



Mejoramiento ambiental de viviendas urbanas unifamiliares en centro-sur de Chile

Environmental Improvement of Single Urban Housing in Centre-South of Chile

Rodrigo García Alvarado, Maureen Trebilcock Kelly y Jaime Soto Muñoz

RESUMEN: Chile, al igual que muchos países en desarrollo, presenta un sostenido crecimiento residencial y energético, pero con relevante impacto ambiental. El país ha comenzado aplicar programas y regulaciones en estos aspectos, sin embargo, carece de antecedentes detallados del comportamiento residencial. Este trabajo presenta una novedosa estrategia de análisis de viviendas urbanas unifamiliares de la zona centro-sur, para fomentar un efectivo mejoramiento ambiental. El estudio está basado en estadísticas constructivas y en la revisión de cincuenta casos, además de analizar sistemas de simulación energética, monitoreos y modelaciones de una docena de viviendas. Se revisaron también algunas experiencias de diseño y rehabilitación, posteriormente se identifican patrones de consumo energético y características arquitectónicas incidentes, definiendo modificaciones específicas para la simulación de esta tipología en la región, como clima, geometría, ocupación, materialidad y sistemas, y revelando dispersiones en las condiciones de confort y calidad constructiva. Se advierte finalmente una encrucijada entre las expectativas poblacionales y la ejecución habitacional que se debe ajustar durante el diseño residencial, mediante análisis y acciones adecuadas al desarrollo local.

PALABRAS CLAVE: vivienda, simulación energética, desempeño ambiental, rehabilitación, Chile.

ABSTRACT: Chile, like many developing countries, presents a continuous residential growth and of energy consumption, but with a significant environmental impact. The nation has implemented programs and regulations, but there is a lack of detailed information on the housing performance. This paper presents a novel strategy for the analysis of urban single housing in the centre-south area of the country, to foster effective environmental improvements. The analysis is based on building statistics and the review of fifty homes, as well as energy simulation, with modeling and long-time monitoring of a dozen of these cases. Some experiences of improved housing design and refurbishment were also examined. This research work identifies energy performance patterns and related architectural characteristics. It has managed specific conditions to simulate this regional typology by climate, geometry, occupancy, materiality and equipment, demonstrating differences in comfort levels and building quality. At the end the study reveals a conflict between user's expectations and construction quality, which must be faced in the design process with actions on line with local development.

KEYWORDS: housing, energy simulation, environmental performance, refurbishment, Chile.

Introducción

Las viviendas albergan gran parte de la actividad humana, y generan cerca de un cuarto del creciente consumo energético global [1]. En Latinoamérica, se presenta además la mayor tasa de urbanización del planeta y un sostenido desarrollo económico [2] lo que produce un incesante crecimiento de amplias áreas residenciales, con débiles condiciones ambientales y alta demanda de combustibles, mayormente externos y no renovables [3].

Chile posee una condición ejemplar en la región, por su continua producción habitacional y la reciente implementación de planes y normativas para el mejoramiento energético residencial [4]. Sin embargo, carece de antecedentes detallados del comportamiento energético de las viviendas para contribuir al diseño, construcción y aplicación efectiva de consideraciones ambientales.

Estudios del desempeño ambiental de viviendas sociales en países colindantes como Argentina, han otorgado aclaraciones relevantes sobre análisis y medidas de mejoramientos [5, 6]. Este trabajo expone una revisión inédita de condiciones habitacionales en la zona centro-sur de Chile, basado en estadísticas generales y en el estudio exhaustivo de cincuenta viviendas unifamiliares, con un registro de condiciones constructivas, ocupación y monitoreo ambiental, además del análisis de sistemas de simulación energética y modelaciones comparativas de una docena de casos. Se revisan también experiencias de diseño de viviendas en la zona con alto estándar ambiental y acciones de rehabilitación de residencias existentes, con el fin de promover acciones adecuadas de análisis y mejoramiento ambiental de las viviendas.

