hackett B. M., Dietz T. M., Vine E. L., y Kowalczyk D. J. Social and engineering determinants and their equity implications in residential electricity use. *Energy*, 10(12):1283–1291, 1985.
- [14] Pérez-Lombard L., Ortiz J., y Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 40(3):394–398, 2008.
- [15] Shimoda Y., Asahi T., Taniguchi A., y Mizuno M. Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model. *Energy*, 32(9):1617–1633, 2007.
- [16] Wilson C. y Dowlatabadi H. Models of decision making and residential energy use. *Annual review of environment and resources*, 32:169–203, 2007.
- [17] Lutzenhiser L. A cultural model of household energy consumption. *Energy*, 17(1):47–60, 1992.
- [18] Kavousian A., Rajagopal R., y Fischer M. Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior. *Energy*, 55:184–194, 2013.
- [19] Santin O. G., Itard L., y Visscher H. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in dutch residential stock. *Energy and buildings*, 41(11):1223–1232, 2009.
- [20] Instituto Nacional de Estadística (INE). Censos 2011 (Uruguay), 2011.

- [21] Casacuberta C. Encuesta nacional de hogares ampliada - módulo de vivienda primer trimestre de 2006. Instituto Nacional de Estadística – República Oriental del Uruguay, 2006.
- [22] Carver S., Mikkelsen N., y Woodward J. Long-term rates of mass wasting in Mesters Vig, northeast Greenland: Notes on a re-survey. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(3):243–249, 2002.
- [23] Alonso-Suárez R., Abal G., Siri R., y Musé P. Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. *Energy Procedia*, 57:1237–1246, 2014.
- [24] Alonso Suárez R., Bidegain M., Abal G., y Modernell P. Año meteorológico típico para aplicaciones de energía solar - amtes series horarias típicas para 5 sitios del uruguay. Technical report, Laboratorio de Energía Solar (Uruguay), 2016.
- [25] Taks J., Bertoni R., Caldes L., Camacho M., Contreras S., Loustaunau M., Messina P., Milicua S., y Picción A. Equidad y energía en uruguay, análisis interdisciplinario de la demanda energética en el sector residencial de montevideo y área metropolitana. Technical report, Fondo Sectorial de Energía ANII (Uruguay), 2011.
- [26] Standard ANSI/ASHRAE 55. Thermal environmental conditions for human occupancy, 2017.
- [27] Nahoum B., Silva C., Bozzo L., Calone M., Rodríguez M., Piperno M., y Campoleoni M. *Vivienda social. Evaluación integral, antes y después estudio comparado de nueve experiencias de la Intendencia de Montevideo*. Universidad de la República, 2008.
- [28] Alonso N., Bozzo L., Calone M., Nahoum B., Recalde S., y Tedros G. *¿La tecnología es la solución? Evaluación integral de las viviendas realizadas por el MVOTMA (1993-2002) empleando sistemas innovadores*. Universidad de la República, 2016.
- [29] Google. (s.f.). Mapa de uruguay. recuperado el 21 de mayo de 2020 de <https://www.google.com.uy/maps/place/uruguay/>, 2020.
- [30] Li X. y Wen J. Review of building energy modeling for control and operation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37:517–537, 2014.
- [31] Crawley D. B., C. O. Pedersen, Lawrie L. K., y Winkelmann F. C. Energy-Plus : Energy simulation program. *ASHRAE Journal*, 42(April):49–56, 2000.

- [32] Klein S. A., Beckman W. A., y Duffie J. A. TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program. *Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.*, 2017.
- [33] Energy Systems Research Unit University of Strathclyde Glasgow. ESP-r (Environmental Systems Performance-Research), 2002.
- [34] Judkoff R. y Neymark J. International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST). Technical report, 1995.
- [35] Lima F. y Oliveira R. D. Modelo termoenergético calibrado do restaurante estudantil do CEFETMG campus II. *Conference: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, Brasil*, 2018.
- [36] Psomas T., Fiorentini M., Kokogiannakis G., y Heiselberg P. Ventilative cooling through automated window opening control systems to address thermal discomfort risk during the summer period: Framework, simulation and parametric analysis. *Energy & Buildings*, 2017.
- [37] Liu Z., Zhang Y., Xu W., Yang X., Liu Y., y Jin G. Suitability and feasibility study on the application of groundwater source heat pump ( GWSHP ) system in residential buildings for different climate zones in China. *Energy Reports*, 6:2587–2603, 2020.
- [38] U.S. Department of Energy. Getting Started. *EnergyPlus Documentation*, 2019.
- [39] Walton G. Thermal Analysis Research - Program Reference Manual. *U. S. Department of Commerce*.
- [40] U. S. Department of Energy. Engineering Reference. *EnergyPlus Documentation*, 2019.
- [41] Li X. Q., Chen Y., Spitler J.D., y Fisher D. Applicability of calculation methods for conduction transfer function of building constructions. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(7):1441–1451, 2009.
- [42] U. S. Department of Energy. Auxiliary Programs. *EnergyPlus Documentation*, 2019.
- [43] Pinel P. y Beausoleil-Morrison I. Coupling soil heat and mass transfer models to foundations in whole-building simulation packages. 2012.

- [44] Kusuda T. y Achenbach P. R. Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. *National Bureau of Standards Report*, 1965.
- [45] Neymark J., Judkoff R., y Crowley M. International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST) for Ground Coupled Heat Transfer. Technical report, 2008.
- [46] COMSOL. COMSOL Multiphysics® Modeling Software, 2016.
- [47] U.S. Department of Energy. Input Output Reference. *EnergyPlus Documentation*.
- [48] Gu L. Airflow network modeling in energyplus. *IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association 2007*, (January 2007):964–971, 2007.
- [49] Santosh P. Eppy Documentation. *Github Repository*, (Release 0.5.52), 2019.
- [50] Vitale G., Bove I., Pereyra J., y Abal G. Global solar transmittance of vertical glazing oriented towards the equator. In *Proceeding of ISES Solar World Congress*, 2019.
- [51] U.S. Department of Energy. Engineering reference. *EnergyPlus Documentation*, 2019.
- [52] Incropera F. y De Witt D. *Fundamentos de transferencia de calor*. 1999.
- [53] CIBSE. *CIBSE Guide A: Environmental Desing*. 7ta edición- Londres, Inglaterra: Chartered Institution of Building Services Engineers., 2006.
- [54] Gu L. Airflow network modeling in energyplus EnergyPlus Development and Support View project Virtual Design Studio View project. Technical report, 2007.
- [55] ISO 9972. Thermal performance of buildings: determination of the air permeability of buildings, fan pressurization method.
- [56] Bui D. K., Nguyen T. N., Ghazlan A., Ngo N. T., y Ngo T. D. Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach. *Applied Energy*, 265, may 2020.

- [57] Glazer J. y Gard P. E. Using Python and Eppy for a Large National Simulation Study. *ASHRAE and IBPSA-USA SimBuild 2016. Building Performance Modeling Conference.*, pages 230–237, 2016.
- [58] Lawrie L. K. y Crawley D. B. Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx), 2019.
- [59] Gervaz-Canessa S. Modelling of energy requirements for thermal conditioning in the Uruguayan residential sector. Master's thesis, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería., 2021.
- [60] Dirección Nacional de Energía; Ministerio de Industria, Energía y Minería (DNE-MIEM). Balance Energético Nacional, 2019.
- [61] INE. Encuesta Continua de Hogares (ECH) - Instituto Nacional de Estadística, 2019.
- [62] ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. Technical report, 2017.
- [63] Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB-002). NBR 15575. pages 1–16.
- [64] Finocchiaro L. y Lobaccaro G. *Handbook of Energy Systems in Green Buildings*, chapter Bioclimatic Design of Green Buildings, pages 61 – 89. Springer, Berlin, Heidelberg., 2018.
- [65] Givoni B. *Climate considerations in building and urban design*. 1998.
- [66] Milne M., Liggett R., Benson A., y Bhattacharya Y. Climate consultant 4.0 develops design guidelines for each unique climate. In *38th ASES National Solar Conference 2009, SOLAR 2009*, 2009.
- [67] Fuentes V. A. Metodología de diseño bioclimático. el análisis climático. Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana, 2002.
- [68] Swami M. V. y Chandra S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. *ASHRAE Transactions*, Pt 1:243–266, 1988.
- [69] Sherman M. H. y Modera M. P. *Comparison of Measured and Predicted Infiltration Using the LBL Infiltration Model*, pages 325–347. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1986.



- [70] Walker I. S. y Wilson D. J. Field validation of algebraic equations for stack and wind driven air infiltration calculations. *HVAC&R Research*, 4(2):119 – 139, 1998.



## Anexo A

# Años Meteorológicos Típicos

En la Figuras A.1-A.5 se presenta la evolución horaria de las variables de irradiancia global en plano horizontal, temperatura de aire ambiente y Módulo de velocidad de viento a 20 metros<sup>1</sup>, correspondientes al AMT de los cinco departamentos tomados como referencia en este trabajo (Colonia, Montevideo, Rivera, Rocha y Salto). Los datos fueron obtenidos del Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República [23].

Para las simulaciones con EnergyPlus, no se utilizaron los datos de viento del archivo `epw`, debido a la mala calidad de las series temporales, en su lugar se utilizaron datos provenientes de estaciones de medida a 20 metros de cada AMT (con excepción de Rocha que está a 12m), que corresponden a las medidas de UTE, corregidas por la altura y factores de abrigo correspondientes para cada localización, ver Anexo B

---

<sup>1</sup>La velocidad del viento para el departamento de Rocha está medida a 12m.

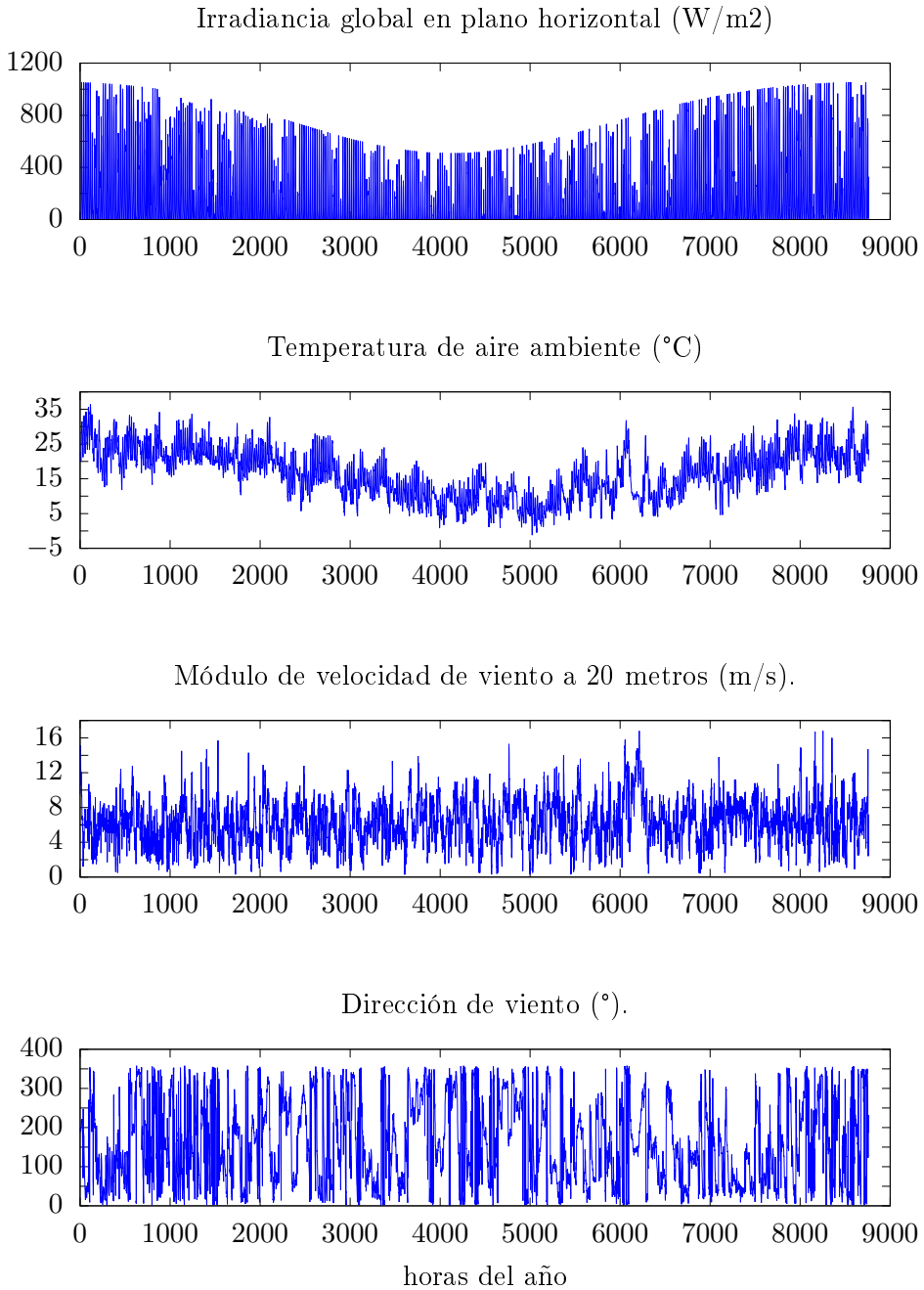


Figura A.1: Irradiancia global en plano horizontal, temperatura de aire ambiente, módulo de velocidad de viento a 20 metros y su dirección, correspondientes al AMT de Colonia.

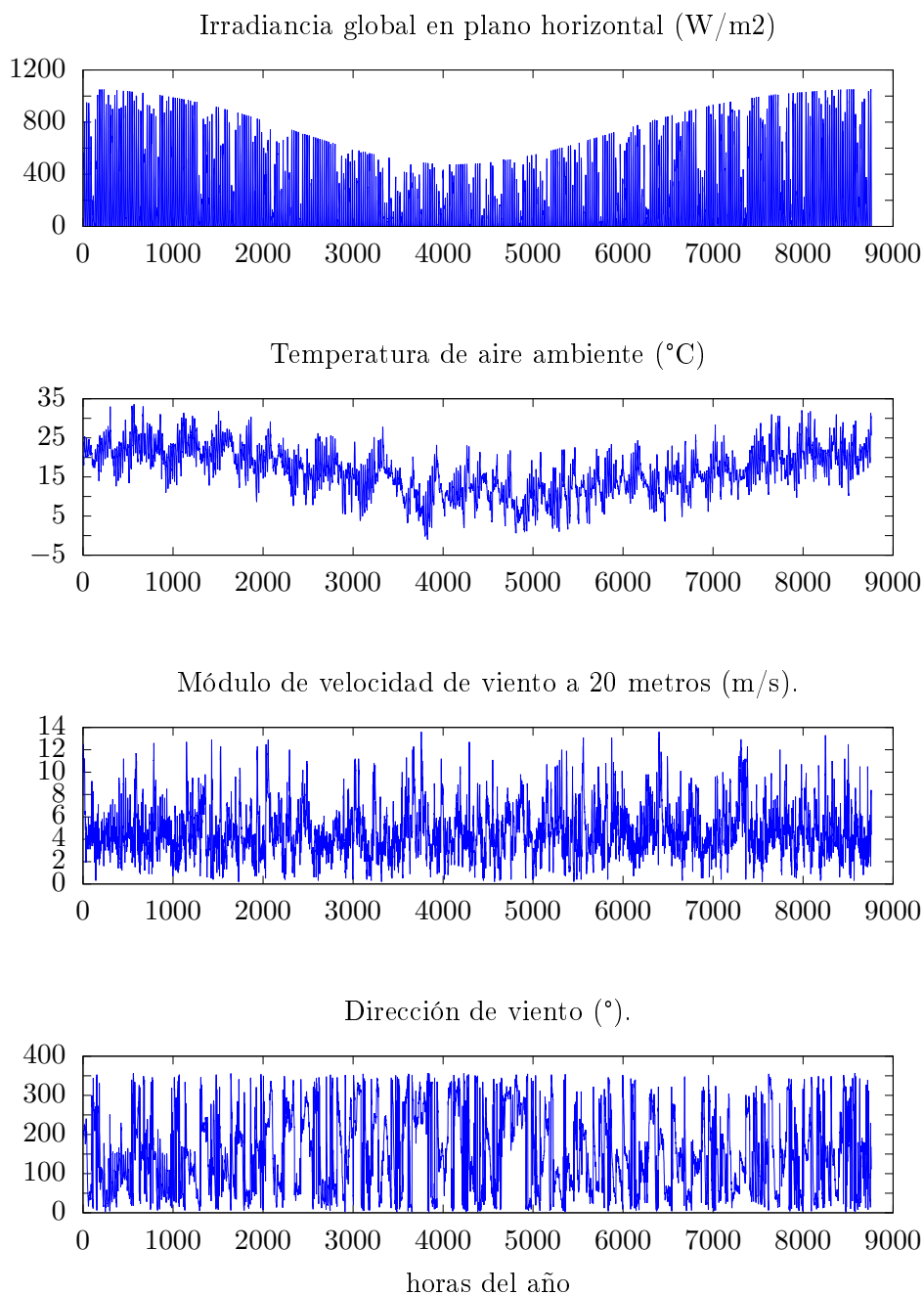


Figura A.2: Irradiancia global en plano horizontal, temperatura de aire ambiente, módulo de velocidad de viento a 20 metros y su dirección, correspondientes al AMT de Montevideo.