Materiales y métodos

Condiciones residenciales en el centro-sur de Chile

La zona centro-sur de Chile (regiones de Maule, Bío-Bío y Araucanía), abarca una superficie aproximada de 100 000 km². Se extiende de norte a sur entre los 34° 41' hasta los 39°37' de latitud sur, y entre los 71°15' y 71°30' de longitud oeste, entre la costa del Pacífico al oeste, hasta la Cordillera de los Andes al este. Posee un clima templado húmedo regular en la zona, con temperaturas máximas en verano de 25° y mínimas en invierno de 5° y una humedad relativa sobre el 70 %, con precipitaciones cercanas a los 1 850 mm anuales y radiación media de 1 633,4 Wh/m² anuales. Esta área del país, alberga cerca de cuatro millones de personas, mayormente en ciudades del valle central, y en el área metropolitana de Concepción en la costa (figura 1). Las viviendas se encuentran principalmente en periferias urbanas de baja densidad (inferior a los 100 hab/ha), ejecutadas en uno o dos pisos de albañilería reforzada (muros de ladrillo de 15 cm de espesor, con estucos en ambas caras) y/o estructura de madera (muros de entramados de 2"X4" con revestimientos de tablas o planchas de 3/4"), con techumbre inclinadas y cubiertas de planchas de fibrocemento o metal [7].

Las preocupaciones ambientales en el país motivaron el año 1979 implementar una zonificación climática-habitacional con recomendaciones de diseño y registro de propiedades de los elementos constructivos. A partir del año 2000 se introdujo una normativa térmica obligatoria para viviendas, que reguló en una primera etapa a las techumbres y el 2007 los muros y pisos ventilados [4], fijando la transmitancia térmica máxima de los componentes para las distintas zonas térmicas del país se fijó en 1,7 W/m²K para muros (previamente alcanzaba sobre 2,5 W/m²K); 0,38 W/m²K para techumbres



Figura 1. Localización de la zona de estudio (arriba izquierda), mapa con áreas urbanas (arriba derecha) y vista de las zonas residenciales (abajo), Elaboración propia.

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *CO2 Emissions from Fuel Combustions Highlights*. Paris: International Energy Agency, 2012.
- ONU-HABITAT. *El estado de las ciudades de América Latina y El Caribe*. Río de Janeiro: ONU-HABITAT. Oficina Regional para América Latina y el Caribe, 2012.
- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. *Antecedentes sobre la matriz energética en Chile y sus desafíos futuros*. Santiago de Chile: Comisión Nacional de Energía, 2009.
- BARDI, C. y ROZAS, Y. *Eficiencia energética en vivienda*. Santiago de Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2010.
- GARGANTA, M. y SAN JUAN, G. *Análisis del comportamiento energético y ambiental de la producción de viviendas sociales en la provincia de Buenos Aires (2003-2011)*. Buenos Aires: ASADES, 2012. (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 16).
- DI BERNARDO, A.; FILIPPÍN, C. y PIPA D. *Monitoreo y simulación térmica energética de verano de una vivienda en condiciones reales de uso en clima templado cálido*. Buenos Aires: ASADES, 2011. (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 15).
- CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN. *Balace de la vivienda en Chile*. Santiago de Chile: Cámara Chilena de la Construcción, 2011.

(previamente sobre $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ o más); y $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ para pisos ventilados (que son escasos), además de porcentajes limitados de acristalamiento.

En los últimos años se han implementado también beneficios económicos para la instalación de captadores solares domésticos para agua caliente sanitaria, equipos eléctricos más eficientes y la renovación de viviendas existentes, aunque sin regulaciones técnicas [8]. Por otra parte, en la actualidad se está aplicando una calificación voluntaria de eficiencia energética a nuevas unidades residenciales, que se comparan a diseños similares tradicionales. Estas acciones, aunque inferiores a otras similares en Europa, son precursoras en Latinoamérica y han promovido el desarrollo de cerca de 200 000 viviendas construidas en la zona. Sin embargo, sobre el 80 % del parque habitacional actual no ha aplicado estas normativas o mejoramientos y seguirá prestando alojamiento por varias décadas más.

Registro de viviendas

Para revisar más detalladamente las características habitacionales de la zona se efectuó un registro de cincuenta viviendas. Se invitó a estudiantes universitarios de Arquitectura y Construcción para revisar sus propias residencias familiares (o de parientes cercanos), con el fin de disponer de observadores calificados y participantes. Este conjunto se comparó con las estadísticas generales de edificación residencial, para revisar su representatividad poblacional y seleccionar una docena de casos para una revisión más prolongada, incluyendo simulaciones energéticas y estudios de mejoramiento ambiental.

De las viviendas registradas, un 90 % están localizadas en zonas urbanas (mayormente en el área metropolitana de Concepción) y un 85 % corresponden a construcciones unifamiliares, lo que es similar a las estadísticas nacionales y zonales [8, 9], por lo que la selección posterior se concentró en estas edificaciones. De los casos revisados, prácticamente la mitad son aisladas y las otras semiaisladas, y de magnitud similar entre ellas, en uno o dos pisos, con distintas conformaciones, lo que expresa una individualización y variedad volumétrica de las viviendas, que prevalece en el país, al igual que en mayor parte del continente latinoamericano. La materialidad de construcción se combina entre albañilería de ladrillo cerámico y estructura de madera revestida, de manera similar en la zona.

Las superficies construidas de las viviendas estudiadas presentan también una variedad de 50 m^2 a 250 m^2 , cerca del doble de lo registrado oficialmente, por frecuentes ampliaciones posteriores de recintos anexos o en niveles superiores. Normalmente se realiza al comienzo una construcción formal y después se producen incrementos informales de superficie con similares características. La antigüedad de las viviendas presenta también una diversidad relevante de 3 hasta 60 años de construcción, con una media de 25 años. Si bien la antigüedad y vida útil de la vivienda a veces no son equivalentes, esta magnitud es consistente con la duración y renovación regular de la construcción residencial en el país [9].

Ocupación y equipamiento

Las viviendas estudiadas presentaron una media de 4,6 ocupantes permanentes por unidad, lo que es algo superior a los registros nacionales y regionales de 3,6 habitantes por vivienda, con una media de edad de 29,3 años, similar a las estadísticas, pero con una distribución predominante de jóvenes de 20-25 años [10], lo que expresa una prevalencia de familias maduras, por el origen de la muestra en estudiantes universitarios. Debido a esto, la selección de casos simulados se incluyó a familias más jóvenes

8. FISSORE, A. *La Realidad energética en el sector residencial de la región del Bío-Bío*. Santiago de Chile: Alianza de Energía y Clima de las Américas, 2012.
9. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. *XVII Censo nacional de población y de vivienda*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadísticas, 2002.
10. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. *Una mirada a la estructura del tipo de hogar*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadísticas, 2005.

(recurriendo a parientes de los estudiantes), en que la media de ocupantes bajó a 3,8 con una distribución demográfica más equivalente a la situación general, manteniendo la magnitud y diversidad volumétrica y material.

Se consultaron también los ingresos familiares anuales, que presentaron una variación de 10 000 a 60 000 dólares estadounidenses por unidad, con una media cercana a los 25 000 USD/año, que es equivalente a la distribución del sector medio de la población nacional [11], con un porcentaje de la renta destinado a servicios de 5 % al 10 %, de lo cual, la mitad se destina a calefacción en invierno, alcanzando montos anuales desde \$500 a \$5 000 dólares por vivienda.

Todas las viviendas presentaron instalaciones eléctricas y sanitarias completas, con un vasto equipamiento doméstico, similar a los registros generales existentes [12], lo que expresa la situación de un país emergente, incluyendo nuevos aparatos motivados por las campañas públicas realizadas, que impulsan la eficiencia energética en el hogar (como ampolletas, refrigeradores, lavadoras, etc.), además de diversos sistemas de calefacción (ninguno de refrigeración) y variadas fuentes combustibles de suministro de energía primaria y final. Entre esos sistemas, predomina la leña por su bajo costo, además de parafina, gas y equipos eléctricos, en su mayoría en dispositivos móviles de uso ocasional y combinado. Según la conversión calorífica correspondiente los consumos oscilan entre 5 000 kWh a 25 000 kWh anuales, mayormente definidos por el nivel de renta familiar.