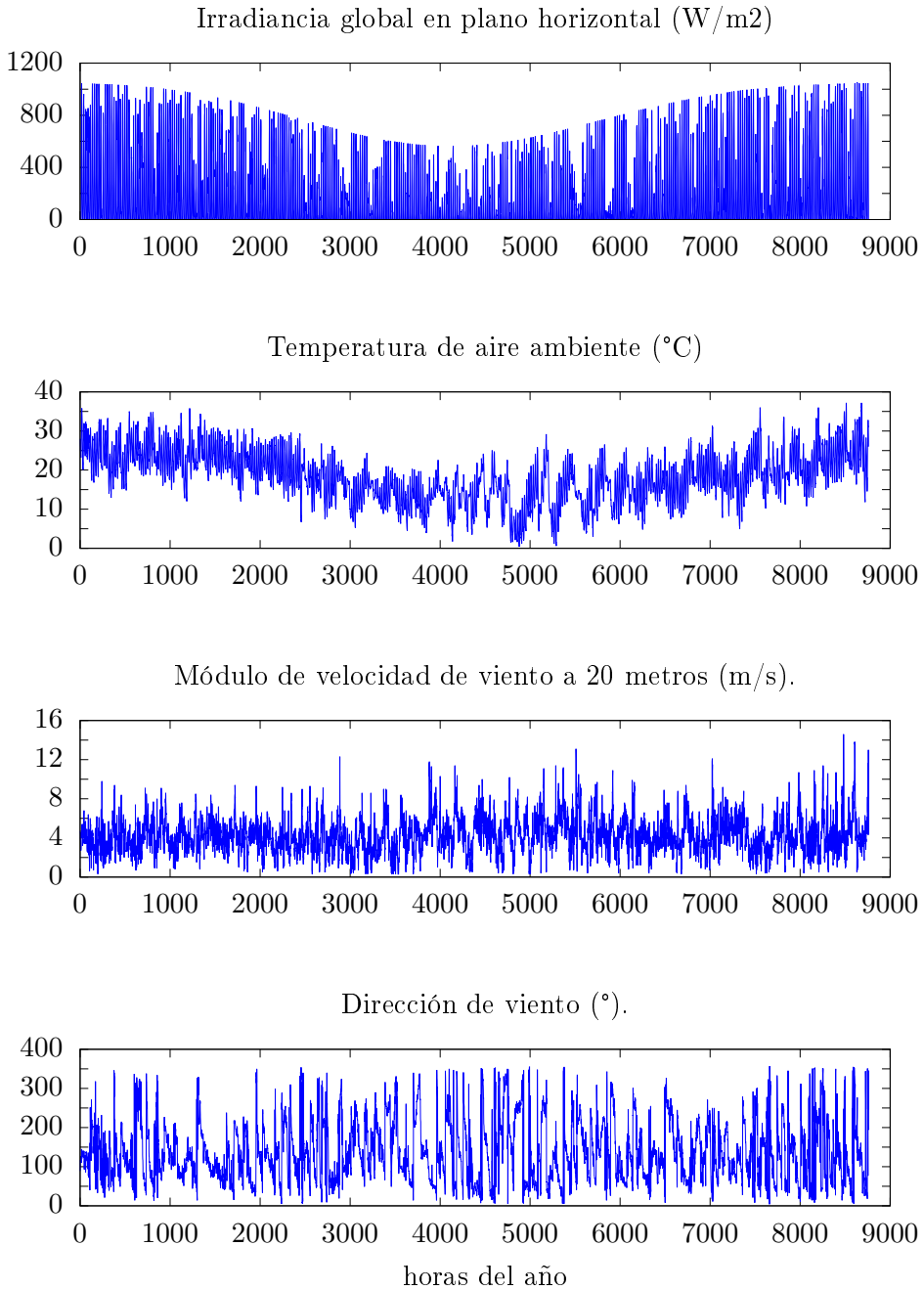


Figura A.3: Irradiancia global en plano horizontal, temperatura de aire ambiente, módulo de velocidad de viento a 20 metros y su dirección, correspondientes al AMT de Rivera.

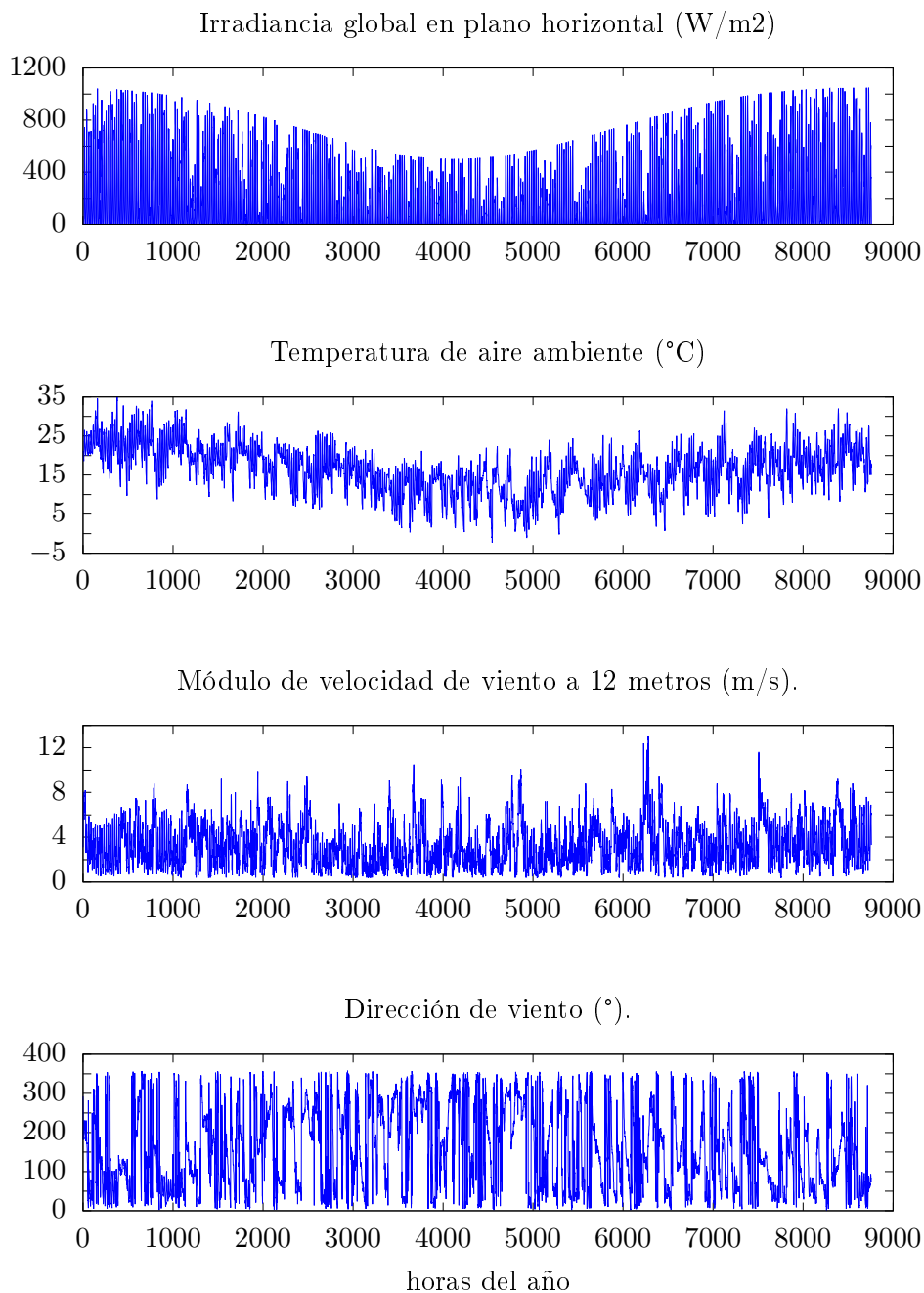


Figura A.4: Irradiancia global en plano horizontal, temperatura de aire ambiente, módulo de velocidad de viento a 12 metros y su dirección, correspondientes al AMT de Rocha.

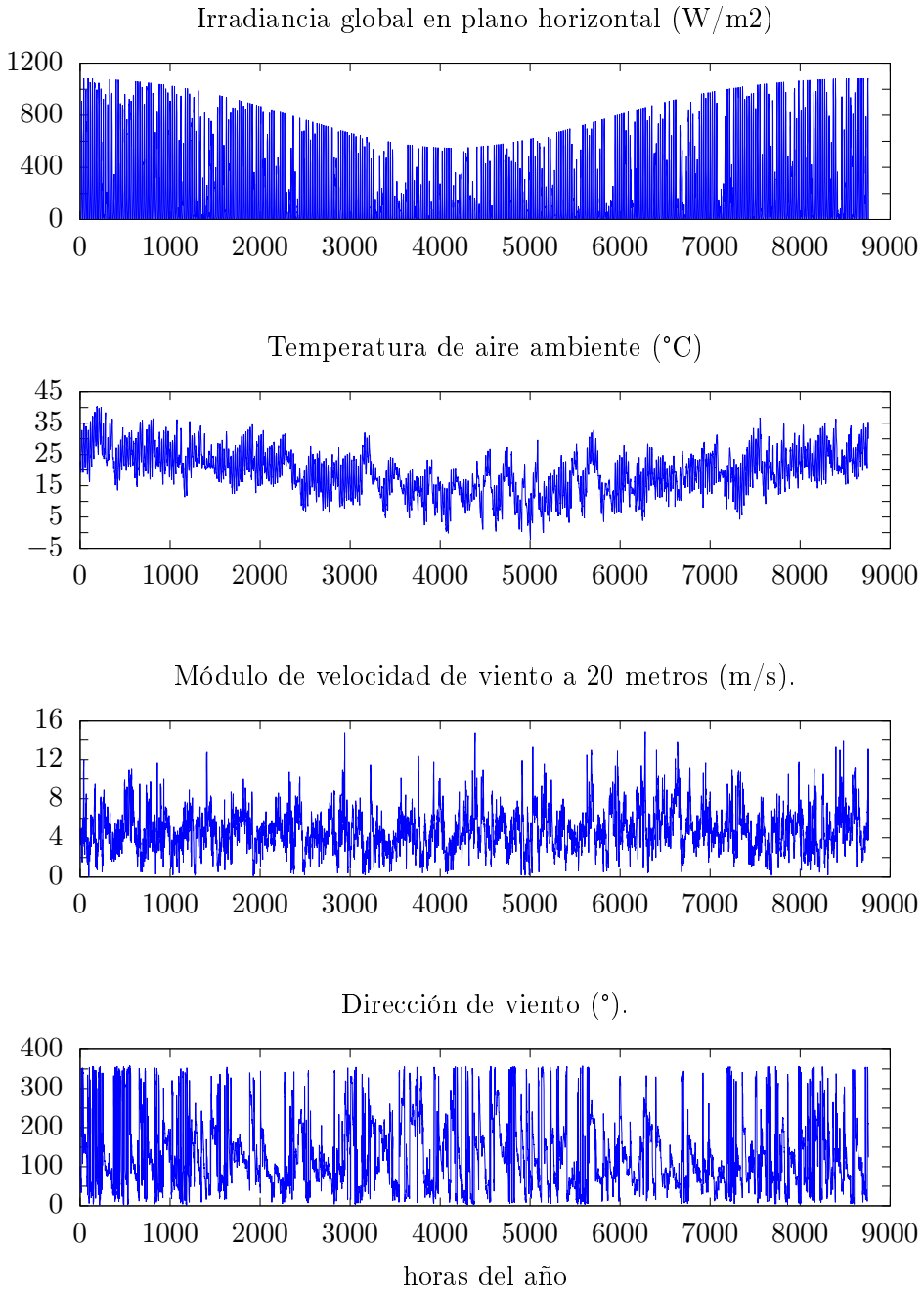


Figura A.5: Irradiancia global en plano horizontal, temperatura de aire ambiente, módulo de velocidad de viento a 20 metros y su dirección, correspondientes al AMT de Salto.



## Anexo B

# Corrección de la velocidad de viento para AMT

Los datos de velocidad de viento para las diferentes ciudades consideradas en la simulación corresponden a datos medidos en lugares relativamente cercanos, ajustando los mismos según las variaciones de altura, rugosidad del terreno y obstáculos presentes en las ciudades.

### **B.1. Velocidad del viento en la capa límite atmosférica en terreno plano, uniforme y estabilidad neutra**

Se distingue una primera región próxima al suelo, denominada subcapa rugosa, en donde se encuentran los obstáculos que producen rugosidad. En esa región el flujo depende de la ubicación de la velocidad considerada tanto en planta como en altura, percibiendo el efecto de los obstáculos. Esta capa se extiende por un espesor entre 1,5 y 3 veces la altura media de los obstáculos.

Por encima de la subcapa rugosa se extiende la subcapa logarítmica, en la cual la distribución de velocidad media en altura sigue una ley de tipo logarítmica como la que presenta la Ecuación B.1

$$U = \frac{u^*}{k} \ln \left( \frac{z - D}{z_0} \right) \quad (\text{B.1})$$

Donde  $U$  representa la velocidad a la altura  $z$ ,  $u^*$  la velocidad de fricción,  $k$  la constante de Von-Karman (igual a 0,41),  $D$  la altura del plano de des-

plazamiento nulo y  $z_0$  la longitud de rugosidad. El espesor de esta región de la atmósfera suele estar de entre 70m y 120m.

La velocidad de fricción se define a partir de la tensión rasante que el suelo realiza sobre el viento y se vincula con la longitud de rugosidad a través de la relación empírica de la Ecuación B.2.

$$\frac{u_1^*}{u_2^*} = \left( \frac{z_{0,1}}{z_{0,2}} \right)^{0,0706} \quad (\text{B.2})$$

La Ecuación B.2 permite hacer un transporte de velocidades aproximado entre dos terrenos con distinta longitud de rugosidad.

La altura del plano de desplazamiento nulo es un corrimiento del origen de cotas que se produce debido a la presencia de la rugosidad. Para terrenos del tipo rurales este parámetro valdría 0m, en tanto que para el centro de una ciudad sería del orden de 20m. En forma aproximada se podría estimar este parámetro de acuerdo a la Ecuación B.3.

$$D = h - \frac{z_0}{k} \quad (\text{B.3})$$

Donde  $h$  es la altura media de los elementos de rugosidad.

Por encima de la subcapa logarítmica la distribución de velocidad en altura podría aproximarse por una ley de tipo potencial como expresa la Ecuación B.4

$$U = U_{ref} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^n \quad (\text{B.4})$$

Donde  $n$  es un parámetro empírico que depende de la longitud de rugosidad y  $U_{ref}$  a una velocidad definida a una altura de referencia,  $z_{ref}$ , correspondiente. La Ecuación B.4 es válida desde el límite de la subcapa rugosa (100 m aprox.) hasta el final de la capa límite (600 m aprox), donde se establece el viento geostrófico (que es igual para sitios cercanos).