Monitoreos ambientales

En las cincuenta viviendas registradas se instalaron sensores digitales de temperatura del bulbo seco y humedad relativa, durante una semana en el principal espacio público (figura 2). Además se están efectuando campañas completas de monitoreo ambiental en una docena de casos en períodos de verano e invierno, incluyendo la colocación de sensores en diferentes recintos, tanto aéreos como superficiales y exteriores. También se monitorean los niveles de iluminación y de CO₂, y se realizan pruebas de hermeticidad al aire (*blower-door test*), termográficas, y se monitorean las condiciones exteriores a través de estaciones meteorológicas locales. Los monitoreos generales se comparan además con registros climatológicos. Se han presentado algunas dificultades de gestión y visualización de datos, pero los resultados han sido consistentes con estimaciones de la zona y otros estudios [13, 8], revelando temperaturas medias interiores en torno a los 18 °C, con una variación de 2 °C y una oscilación diaria media de 3 °C por caso, relacionadas con la temperatura exterior, y humedad relativa interior del 75 %. Estos valores expresan una situación inferior a las bandas de confort convencionales y al cálculo adaptativo (que otorga una banda de 18 a 24°).

Las variables medidas en los monitoreos sobre transmitancias térmicas constructivas y radiación solar de las viviendas han presentado magnitudes similares a los valores estimados en los estudios y estándares de referencia. Sin embargo, los rangos de permeabilidad al aire han expresado diferencias relevantes con las regulaciones internacionales, así como el valor considerado en simulaciones, alcanzado desde 6 a 50 l/h renovaciones de aire a 50 Pa, con variaciones relevantes por calidad o componentes de construcción (también alto en algunas viviendas nuevas). Las termografías expresan también pérdidas relevantes y condiciones diferenciales entre sectores de cada construcción residencial.



Figura 2. Monitoreo de una Vivienda, vista general exterior (arriba) e instalación de sensores (abajo). Elaboración propia.

11. AIM, *Grupos socioeconómicos*. Santiago de Chile: Asociación Chilena de Empresas de Investigación de Mercado, 2008.
12. CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO. *Estudio de usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial*. Santiago de Chile: Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2010.
13. SARMIENTO, P y HORMAZABAL, N. "Habitabilidad térmica en las viviendas básicas de la Zona Central de Chile". *Revista INVI*. 2003, Vol.18, No. 46, pp. 23-32.

Consulta de confort

Se ha consultado también la apreciación cualitativa de confort y comportamiento de los ocupantes, a través en encuestas normalizadas (según ISO 10551/95), como también en entrevistas y observación participante. Las evaluaciones revelaron satisfacción ambiental sobre el 95 %, lo que valida las mediciones físicas, es decir, que las temperaturas sensadas corresponderían al confort requerido, aunque las viviendas con temperaturas más bajas y gastos más reducidos, presentaban la mayor disconformidad, y las entrevistas revelaban consideraciones variables entre algunos residentes y sectores de las viviendas. Las diferencias se presentaron especialmente entre el primero y el segundo piso, o entre el costado norte y el sur, en la localización puntual de los equipos de calefacción y en la disparidad de horarios entre los ocupantes, lo cual expresa que la situación de confort se diferencia según distintas zonas de la vivienda y calendario de uso de los residentes, y por ende el método normalizado de evaluación, que revisa la apreciación global con consultas específicas, sería insuficiente para caracterizar estas condiciones [13-14].

En las conversaciones y los registros visuales se advierte también incidencia en relación con el origen residencial de los ocupantes (cuando provienen de sectores rurales o periféricos) y diversidades respecto al género y edad, aunque difícilmente generalizables, por cuanto están influenciadas por las magnitudes de ingresos familiares, y por ende de gasto, climatización y calidad de construcción. De este modo podría decirse que el nivel de ingresos de las familias, que presenta relevantes disparidades, repercute en las expectativas de confort, lo cual expresa un avance en los requerimientos de habitabilidad, especialmente entre las familias jóvenes y más maduras. Esta evolución socioeconómica representa la condición de país emergente, con desigualdades internas y movilidad social, que se trasluce generacionalmente [11] con una creciente disparidad funcional entre los ocupantes. Si bien se mantienen los grupos familiares, se observa, no obstante, una creciente diversidad de actividades entre sus individuos según edad y género (por ejemplo estudio o trabajo en casa), lo que se expresa en la baja o solitaria utilización de los espacios sociales de las viviendas, y en la alta concentración de actividades en las habitaciones particulares, así como en la diversidad de horarios, de modo que las situaciones de confort se tienden a fragmentar individualmente [12]. Estas tensiones personales dificultan las mediciones convencionales de aceptabilidad, como también acciones constructivas globales, sugiriendo estrategias de análisis y resolución diferenciadas espacial y temporalmente.