## B.2. Uso de la velocidad del viento para el cálculo de presión sobre las viviendas

Para el cálculo de las presiones debidas al viento que se establecen sobre las estructuras, se parte de la definición de los coeficientes de presión  $C_P$ .

$$C_P = \frac{P_w}{\rho v^2 / 2} \quad (\text{B.5})$$

Donde  $P_w$  corresponde a presión del viento en la superficie relativa a la presión estática en el flujo sin perturbaciones,  $\rho$  la densidad del aire y  $v$  la velocidad a la altura de referencia (en general, la altura del edificio).

La determinación de los coeficientes de presión se puede realizar a través de mediciones en sitio, en túneles de viento o por medio de simulaciones numéricas con técnicas de mecánica de los fluidos computacional (CFD).

Usualmente, en la determinación experimental de los valores de  $C_P$ , se suele utilizar el valor de la velocidad que existiría en el lugar donde se encuentra la casa (una ciudad por ejemplo) a la altura del techo de la misma, sin considerar el efecto de los obstáculos (otros edificios, árboles, etc.). Sin embargo, para tener en cuenta este efecto se utilizan dos estrategias: modificar el valor de la velocidad del viento debido al efecto del entorno de la edificación u obtener los valores de  $C_P$  simulando los entornos de las edificaciones.

La fórmula para el cálculo de  $C_P$  que utiliza Energy+ se basa en el trabajo Swami y Chandra [68] y se refiere a casas aisladas. Los autores proponen distintos coeficientes para modificar el caudal de infiltración (no el valor de  $C_P$ ) que derivan de los coeficientes de apantallamiento generalizados de Sherman y Modera [69].

### B.3. Ajustes de velocidad por cambio de terreno y abrigo

En esta sección se presentan distintos métodos de ajustes para las velocidades necesarias para determinar las infiltraciones.

#### B.3.1. Ajuste de la velocidad de Sherman y Modera

Sherman y Modera [69] proponen corregir la velocidad con un factor,  $C'$ , mediante la Ecuación B.6, para tener en cuenta el efecto de apantallamiento en la edificación.

$$U = U_{met} C' \frac{\alpha(z/10)^\gamma}{\alpha_{met}(z_{met}/10)^{\gamma_{met}}} \quad (\text{B.6})$$

Donde el subíndice *met* define la magnitud relacionada a los datos meteorológicos,  $\alpha$  y  $\gamma$  son coeficientes que dependen del tipo de terreno circundante, ver Tabla B.1.

En la Tabla B.2 se presentan diferentes valores de  $C'$  para diferentes condiciones de apantallamiento.

Tabla B.1: Coeficientes para el cálculo del transporte de la velocidad entre diferentes terrenos.

Descripción del terreno	$\gamma$	$\alpha$
Océano u otro cuerpo de agua con al menos 5km de extensión irrestricta	0,10	1,30
Terreno plano con algún obstáculo aislado (construcciones con árboles bien separados)	0,15	1,00
Área rural con edificaciones bajas, árboles, etc.	0,20	0,85
Área urbana, industrial o bosque.	0,25	0,67
Centro de una gran ciudad (ej. Manhattan)	0,35	0,47

Tabla B.2: Valores de  $C'$  para diferentes condiciones de apantallamiento.

$C'$	Descripción
0,34	Sin obstrucción o apantallamiento local en absoluto.
0,34	Leve apantallamiento local, con algunas obstrucciones.
0,25	Moderado apantallamiento local, con algunas obstrucciones entre dos edificaiones altas.
0,19	Elevado apantallamiento, con obstrucciones en la mayor parte del perímetro.
0,11	Muy elevado apantallamiento, grandes obstrucciones alrededor del perímetro entre dos edificaciones altas.

### B.3.2. Ajuste de la velocidad de Walker y Wilson

Para el cálculo de las presiones debidas al viento, Walker y Wilson [70] realizan el transporte de velocidad desde el sitio de medición al entorno de la edificación mediante una fórmula potencial y asumiendo que la casa se encuentra aislada, y consideran el efecto del entorno de la casa reduciendo el valor de velocidad que se obtendría en el techo de la casa por medio del factor de shelter. Utilizando la Ecuación B.7 para realizar el transporte de velocidad.

$$U = U_{met} \left( \frac{80 + \delta_z}{z_{met}} \right)^{p_{met}} \left( \frac{z}{80 + \delta_z} \right)^p \quad (\text{B.7})$$

Donde  $\delta_z$  es la altura media de los elementos de rugosidad, y  $p$  y  $p_{met}$  son exponentes que varían según la rugosidad del lugar. Los autores recomiendan usar  $p = 0,15$  para la estación de medición y  $p = 0,30$  para un entorno urbano.

**Factor de abrigo**

Debido a que el terreno dentro de las ciudades dista mucho de ser plano y uniforme, y que a la altura de interés estaría dentro de la subcapa rugosa, Walker y Wilson [70] proponen corregir la velocidad, multiplicándola por un factor de abrigo,  $S$  (en inglés, shelter), según la Ecuación B.8.

$$U_c = SU \tag{B.8}$$

Donde  $U$  es la velocidad del viento a la altura del techo de la edificación y  $U_c$  es la velocidad reducida que se establecería en la estela producida por las obstrucciones.

En su trabajo, también presentan valores aproximados de dicho factor en función del tipo de terreno (ver Tabla B.3) y se advierte que este aspecto es de las principales fuentes de error en el cálculo de infiltraciones.

Tabla B.3: Valores del factor de abrigo propuestos por Walker y Wilson [70].

Factor de abrigo $S$	Descripción del tipo de terreno
1,00	Sin obstrucciones.
0,90	Pocas obstrucciones dentro de un radio de dos veces la altura de los edificios.
0,70	Muchas obstrucciones dentro de un radio de dos veces la altura de los edificios.
0,50	Muchas obstrucciones dentro de un radio de una vez la altura de los edificios.
0,30	Muchas obstrucciones adyacentes a los edificios.

**B.3.3. Corrección implementada en las simulaciones**

Debido a la similitud entre las distintas fórmulas para el transporte de velocidad desde el sitio de medición (usualmente medido a una altura de 10 metros y en terreno rural) y el de la edificación (en terreno urbano y a una altura en el entorno de 3 metros generalmente), por simplicidad, se utilizará el modelo potencial implementado en EnergyPlus.

La configuración utilizada dentro del software requiere de se definan las siguientes entradas:

- **Site:WeatherStation**, los parámetros correspondiente a la estación meteorológica

- **Wind Sensor Height Above the Ground;** altura de referencia de los datos (10 m)
- **Wind Speed Profile Exponent:**  $\alpha=0,14$
- **Wind Speed Profile Boundary Layer Thickness:**  $\delta=270\text{m}$
- **Site:HeightVariation:** Parametros correspondientes al sitio de simulación
  - **Wind Speed Profile Exponent:**  $\alpha=0,22$ , se puede modificar a 0,24 para tener resultados más en sintonía con las correlaciones que sugieren Walker y Sherman
  - **Wind Speed Profile Boundary Layer Thickness:**  $\delta=370\text{m}$ .

Para tener en cuenta los efectos de las obstrucciones se debe multiplicar los valores de velocidad por el Factor de Abrigo (Shelter) como sugiere Walker y Wilson. Se utiliza el valor 0,5, el cual se puede modificar a 0,4 en entornos con muchos edificios altos o a 0,6 para entornos con casas separadas.

### B.3.4. Datos disponibles en los Años Meteorológicos Típicos (AMT)

Para los AMT se cuentan con datos de UTE a distintas alturas, los cuales fueron transportados a 20m utilizando la fórmula potencial con las medidas de menor altura, luego de estimar el coeficiente, a partir de las dos medidas a menor altura.

En la Tabla B.4 se presentan los valores de alturas transportados para los diferentes años meteorológicos típicos utilizados en las simulaciones con EnergyPlus.

Tabla B.4: Transporte de alturas para diferentes localidades de referencia de los AMT.

Localidad	Dato de viento disponible (UTE)
Montevideo	a 20m, datos a partir de medidas a 64 y 81m
Salto	a 20m, datos a partir de medidas a 60 y 80m
Rivera	a 20m,datos a partir de medidas a 28 y 66 m
Rocha	a 12 m, sin transportar
Colonia	a 20m, a partir de medidas a 40 y 60m

# Anexo C

## Materiales y configuración

En este capítulo se presentan las configuraciones utilizadas y los materiales para las diferentes unidades definidas en el EnergyPlus.

En la Tabla C.1 se presenta la configuración de las capas y sus materiales para muros exteriores. Las en cada una de las configuraciones el orden es, arriba la capa más al exterior y abajo la capa que está más al interior de la vivienda.

Tabla C.1: Configuración de las capas y sus materiales para muros exteriores.

Muros exteriores		Capa	Material	Rugosidad <sup>†</sup>	e (m)	k (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (J/kgK)	$\alpha_t$	$\alpha_s$
ME 1 Simple: Bloque revocado	$e = 0,16$ $U = 2,76$	revoque impermeable (A+P+H)	Revoque (densidad 2100)	MS	0,025	1,4	2100	1000	0,9	0,6
		bloque de hormigón (12x19x39)	Bloque de Hormigón 12m	MR	0,12	0,75	1875	1000	0,9	0,6
		revoque interior boiseado	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,2
ME 2 Simple: Ladrillo revocado	$e = 0,165$ $U = 2,55$	revoque exterior balaa	revoque	R	0,02	1	1800	1000	0,9	0,6
		revoque impermeable (A+P+H)	Revoque (densidad 2100)	MS	0,01	1,4	2100	1000	0,9	0,6
		ladrillo de campo	Ladrillo de campo	MR	0,12	0,65	1300	1000	0,93	0,55
ME 3 Doble: ladrillo + aislante + ladrillo aplicado	$e = 0,235$ $U = 0,83$	revoque interior boiseado	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,2
		ladrillo de campo apicacado	Ladrillo de campo (expuesto)	MR	0,055	0,79	1300	1000	0,93	0,55
		aislación	Poliestireno expandido		0,03	0,04	30	1450		
ME 4 Doble: ladrillo + aplicado	$e = 0,205$ $U = 2,22$	revoque impermeable (A+P+H)	Revoque (densidad 2100)	MS	0,015	1,4	2100	1000	0,9	0,6
		ladrillo de campo	ticholo 8 huecos (12 x 25 x 25)	MR	0,12	0,462	855	1000	0,93	0,55
		revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,2
ME 5 Simple: ladrillo	$e = 0,23$ $U = 1,99$	ladrillo de campo apicacado	Ladrillo de campo (expuesto)	MR	0,055	0,79	1300	1000	0,93	0,55
		revoque impermeable (A+P+H)	Revoque (densidad 2100)	MS	0,015	1,4	2100	1000	0,9	0,6
		ladrillo de campo	Ladrillo de campo	R	0,12	0,65	1300	1000	0,93	0,55
ME 6 Doble: ladrillo con cámara de aire	$e = 0,3$ $U = 1,4$	revoque exterior	revoque	R	0,02	1	1800	1000	0,9	0,6
		revoque impermeable (A+P+H)	Revoque (densidad 2100)	MS	0,015	1,4	2100	1000	0,9	0,6
		ladrillo de campo	Ladrillo de campo	MR	0,05	0,65	1300	1000	0,93	0,55
ME 7 Simple: ladrillo aparejo inglés	$e = 0,29$ $U = 1,71$	mortero de toma	Mortero	S	0,01	0,41	999	1000	0,9	0,5
		ladrillo de campo	Ladrillo de campo	MR	0,12	0,65	1300	1000	0,93	0,55
		revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,2
ME 8 Doble: con aislación	$e = 0,32$ $U = 1,71$	ladrillo de campo apicacado	Ladrillo de campo (expuesto)	MR	0,12	0,79	1300	1000	0,93	0,55
		revoque impermeable (A+P+H)	Revoque (densidad 2100)	MS	0,015	1,4	2100	1000	0,9	0,6
		ladrillo de campo	Ladrillo de campo	MR	0,12	0,65	1300	1000	0,93	0,55
ME 8 doble: con aislación	$e = 0,32$ $U = 1,71$	revoque exterior	revoque	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,6
		revoque impermeable (A+P+H)	Revoque (densidad 2100)	MS	0,015	1,4	2100	1000	0,9	0,6
		ticholo	ticholo 8 huecos (12 x 25 x 25)	MR	0,12	0,462	855	1000	0,93	0,55
ME 8 doble: con aislación	$e = 0,32$ $U = 1,71$	aislación	Poliestireno expandido		0,03	0,04	30	1450		
		ticholo	ticholo 8 huecos (12 x 25 x 25)	MR	0,12	0,462	855	1000	0,93	0,55
		revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,2

<sup>†</sup> Las unidades de los espesores, e, es m y de la transmitancia, U, es W/m<sup>2</sup>K.

<sup>‡</sup> MS - media suave, MR - Media áspera, R - Áspera, S - Suave (recubierto con cerámico).

Nótese que tanto para la absorptividad a longitudes de onda larga (o terrestres,  $\alpha_t$ ), como para absorptividad a longitudes de onda corta (o solar,  $\alpha_s$ ), los únicos valores que se necesitan son los de las capas en los extremos (interior o exterior), aunque hay datos para las capas intermedias, no son utilizados en las simulaciones.

En la Tabla C.2 se presenta la configuración de las capas y sus materiales para muros interiores.

Tabla C.2: Configuración de las capas y sus materiales para muros interiores.

Muros interiores		Capa	Material	Rugosidad <sup>†</sup>	e (m)	k (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (J/kgK)	$\alpha_t$	$\alpha_s$
MI 1- Bloque visto	e=0,12		Bloque de Hormigón 12cm	R	0,12	0,75	1875	1000	0,9	0,6
MI 2 - ladrillo visto	e=0,12		Ladrillo de campo	MR	0,12	0,65	1300	1000	0,93	0,55
MI 3 - tabique liviano	e=0,075		Placa de yeso	S	0,0125	0,25	900	1000	0,9	0,2
			Lana de roca (densidad 15-200)	MR	0,05	0,04				
			Placa de yeso	S	0,0125	0,25	900	1000	0,9	0,2
MI 4 - ticholo revocado	e=0,15	revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,6
		ticholo	ticholo 8 huecos (12 x 25 x 25)	MR	0,12	0,462	855	1000	0,9	0,6
		revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,6
MI 5 - ladrillo revocado	e=0,15	revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,6
		ladrillo de campo	Ladrillo de campo	MR	0,12	0,65	1300	1000	0,93	0,55
		revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,6

<sup>†</sup>Las unidades de los espesores, e, es m.

<sup>‡</sup> MS - media suave, MR - Media áspera, R - Áspera, S - Suave.

En la Tabla C.3 se presenta la configuración de las capas y sus materiales para las cubiertas utilizadas en los modelos.

Tabla C.3: Configuración de las capas y sus materiales para las cubiertas.