Simulaciones

Actualmente se dispone de una variedad de sistemas computacionales que permiten efectuar análisis del comportamiento energético de las edificaciones según métodos normalizados (ISO 13790:2008-09 y ASHRAE 90.1), incluyendo programas de diversos costos y capacidades, y recientemente también sistemas web [15].

Se efectuó una revisión exhaustiva de una docena de sistemas, incluyendo la instalación y pruebas básicas; el análisis de una misma vivienda con cada sistema y entrevistas a usuarios expertos, así como la comparación con otros estudios [16, 17]. Lo anterior permitió identificar una distinción entre facilidad de uso o variedad de capacidades que se aplican según las características de los programas, pero también la experiencia de los usuarios o la magnitud de los proyectos (en cantidad de viviendas).

14. FRONTCZAK, M. "Human comfort and self-estimated performance in relation to indoor environmental parameters and building features". Tesis Doctoral. Technical University of Denmark, Copenhagen, 2011.
15. EERE. *Building Energy Software Tools Directory*, Washington: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2012.
16. CRAWLEY, D.; HAND, J.; KUMMERT, M. y GRIFFITH, B. "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs". *Building and Environment*. 2008, vol. 43, n° 4, pp. 661-673.
17. ATTIA, S.; BELTRÁN, L.; DE HERDE, A. y HENSEN, J. "Architect friendly: A comparison of ten different building performance simulation tools". En: *Actas de XI IBPSA Building Simulation Conference*. Glasgow: International Building Performance Simulation Association, 2009, vol. 49, pp. 2-15.

Los sistemas gratuitos y sencillos (tales como Heed, DesignAdvisor, BuildingStudio, permitieron procesos rápidos, pero dificultades de implementación, resultados escasos y amplios.

Los sistemas más avanzados (como son TAS, ESP-R), revelaron un mayor esfuerzo de trabajo, pero precisión y diversidad de análisis, por lo que su aplicación en diseños residenciales se puede diferenciar en estimaciones individuales y preliminares para profesionales ocasionales, o estudios más extensos para proyectos masivos por usuarios experimentados.

Se reconocieron también algunos programas preferentes que compatibilizan atributos y permiten intercambio de información (como Ecotect, Beopt y DesignBuilder), definiéndose finalmente como más apropiada la utilización combinada de software de modelación (Ecotect o DesignBuilder), con un motor de cálculo más completo (EnergyPlus), y planillas Excel para análisis, asumiendo algunas modificaciones para la tipología y región que se comentan posteriormente.

De esta forma, se efectuaron análisis energéticos de una docena de las viviendas registradas detalladamente por parte de los mismos estudiantes que son habitantes o parientes (figura 3). Los datos climáticos fueron normalizados con base IWEC, revisados según datos locales. La modelación geométrica fue normalizada con trazados iniciales de líneas que se exportaron en formato dxf, para generar volúmenes de recintos por zonas térmicas, regulando la superposición de planos e inserción de vanos, y agregando entorno básico. Se verificó luego la consistencia en la exportación de datos (lo que presentó reiteradas dificultades). Se definieron materiales de cada plano, revisando los valores de transmitancia en cada envolvente según los monitoreos. Se crearon calendarios de ocupación y de utilización de equipos, según los registros realizados. Este proceso se reguló con un tutorial y con sesiones grupales.

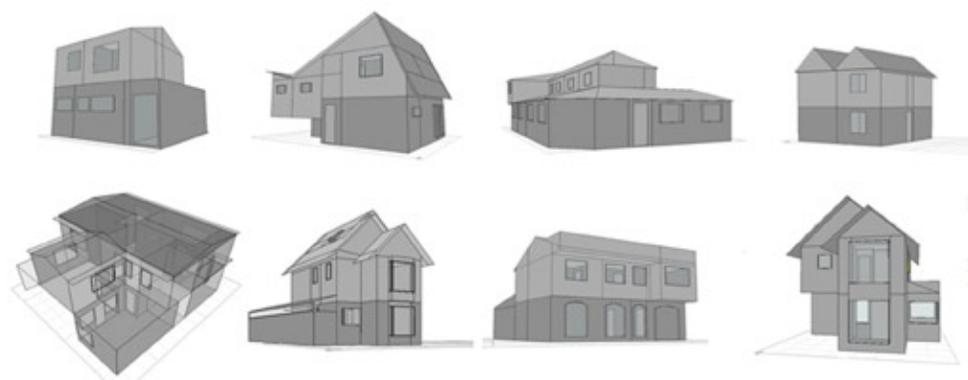


Figura 3. Algunos modelos de simulación de las viviendas estudiadas (elaboración propia).

Resultados y discusión

Modelos iniciales

Las modelaciones de simulación de las viviendas tardaron varias horas por caso en distintas sesiones, mientras se completaban registros, y se resolvían aprendizajes y dificultades con los programas. En una primera secuencia de simulaciones se verificaron datos climáticos, de materiales, ocupación y climatización, que generaban variaciones de 5 % al 10 % en los resultados. Luego se realizaron simulaciones comparativas entre todos los casos (denominada "base") con una banda de confort según cálculo

adaptativo de 18 °C a 24 °C y dos renovaciones de aire por hora, según valores medios registrados (figura 4).

La simulación base de todas las viviendas analizadas presentó demandas energéticas que se concentraron mayormente en la calefacción en el período de invierno, debidas a pérdidas en las envolventes verticales, con magnitudes globales variables entre 5 000 a 25 000 kWh anuales, y por superficie de 50 a 200 kWh/m², lo que es consistente con estimaciones en la zona y con los consumos registrados, aunque con una distribución diferente.

Se presentaron demandas energéticas mayores en las casas más grandes, y los valores más altos por superficie se obtuvieron en las viviendas más antiguas y precarias. Todas las ejecutadas en la última década presentan desempeños por debajo de los 100 kWh/m², lo que indica la incidencia de las recientes regulaciones térmicas y un mejoramiento constructivo global. Las demandas por zonas de las viviendas presentaron diferencias relevantes por su configuración geométrica y constructiva. La fluctuación anual y diaria de las demandas energéticas requeridas para climatización resultaron en general equivalentes a las variaciones climáticas, por tanto no se reconocen mayores diferencias de entorno o radiación solar.

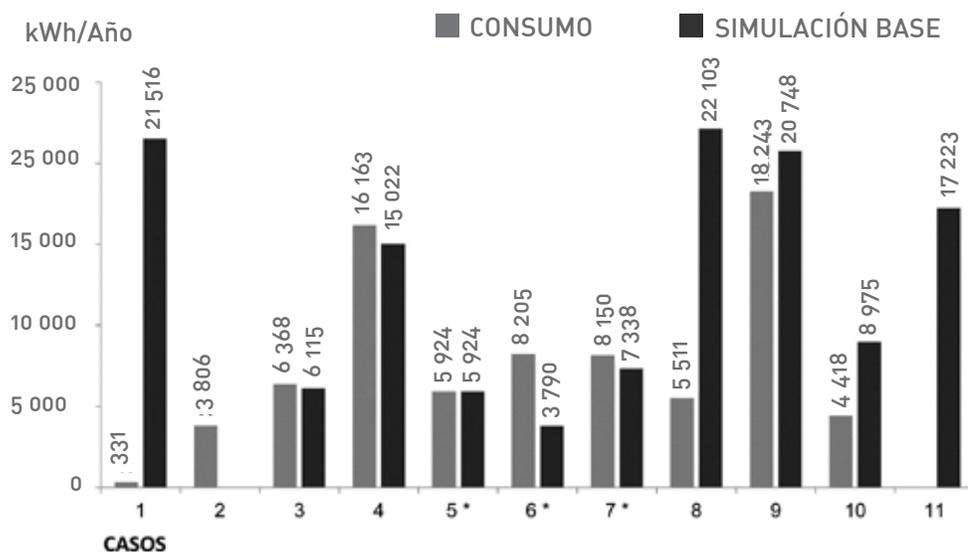


Figura 4. Resultados de demanda energética simulada en cada caso para situación de confort, y comparación con consumo real. Elaboración propia.