Cubiertas		Capa	Material	Rugosidad <sup>†</sup>	e (m)	k (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (J/kgK)	$\alpha_t$	$\alpha_s$
C 1- Chapa	e=0,15	Chapa	Chapa [acero]	S	0,0005	50	7800	450	0,25	0,8
	U=0,72	Cieltraso OSB	Madera cedro (pino)	MS	0,15	0,12	450	1600	0,6	0,9
C 2- Losa sin aislación	e=0,10	alisado impermeable (A+P+H)	Revoque (densidad 2100)	MS	0,015	1,4	2100	1000	0,9	0,6
	U=5,39	losa de hormigón 8cm	Hormigón armado	MR	0,08	2,3	2300	1000	0,9	0,6
C 3- Losa con aislación invertida	e=0,305 U=0,74	terminación carpeta 5cm aislación	Contrapiso (hormigón)	MS	0,05	1,35	2000	1000	0,9	0,5
		membrana asfáltica	Poliestireno expandido	MS	0,04	0,04	30	1450		
		alisado	mortero	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,5
		relleno	Hormigón de cascote	R	0,08	0,95	1800	1000	0,9	0,5
		losa de hormigón	Hormigón armado	MR	0,1	2,3	2300	1000	0,9	0,5
		revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,6
C 4- losa con aislante	e=0,309 U=1,11	alisado	mortero	MS	0,05	1	1800	1000	0,9	0,5
		impermeabilización	Asfalto		0,004	0,7	2100	1000		
		alisado	mortero	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,5
		relleno con pendiente	Hormigón de cascote	R	0,08	0,95	1800	1000	0,9	0,5
		aislación	Poliestireno expandido	MS	0,02	0,04	30	1450		
		barrera de vapor								
C 5- losa con aplacado	e=0,289 U=2,81	alisado	mortero	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,5
		losa de hormigón	Hormigón armado	MR	0,1	2,3	2300	1000	0,9	0,5
		revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,2
		tejuela	Ladrillo de campo (expuso)	MR	0,03	0,79	1300	1000	0,93	0,55
		arena	Balsto (Arena y grava)	VR	0,05	2	1950	1045	0,9	0,4
		asfalto con velo de vidrio	Asfalto		0,004	0,7	2100	1000		
C 5- losa con aplacado	e=0,289 U=2,81	alisado	mortero	MS	0,01	1	1800	1000	0,9	0,5
		relleno con pendiente	Hormigón de cascote	R	0,08	0,95	1800	1000	0,9	0,5
		losa de hormigón	Hormigón armado	MR	0,1	2,3	2300	1000	0,9	0,5
		revoque interior	revoque	MS	0,015	1	1800	1000	0,9	0,2

<sup>†</sup>Las unidades de los espesores, e, es m y de la transmitancia, U, es W/m<sup>2</sup>K.

<sup>‡</sup> VR - Muy áspera, MS - media suave, MR - Media áspera, R - Áspera, S - Suave (recubierta con cerámico).

En la Tabla C.4 se presenta la configuración de las capas y sus materiales para los pisos utilizadas en los modelos. Al igual que en la Tabla C.1, el orden



es, arriba la capa más al exterior y abajo la capa que está más al interior de la vivienda.

Tabla C.4: Configuración de las capas y sus materiales para los pisos.

Pisos		Capa	Material	Rugosidad <sup>‡</sup>	e (m)	k (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (J/kgK)	$\alpha_t$	$\alpha_s$
P10	e=0,105	pavimento: baldosa	baldosa cerámica	S (*)	0,005	1	2000	800	0,95	0,45
		mortero	Mortero	S (*)	0,02	0,41	999	1000	0,9	0,5
		contrapiso	Contrapiso (hormigón)	MS	0,08	1,35	2000	1000	0,9	0,5
P11	e=0,105	pavimento: baldosa	baldosa cerámica	MS	0,005	1	2000	800	0,9	0,5
		mortero	Mortero	MS	0,02	0,41	999	1000	0,9	0,5
		contrapiso	Contrapiso (hormigón)	R	0,08	1,35	2000	1000	0,9	0,5
P21	e=0,11	pavimento: parquet	madera	MS	0,01	0,13	500	1600	0,6	0,9
		mortero	Mortero	S (*)	0,02	0,41	999	1000	0,9	0,5
		contrapiso	Contrapiso (hormigón)	MS	0,08	1,35	2000	1000	0,9	0,5
IC1	e=0,145	pavimento: baldosa	baldosa cerámica	S	0,005	1	2000	800	0,95	0,45
		mortero	Mortero	S (*)	0,02	0,41	999	1000	0,9	0,5
		losa	Hormigón armado	MR	0,1	2,3	2300	1000	0,9	0,5
		revoque	revoque	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,6
IC2	e=0,15	pavimento: madera	madera	MS	0,01	0,13	500	1600	0,6	0,9
		alisado	mortero	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,5
		losa	Hormigón armado	MR	0,1	2,3	2300	1000	0,9	0,5
		revoque	revoque	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,6
IF1	e=0,145	revoque	revoque	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,6
		losa	Hormigón armado	MR	0,1	2,3	2300	1000	0,9	0,5
		mortero	Mortero	S (*)	0,02	0,41	999	1000	0,9	0,5
		pavimento: baldosa	baldosa cerámica	S	0,005	1	2000	800	0,95	0,45
IF2	e=0,15	revoque	revoque	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,6
		losa	Hormigón armado	MR	0,1	2,3	2300	1000	0,9	0,5
		alisado	mortero	MS	0,02	1	1800	1000	0,9	0,5
		pavimento: madera	madera	MS	0,01	0,13	500	1600	0,6	0,9

<sup>†</sup>Las unidades de los espesores, e, es m.

<sup>‡</sup> VR - Muy áspera, MS - media suave, MR - Media áspera, R - Áspera, S - Suave, S (\*) - Suave (recubierto con cerámico).

En la Tabla C.5 se presenta la configuración de los materiales (y las capas) para las puertas utilizadas en los modelos.

Tabla C.5: Configuración de los materiales (y las capas) para las puertas.

	Puerta	Material	Rugosidad <sup>‡</sup>	e (m)	k (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (J/kgK)	$\alpha_t$	$\alpha_s$	
PtaExt1	puerta de hierro	chapa (acero)	S	0,001	50	7800	450	0,25	0,8	
PtaExt2	puerta de madera	madera	MS	0,038	0,13	500	1600	0,6	0,9	
PtaInt1		Panel de fibras	MS	0,005	0,14	600	1700	0,6	0,9	
		cámara de aire		0,025						
		Panel de fibras	MS	0,005	0,14	600	1700	0,6	0,9	

<sup>‡</sup> MS - media suave, S - Suave.

En la Tabla C.6 se presentan las propiedades del material utilizado para modelar las ventanas.

Tabla C.6: Propiedades de ventanas

Ventana	V1
Material	vidrio
Espesor	4mm
Transmisividad solar a incidencia normal	0,8800
Transmisividad infrarroja	0
Reflectividad solar del lado frontal y posterior	0,0808
Transmisividad visible a incidencia normal	0,8800
Reflectividad visible en la parte frontal y posterior	0,0808
Emisividad hemisférica infrarroja frontal y posterior	0,8400
Conductividad	1,4 W/mK

Para el cálculo de las ventanas mejoradas con doble vidrio hermético se utilizaron las mismas propiedades que el vidrio simple, según la configuración de la Tabla C.7.

Tabla C.7: Propiedades de ventanas de mejor calidad

Capa 1	Vidrio, 4mm
Capa 2	Cámara de aire, 6mm
Capa 3	Vidrio, 5mm

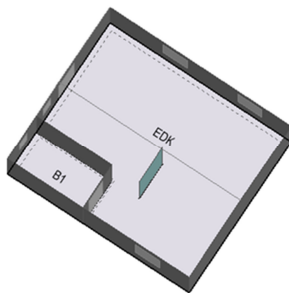
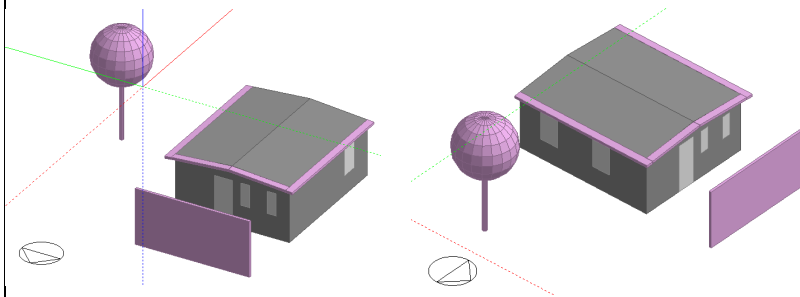
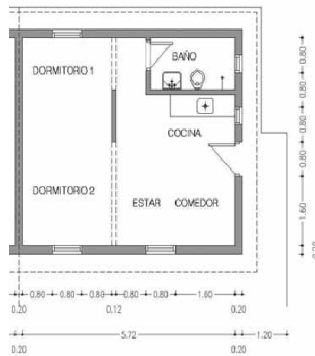
## Anexo D

# Tipologías de referencia

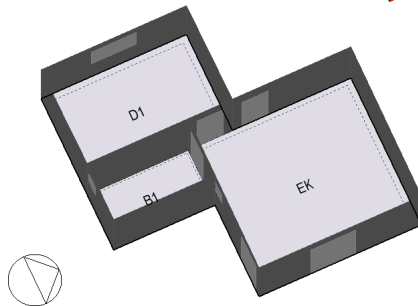
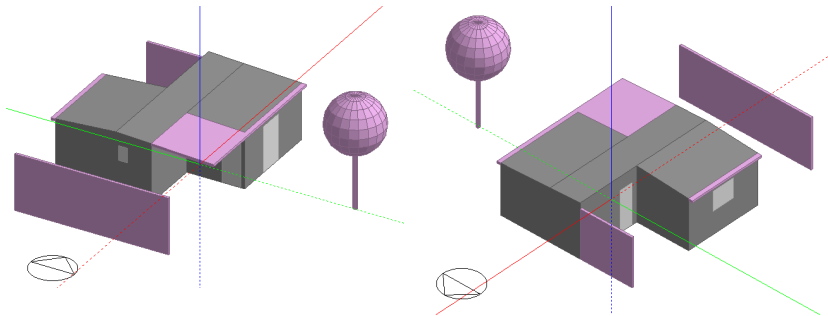
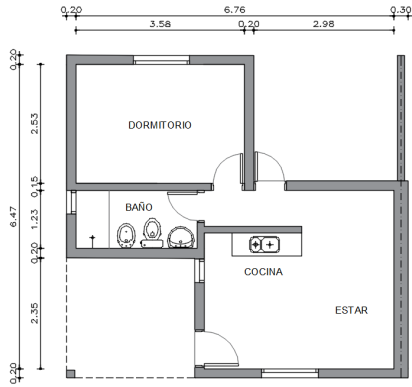
En este capítulo se presentan las tipologías de referencias utilizadas en el trabajo.

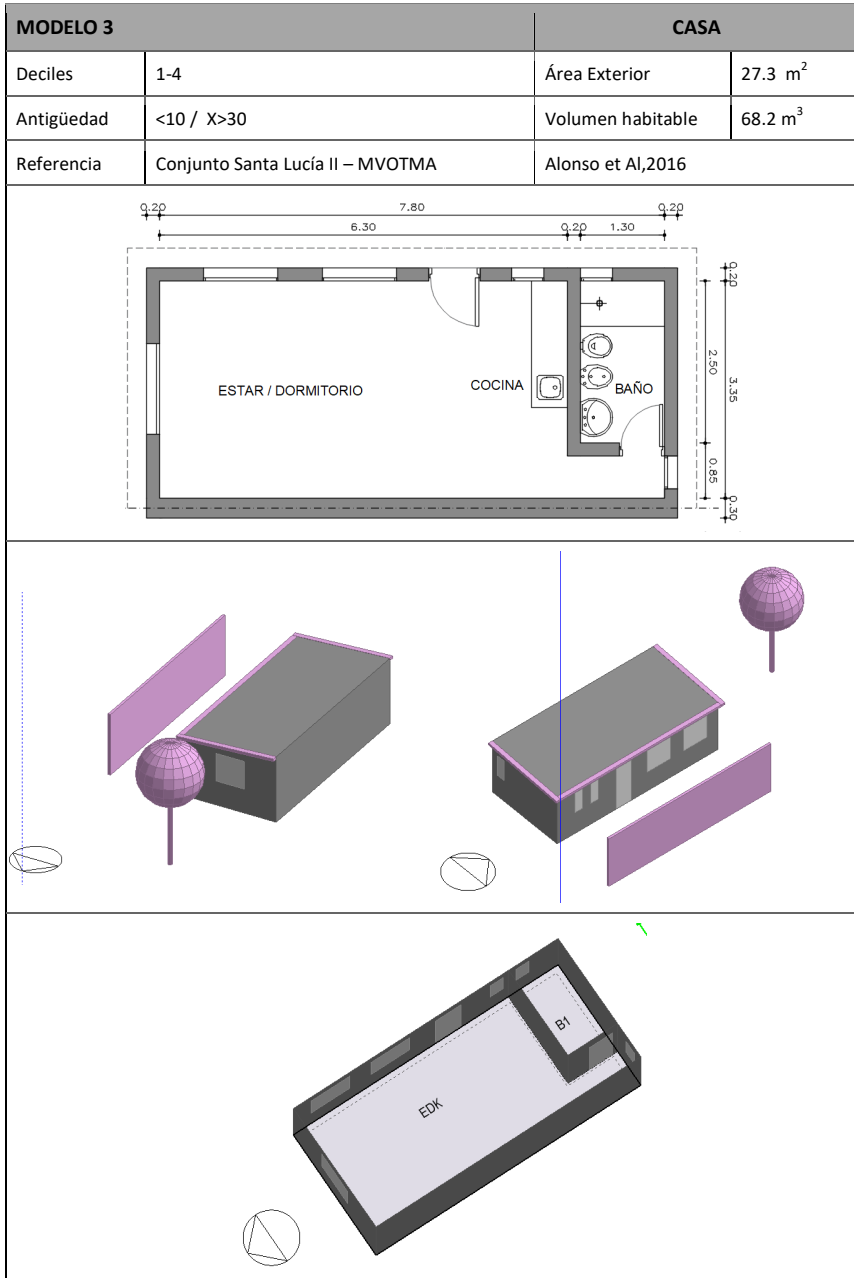
Cada una se identifica mediante una ficha técnica que describe el nombre del modelo, el tipo de edificación, los deciles socioeconómicos para los que se define esa vivienda, el área habitable, los rangos de antigüedad para los que se define el modelo, el volumen habitable, una referencia sobre donde ha sido utilizado y su publicación.