Ajustes de simulación

Posteriormente se efectuaron varias simulaciones diferenciadas por caso (denominadas de “ajuste”) para alcanzar una modelación equivalente a la situación real, revisando algunos detalles y modificando valores de confort y renovación de aire según los registros individuales, ya que se advertían diferencias sustanciales asociadas a estos factores. Se ajustaron también los resultados de la demanda en relación con los consumos obtenidos y se revisaron las temperaturas sensadas, las pruebas de infiltración, y los calendarios de ocupación y calefacción.

La comparación de la demanda base simulada respecto a los gastos reales fue cercana en algunos casos (en las construcciones más regulares) y con mucha disparidad en otros (en las viviendas de menores ingresos con consumos bajos).

En los casos más recientes, se elevó la banda de confort, alcanzando en dos o tres simulaciones adicionales un valor más cercano al consumo.

En las viviendas más precarias y antiguas, se redujo significativamente la banda de confort (con mínimas de hasta 14°), aumentando las renovaciones,

lo que revela que estas dos condiciones presentan la mayor oscilación para una evaluación fidedigna de las construcciones residenciales en la zona.

Mejoramientos ambientales

En diversos estudios previos se han sugerido consideraciones de diseño y construcción para mejorar las condiciones ambientales de viviendas en esta zona [18-22], entre ellas, una regulación volumétrica, la reducción de la transmitancia y ventilación de las envolventes, y la implementación de equipos de recuperación de calor o de absorción solar.

También algunas experiencias avanzadas de diseño residencial con alto estándar energético en la zona, como propuestas de casa pasiva o de mejoramientos prestacionales, han demostrado la factibilidad económica y técnica de estas medidas, aunque sin revisar su masificación o implementación en obra. Por esta razón en los casos estudiados se están realizando las siguientes comprobaciones específicas de mejoramientos energéticos.

a) Simulaciones comparativas de una misma vivienda de 72 m² con distintas configuraciones geométricas y orientación, que expresan la incidencia principalmente de una forma más compacta y adosada (del perímetro expuesto). Logrando reducir la mitad de la demanda (y de la envolvente y espacio calefaccionado para otros mejoramientos), lo que sugiere por tanto realizar urbanizaciones más densas (sobre 100 hab/ha) y crecimientos compartidos (adosamientos).

b) La adición de un revestimiento exterior aislante en una de las viviendas existentes (EIFS 50 mm), que otorgue masa térmica en muros interiores, con simulaciones, cálculos constructivos y económicos que sugieren logros sustanciales de confort y eficiencia energética (reducción del 35 % de la demanda), con financiamientos rentables en diez años por subsidio estatal. Se realizan también monitoreos previos y posteriores a su instalación, así como la consulta a profesionales y ocupantes para verificar su desempeño, viabilidad técnica y aceptación social, mostrando distintas perspectivas de las viviendas con alternativas de terminación para incorporar diversidad y promover la rehabilitación (figura 5).

c) Revisión de pequeños espacios solares añadidos en algunas viviendas de madera para captación solar pasiva en sectores térmicamente debilitados (latitud 38° 42' S), con colocación de divisiones selladas y aislantes en circulaciones para dividir zonas térmicas interiores (figura 5). Esto se debe verificar mediante simulaciones que permitan compensar y concentrar esfuerzos de calefacción, mejorando confort local (20°). Se están ejecutando dispositivos de este tipo para comprobar su instalación y aceptación en las viviendas.