MODELO 1		CASA	
Deciles	1-4	Área habitable	27.5 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	68.7 m <sup>3</sup>
Referencia	Conjunto Mandubí-Rivera Conjunto Santa Victoria – Chuy Conjunto Molinos de raffo - Mvdeo	Alonso et Al,2016	

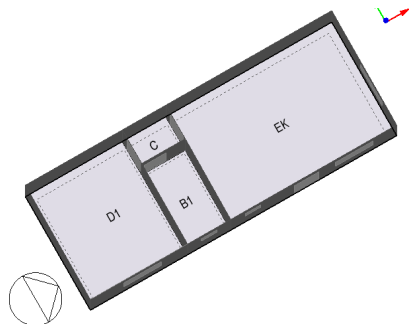
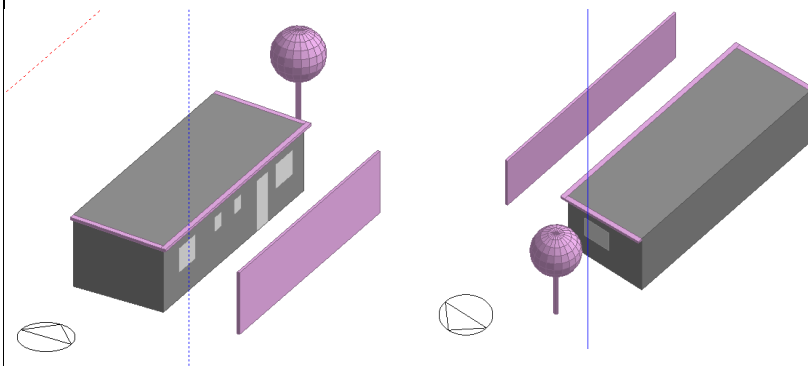
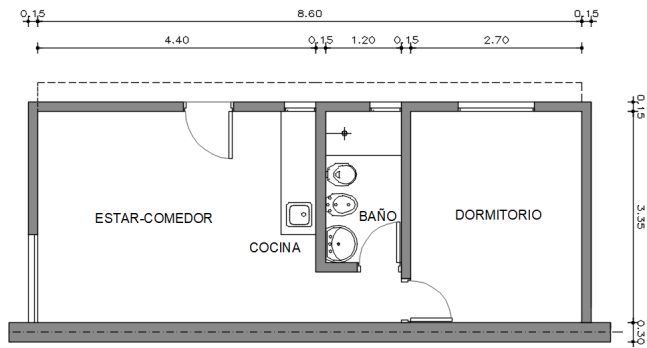


MODELO 2		CASA	
Deciles	1-4 / 5-7 / 8-10	Área habitable	27.8 m <sup>2</sup>
Antigüedad	<10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	69.7 m <sup>3</sup>
Referencia	Viviendas Tacurú	Realojo Intendencia Montevideo	





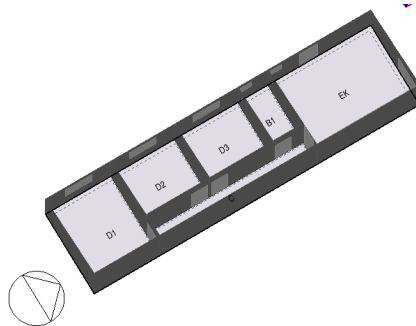
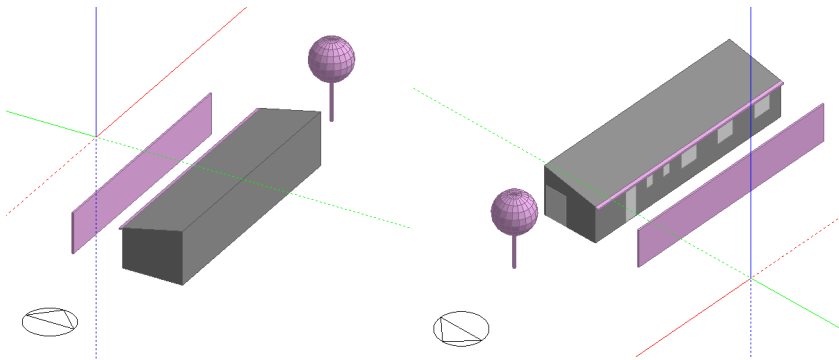
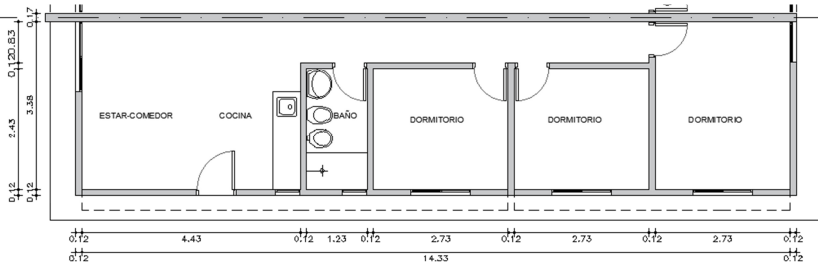
MODELO 4		CASA	
Deciles	5-7 / 8-10	Área habitable	30.1 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	75.2 m <sup>3</sup>
Referencia	Solís de Mataojo – MVOTMA Conjunto Rio Negro-Young	Alonso et Al,2016	



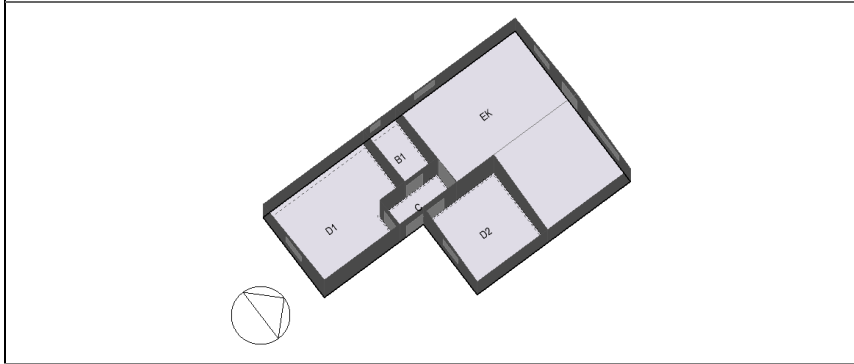
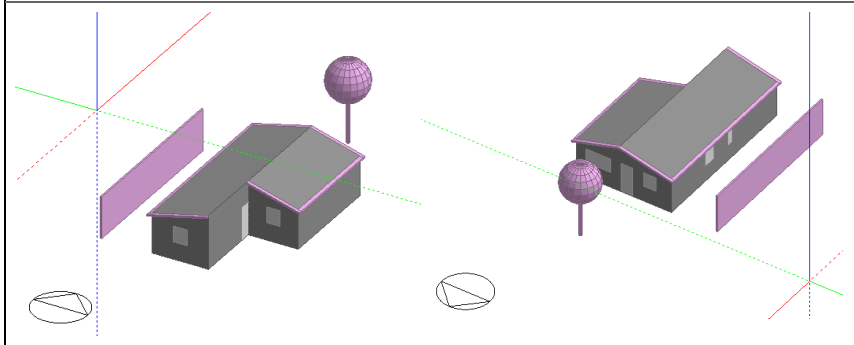
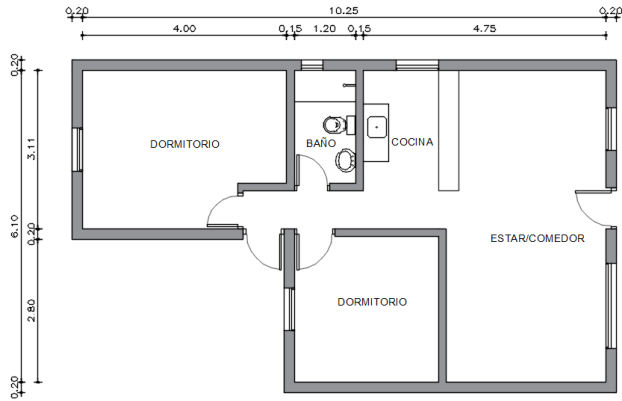
MODELO 5		CASA	
Deciles	1-4	Área habitable	37.2 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	107.2 m <sup>3</sup>
Referencia	Realajo La Vereda	Servicio de Tierras y Vivienda- IM	



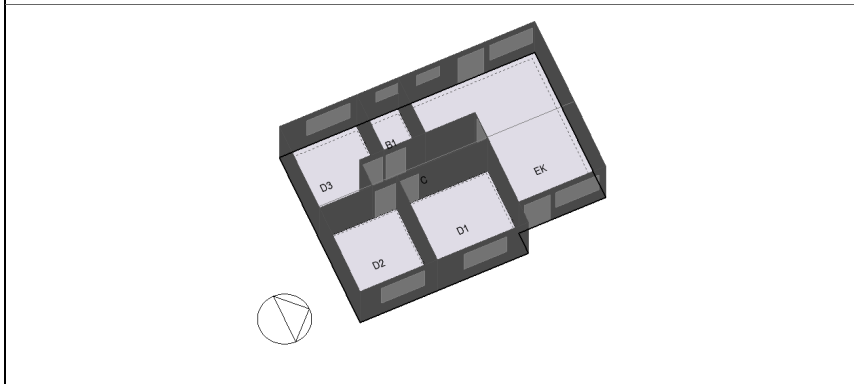
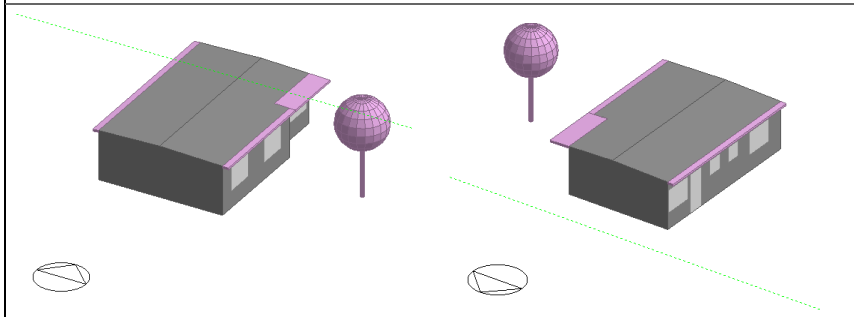
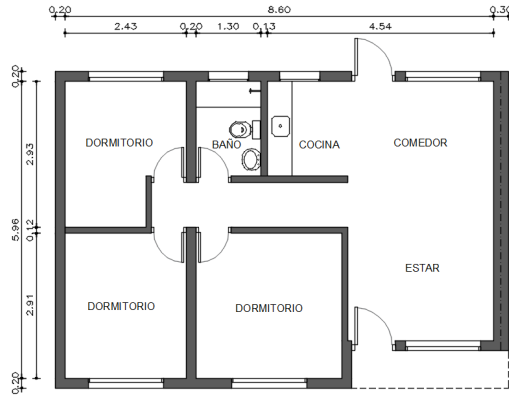
MODELO 6		CASA	
Deciles	1-4	Área habitable	48.1 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	133.5 m <sup>3</sup>
Referencia	Programa de Mejoramiento de Barrios		



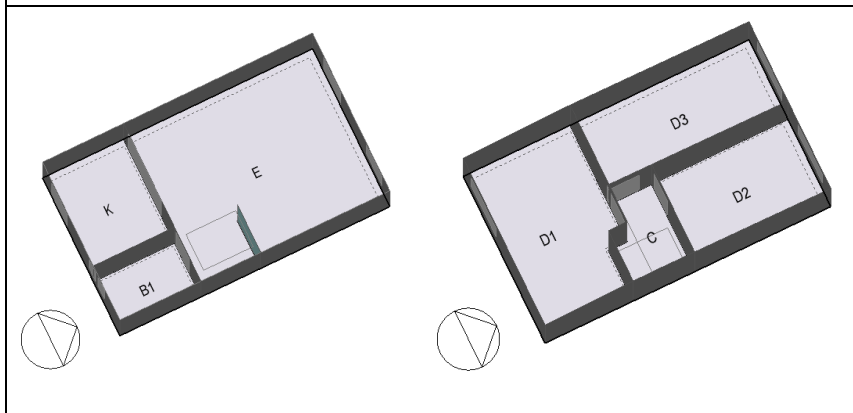
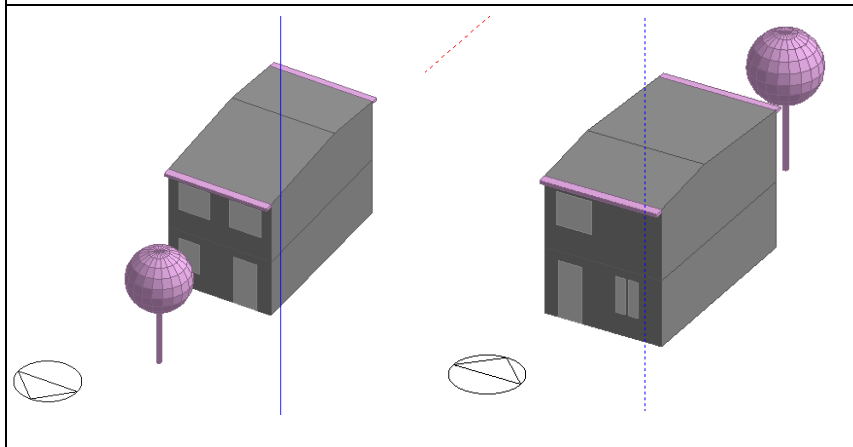
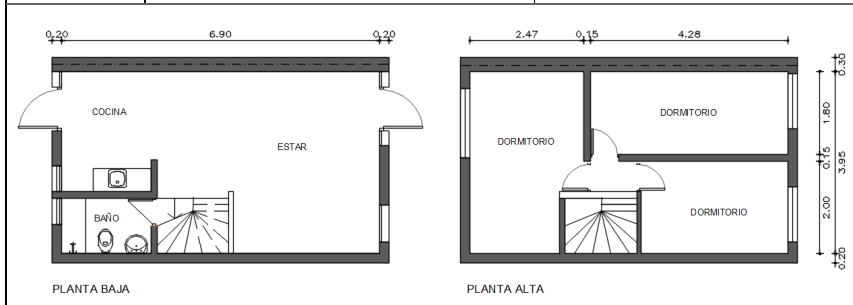
MODELO 7		CASA	
Deciles	1-4 / 5-7 / 8-10	Área habitable	50.2 m <sup>2</sup>
Antigüedad	<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	137.8 m <sup>3</sup>
Referencia	Plan Lote IM	Servicio de Tierras y Vivienda- IM	

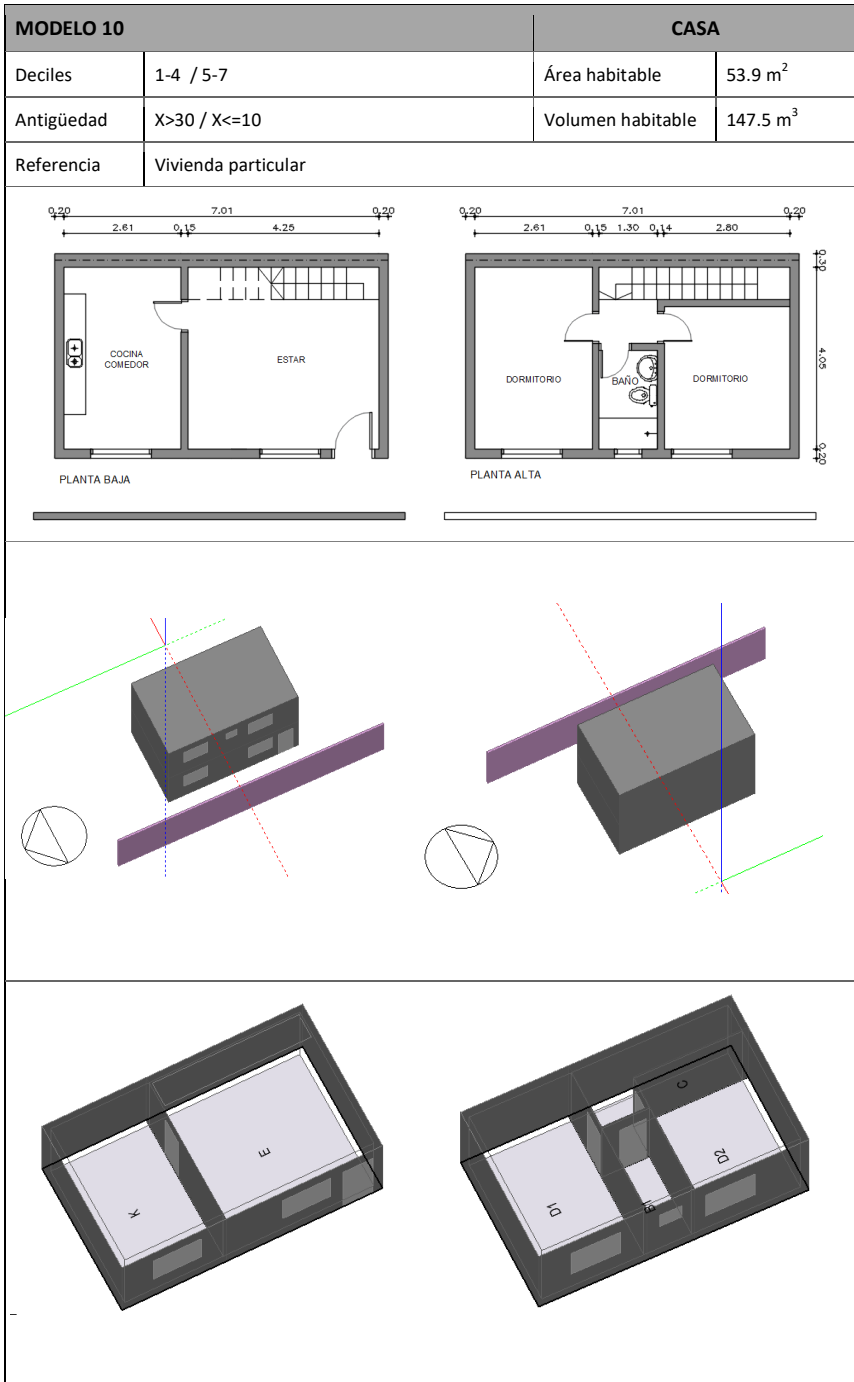


MODELO 8		CASA	
Deciles	1-4 / 8-10	Área habitable	50.0 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X>30	Volumen habitable	125.3 m <sup>3</sup>
Referencia	COVITRIVIC - CCU / Cerrito de la victoria	Nahoum et Al, 2008	

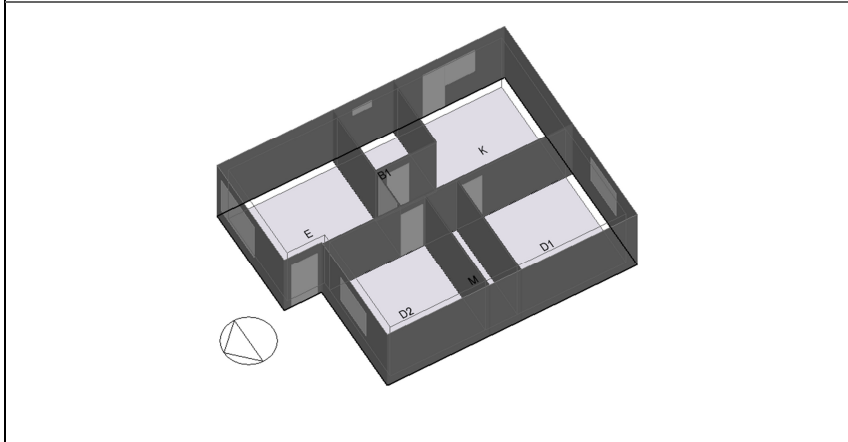
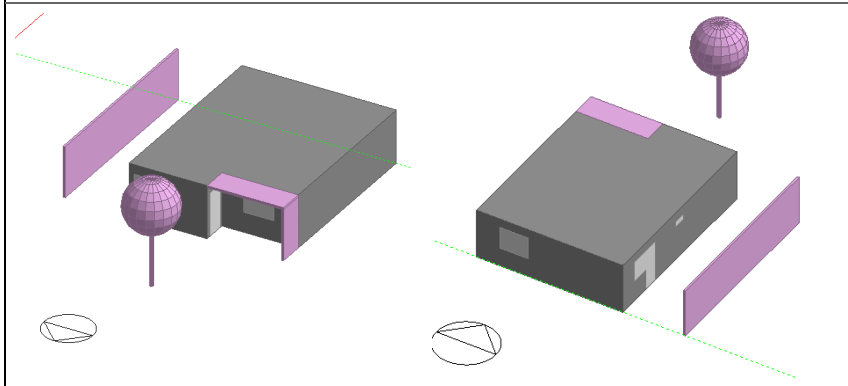
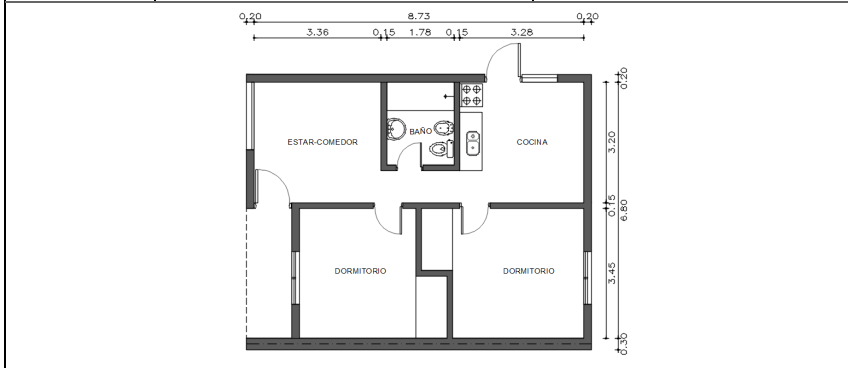


MODELO 9		CASA	
Deciles	1-4	Área habitable	53.2 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X>30	Volumen habitable	137.8 m <sup>3</sup>
Referencia	COVIHON / Nuevo Paris/ Mvdeo Similar PMB El Apero / Mvdeo	Nahoum et Al, 2008	

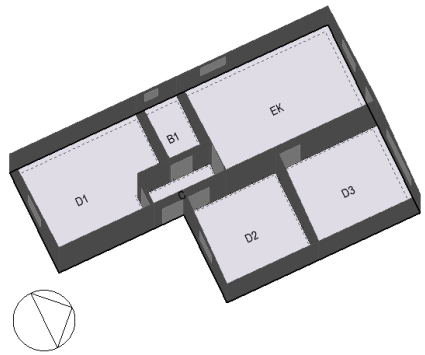
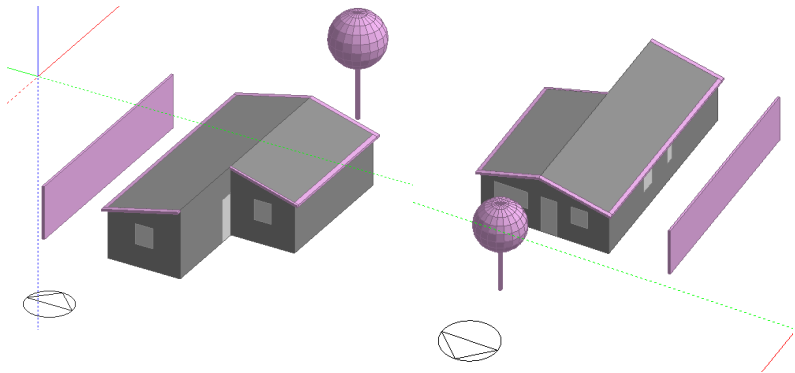
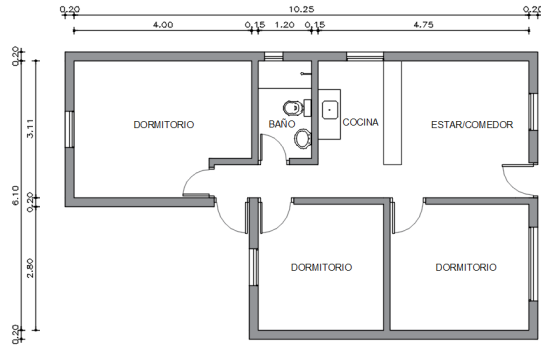




MODELO 11		CASA	
Deciles	5-7	Área habitable	55.1 m <sup>2</sup>
Antigüedad	<10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	132.1 m <sup>3</sup>
Referencia	Plano Económico	Servicio de tierras y viviendas -IM	



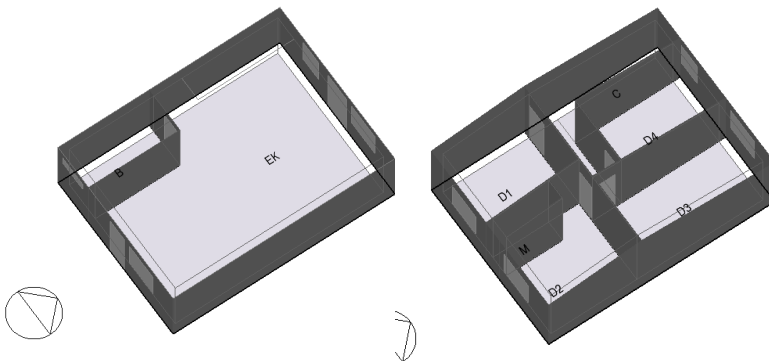
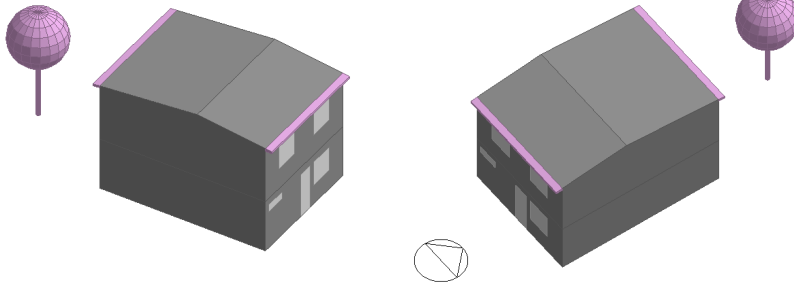
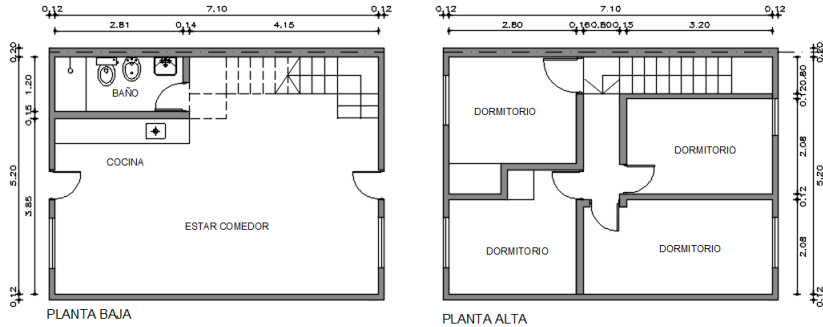
MODELO 12		CASA	
Deciles	5-7	Área habitable	50.2 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X>30	Volumen habitable	137.8 m <sup>3</sup>
Referencia	Plan Lote IM	Servicio de tierras y viviendas -IM	



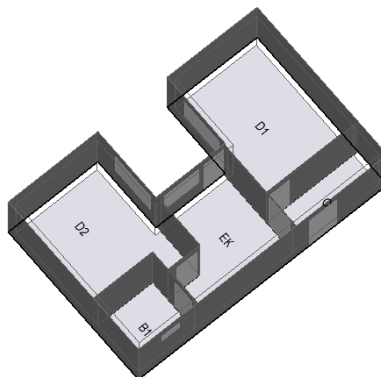
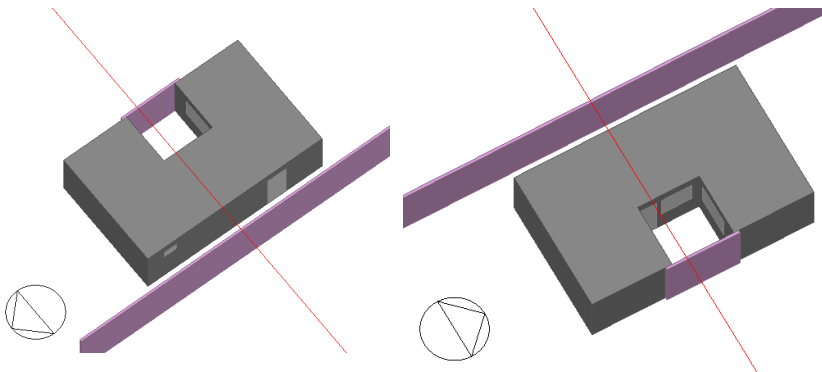
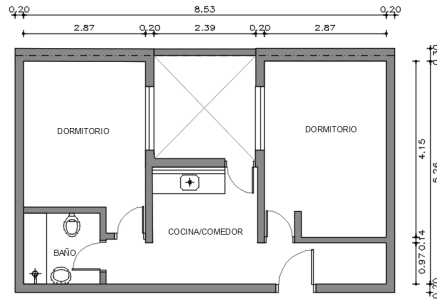
MODELO 13		CASA	
Deciles	8-10	Área habitable	32.9 m <sup>2</sup>
Antigüedad	<10 / 10<X<=30	Volumen habitable	144.2 m <sup>3</sup>
Referencia	Plan Lote	Servicio de tierras y vivienda IM	



MODELO 14		CASA	
Deciles	1-4	Área habitable	71.2 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	188.7 m <sup>3</sup>
Referencia	COVIITTU	Nahoum et Al, 2008	

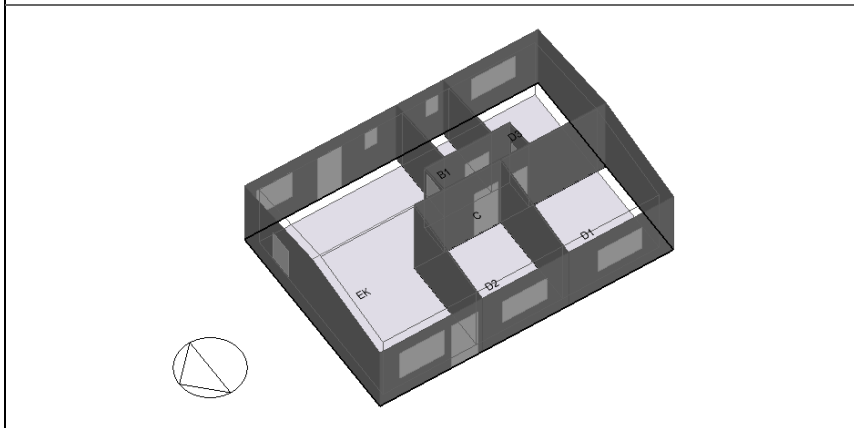
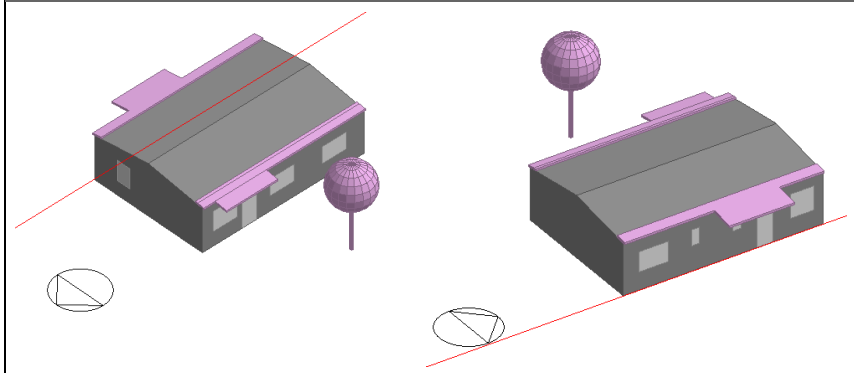
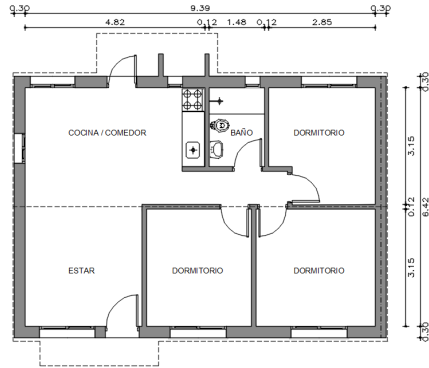


MODELO 15		CASA	
Deciles	1-4	Área habitable	37.9 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	94.8 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda PH en corredor	Vivienda particular	

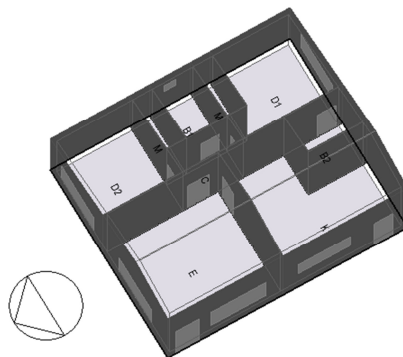
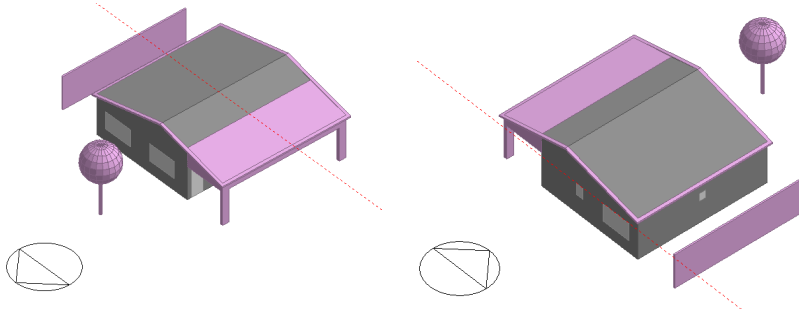
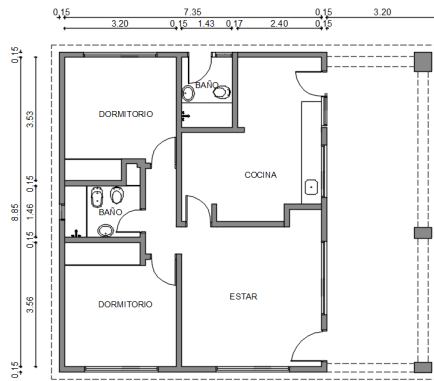


MODELO 16		CASA	
Deciles	1-4 / 5-7	Área habitable	56.7 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	157.1 m <sup>3</sup>
Referencia	Plan Lote IM	Servicio de tierras y viviendas -IM	

MODELO 17		CASA	
Deciles	1-4	Área habitable	60.4 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	167.3 m <sup>3</sup>
Referencia	MEVIR		

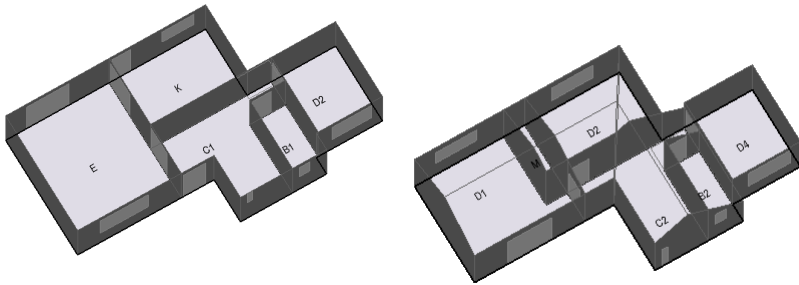
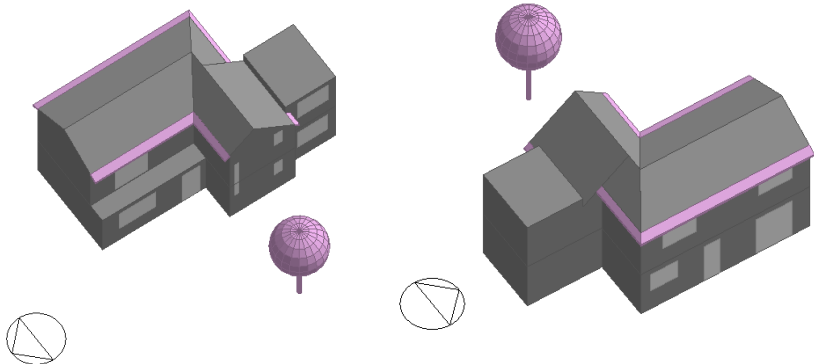
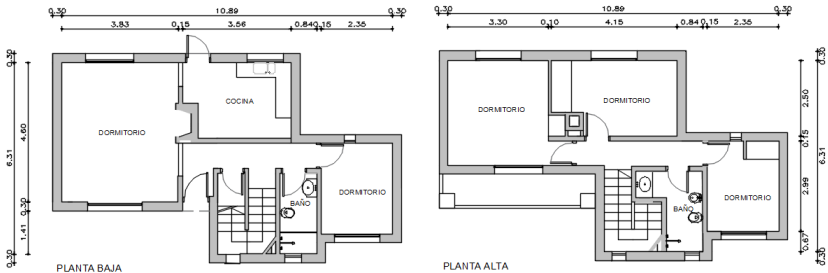


MODELO 18		CASA	
Deciles	5-7	Área habitable	65.3 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X>30	Volumen habitable	238.2 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular		

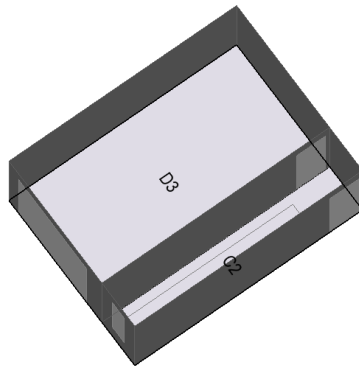
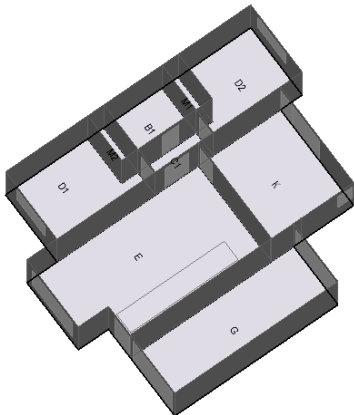
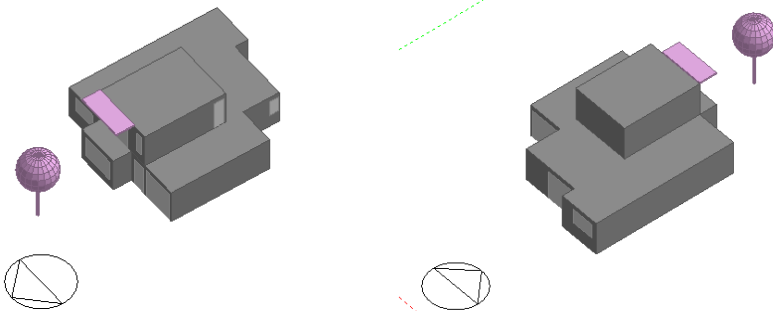
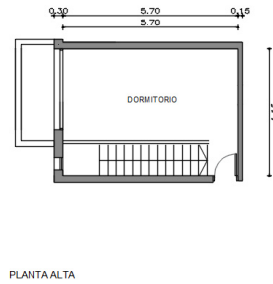
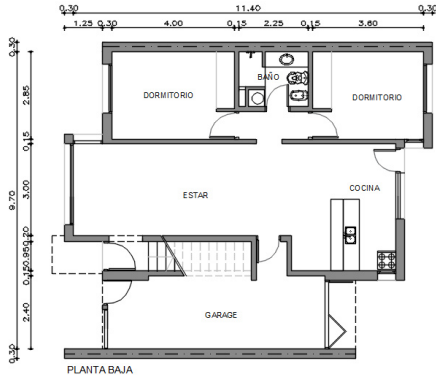


MODELO 19		CASA	
Deciles	5-7	Área habitable	124.2 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X>30	Volumen habitable	415.1 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular tipo:Casa patio		

MODELO 20		CASA	
Deciles	5-7	Área habitable	93.5 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X>30	Volumen habitable	250.1 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular Solymar		



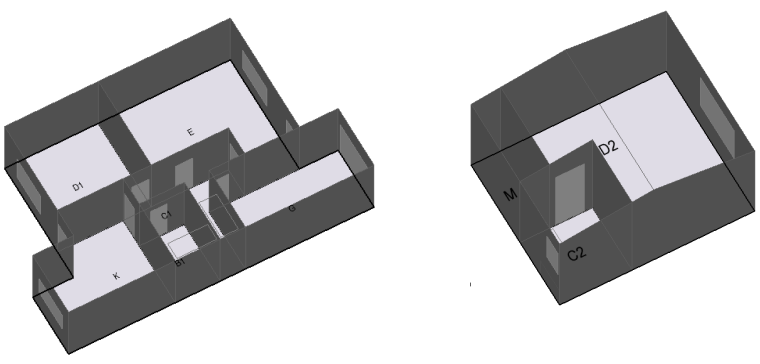
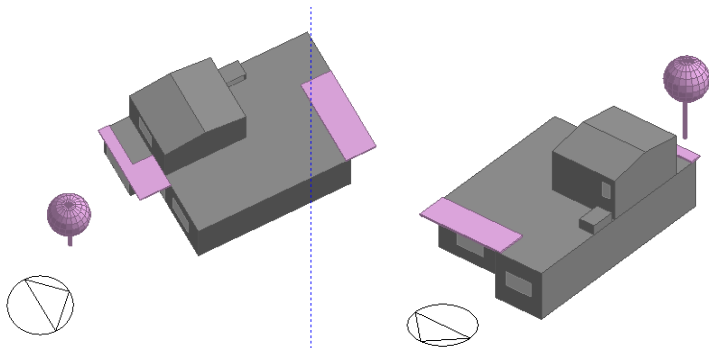
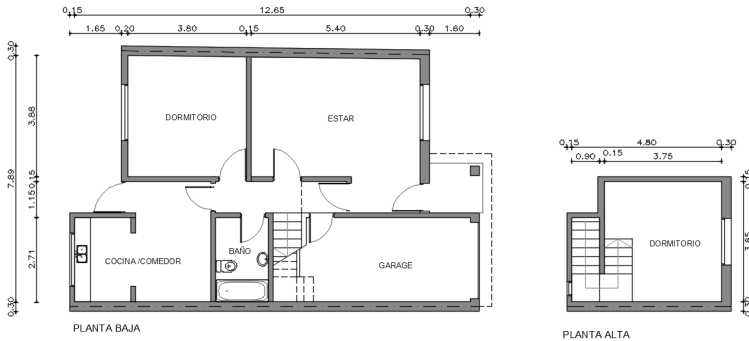
MODELO 21		CASA	
Deciles	5-7 / 8-10	Área habitable	109.7 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	271.9 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular Malvín		



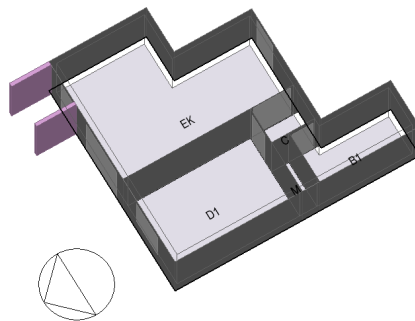
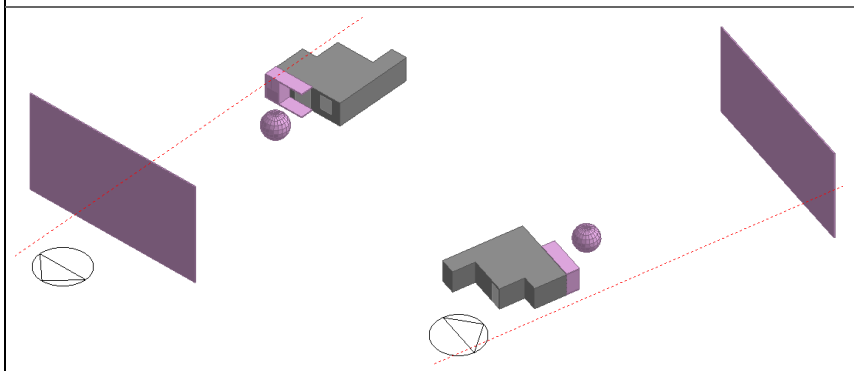
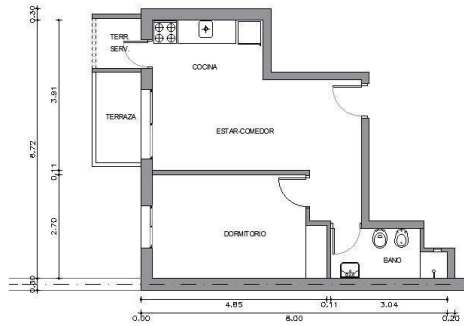


MODELO 22		CASA	
Deciles	8-10	Área habitable	117.2 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	310.5 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular Carrasco		
<p>Floor plan showing rooms: COCINA, COMEDOR, ESTAR, ESTAR, DORMITORIO, DORMITORIO, DORMITORIO, and BANO. Dimensions are provided for various sections.</p>			
<p>Two 3D perspective views of the house showing its L-shaped structure and roof profile. A purple sphere is used as a scale or reference point.</p>			
<p>3D perspective view of the house showing the internal layout of rooms, labeled B1 through B9.</p>			

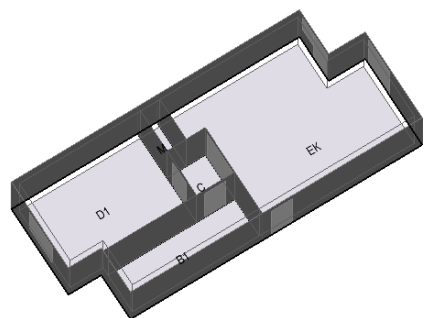
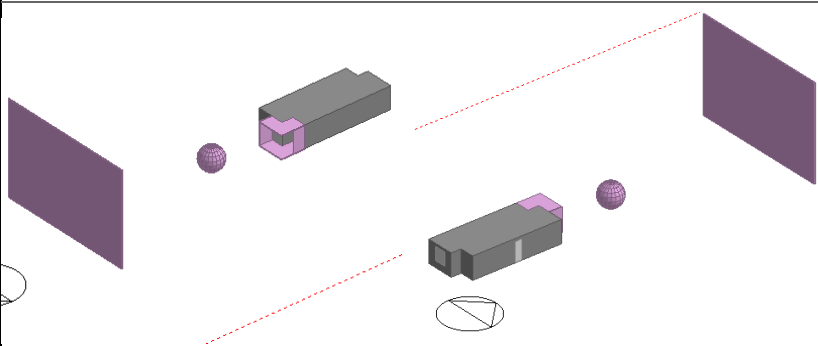
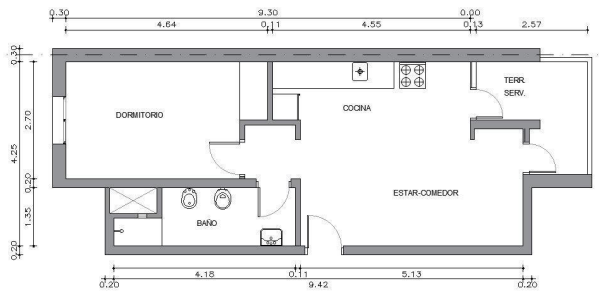
MODELO 23		CASA	
Deciles	8-10	Área habitable	100.4 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	304.9 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular pocitos		



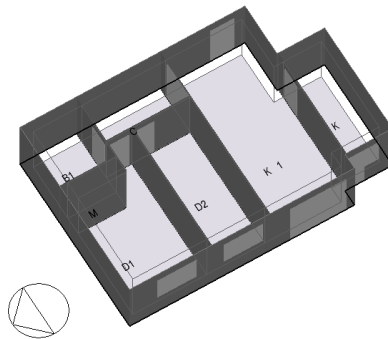
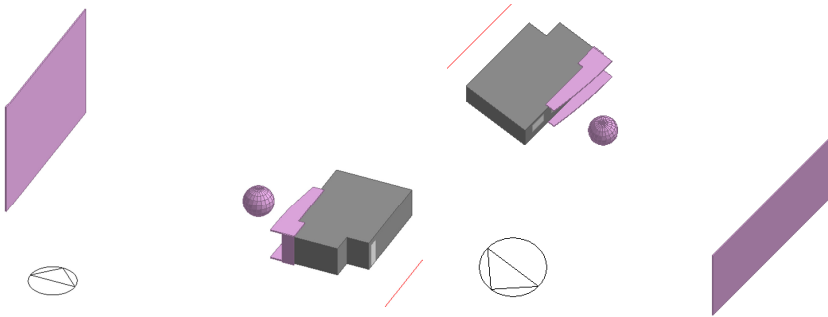
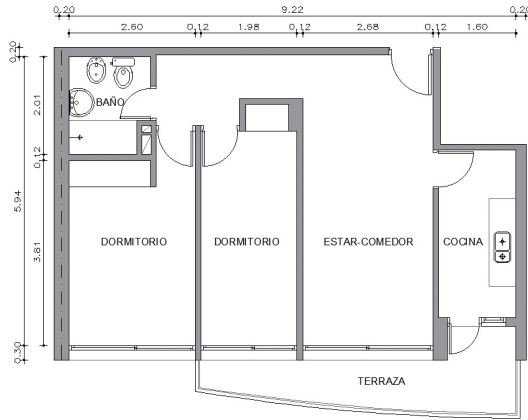
MODELO 24		APARTAMENTO	
Deciles	1-4 / 5-7 / 8-10	Área habitable	35.6 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	85.5 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda para jubilados	Banco de Previsión social	

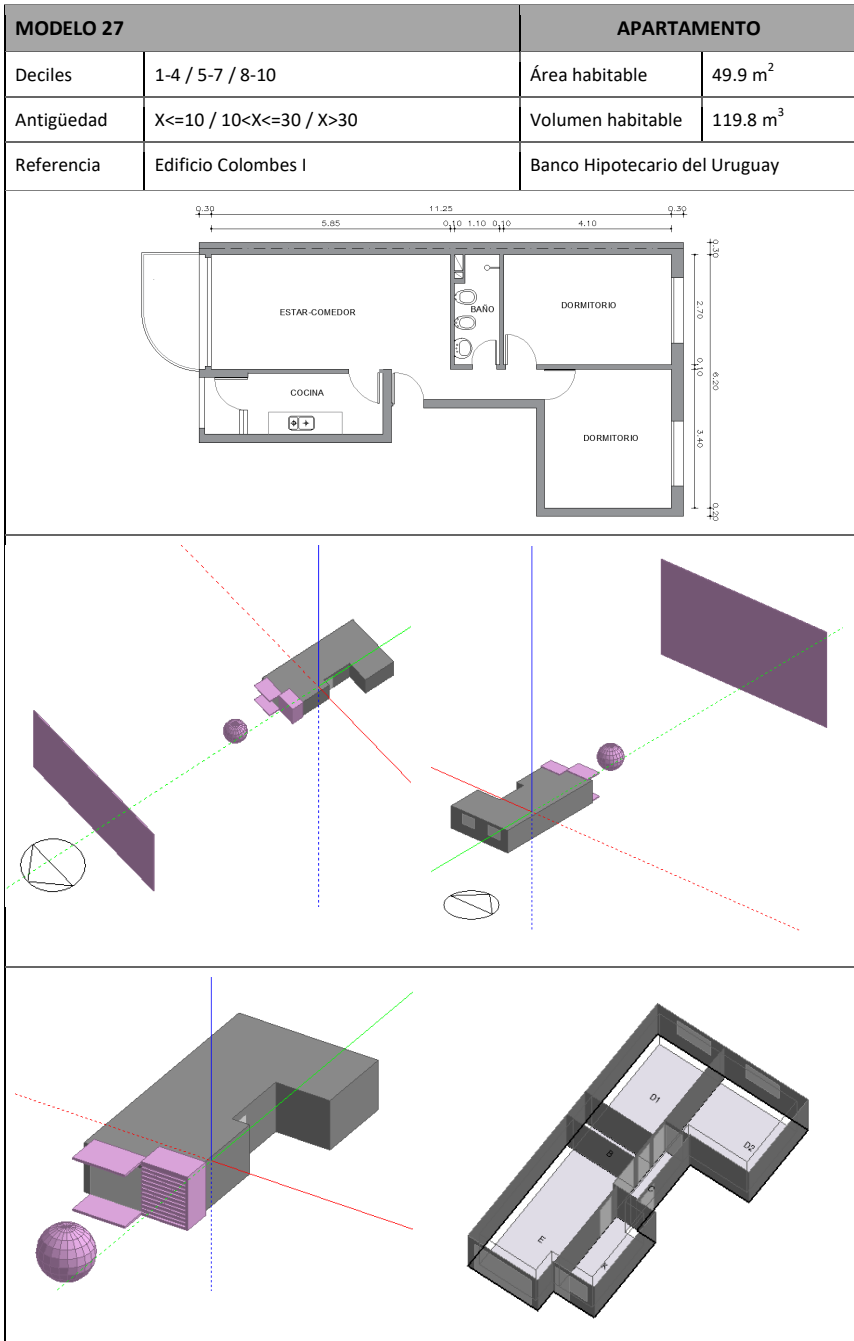


MODELO 25		APARTAMENTO	
Deciles	1-4 / 5-7 / 8-10	Área habitable	41.1 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	98.7 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda para jubilados	Banco de Previsión Social	

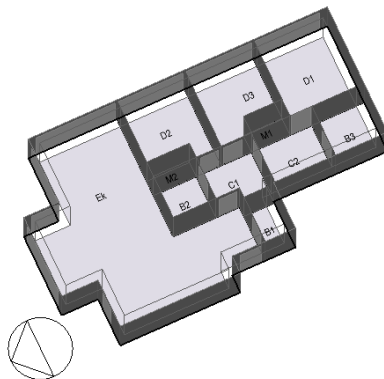
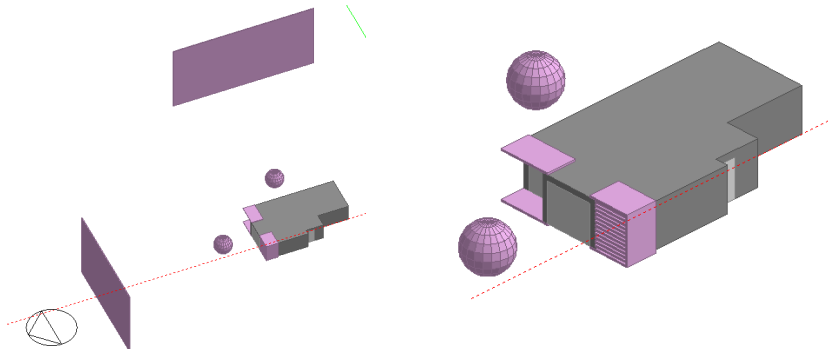
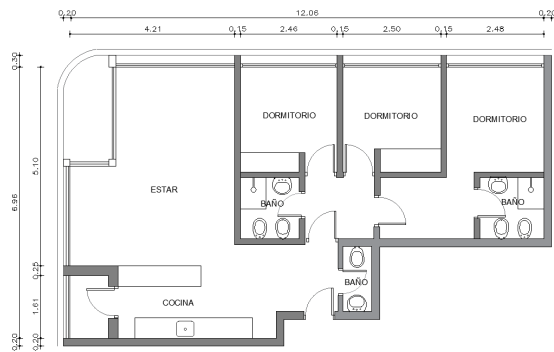


MODELO 26		APARTAMENTO	
Deciles	1-4 / 5-7 / 8-10	Área habitable	50.5 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	121.1 m <sup>3</sup>
Referencia	CH 265	Banco Hipotecario Uruguay	

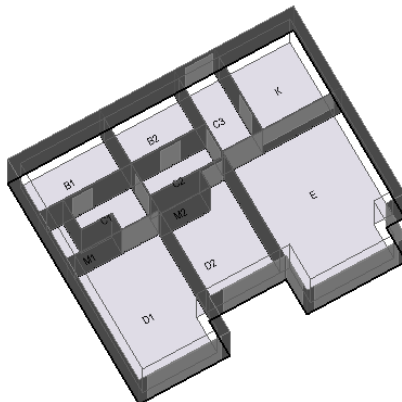
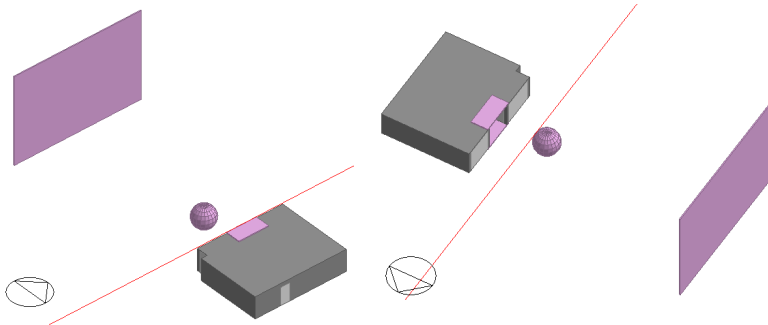
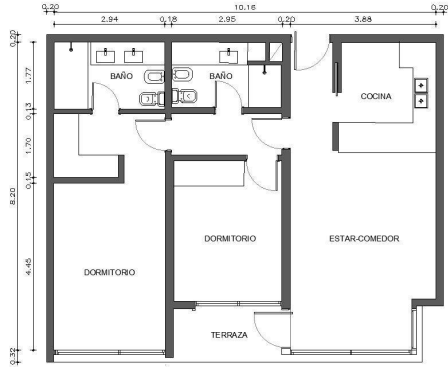




MODELO 28		APARTAMENTO	
Deciles	8-10	Área habitable	49.9 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	119.8 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular		

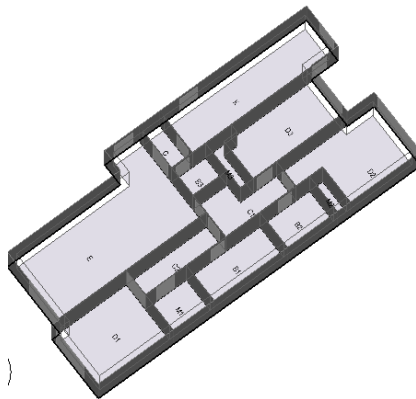
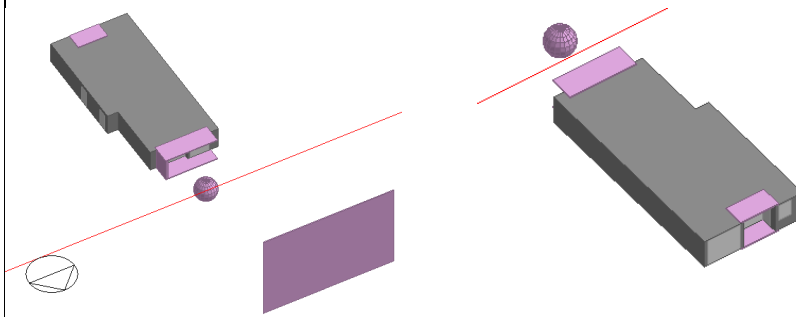
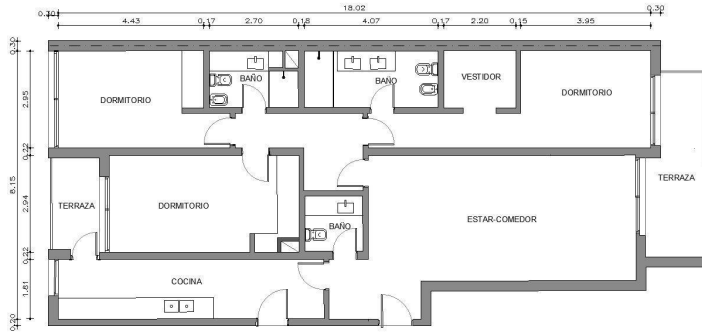


MODELO 29		APARTAMENTO	
Deciles	5-7 / 8-10	Área habitable	66.5 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X>30	Volumen habitable	159.7 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular Punta Carretas		

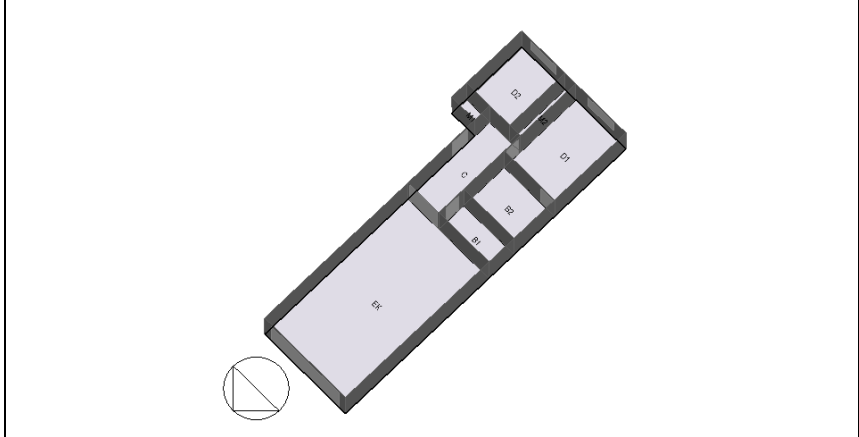
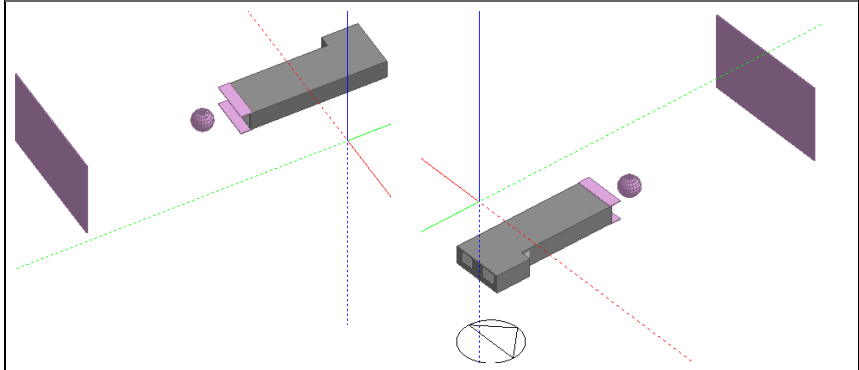
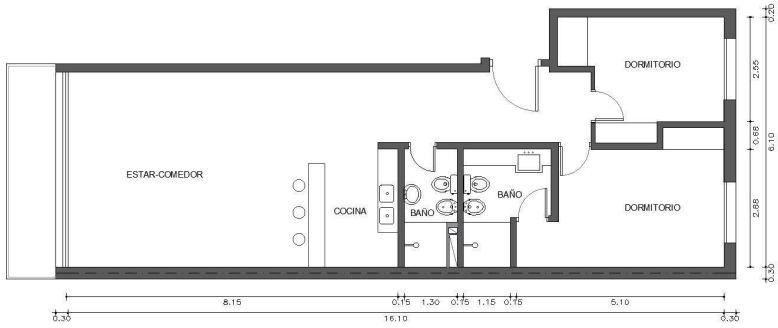




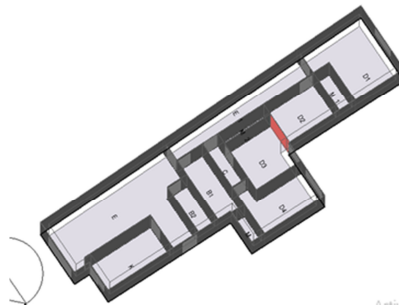
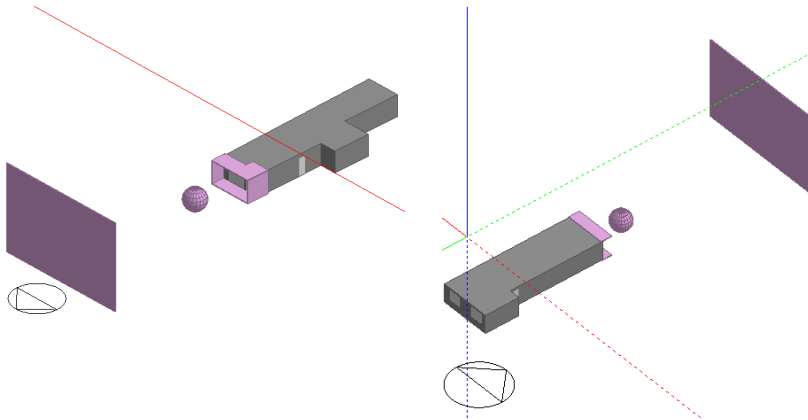
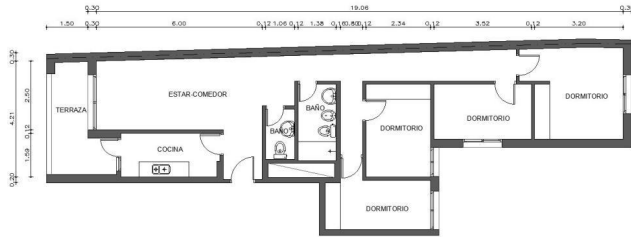
MODELO 30		APARTAMENTO	
Deciles	8-10	Área habitable	132.1 m <sup>2</sup>
Antigüedad	10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	317.0 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular Punta Carretas		



MODELO 31		APARTAMENTO	
Deciles	8-10	Área habitable	83.0 m <sup>2</sup>
Antigüedad	X>30	Volumen habitable	199.3 m <sup>3</sup>
Referencia	Vivienda particular Pocitos		



MODELO 32		APARTAMENTO	
Deciles	1-4 / 5-7	Área habitable	80.9 m <sup>2</sup>
Antigüedad	<=10 / 10<X<=30 / X>30	Volumen habitable	194.1 m <sup>3</sup>
Referencia	CH 265	Banco Hipotecario del Uruguay	



A=45.00 x 3.82.00