18. TREBILCOCK, M; BURDILES, R. FUENTEALBA J. "Redesign of low cost housing under energy efficiency criteria". En: *Proceedings of Passive and Low Energy Architecture 20th International Conference* (Santiago de Chile, noviembre, 2003).
19. BUSTAMANTE, W.; BOBADILLA, A.; NAVARRETE, B.; SAELZER, G. and VIDAL, S. "Uso eficiente de la energía en edificios habitacionales. Mejoramiento térmico de muros de albañilería de ladrillos cerámicos". *Revista de la Construcción*. 2005, vol. 4, n° 2, pp. 5-12.
20. BUSTAMANTE, W. *Guía de Diseño para la eficiencia energética de la vivienda Social*. Santiago: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2009.
21. CARRASCO, J. and KOKOGIANNAKIS, G. "Feasibility of PassivHaus standards and alternative passive design on climatic zones of Chile". *Revista Habitat Sustentable*. 2012, Vol.1, N° 2, pp. 59-71.
22. HATT, T. "El Estándar PassivHaus en Chile". Tesis Doctoral. Universidad del Bío-Bío, Concepción, 2012.

Figura 5. Prototipo de vivienda de alta eficiencia (izquierda), alternativas de rehabilitación con aislación exterior (derecha) y adición de espacio solar y protección de ingreso (derecha). Elaboración propia.

d) Diseño de un sistema de vivienda prefabricada de estructura metálica con paneles de madera aislada (figura 6), con el apoyo de una industria local, que considera distintas variantes de crecimiento y funcionalidad interior en tres tipologías y tres disposiciones principales, con componentes perimetrales de alto aislamiento ($U= 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$). Se efectúan modelaciones y simulaciones energéticas para revisar comportamientos, costos y apariencias.

La generalización de estas acciones implica tener una capacidad de evaluación fidedigna e integral, del diseño, ejecución constructiva, rentabilidad económica y aceptación de los ocupantes en una variedad de casos. Simulaciones energéticas ajustadas a las condiciones residenciales reales pueden centrar este proceso, relacionadas con una modelación constructiva, análisis presupuestario y procesos de validación financiera y social.

Análisis de las condiciones residenciales

La revisión de viviendas urbanas en el centro-sur de Chile revela un predominio (85 %) de viviendas individuales variadas y extendidas, con un gasto energético alto y diferenciado (entre 5 000 kWh a 25 000 kWh anuales), y un reducido confort, aceptado por los residentes con relevantes distinciones internas.

Se revisaron además diversos sistemas de simulación energética, seleccionando algunos más apropiados (Ecotect/DesignBuilder con EnergyPlus) para estas construcciones habitacionales, que con esfuerzos moderados de modelación demuestran la capacidad de estimar su comportamiento ambiental de manera cercana a su situación real. Para esta zona y tipo de edificación se sugiere especialmente utilizar la información climática con base IWEC, revisar la configuración geométrica (consolidando planos), la composición material de la envolvente (calculando transmitancias) y la ocupación (reduciendo calendarios de uso), además de utilizar un confort adaptativo y una renovación de aire relativamente alta. Aunque se advierte que en estas viviendas subsisten variaciones relevantes en la adecuación diferenciada de las personas y las infiltraciones existentes. Las cuales están vinculadas con sus expectativas de habitabilidad y con la calidad de construcción. Estos aspectos están conducidos aparentemente por las diferencias de ingresos familiares y las trayectorias de vida de las personas, que se expresan en preferir una variedad de espacios básicamente habitables, con una división y calendarización personal de confort. Lo que revela una progresión social de las viviendas, pero con una creciente individualización, de modo que las estrategias y programas colectivos deben sectorizarse cabalmente.

Conclusiones

Las acciones específicas de mejoramiento ambiental identificadas para esta tipología y región se dirigen a una consolidación volumétrica y material de las construcciones, sectorización y sellados de las viviendas, e incorporación de sistemas solares pasivos o calefacción eficiente. Estas medidas se refieren a regular la forma arquitectónica y composición de la envolvente, subdividir recintos y asegurar calidad de ejecución, y agregar instalaciones renovables para lograr avances sustanciales en el confort y sostenibilidad residencial. Las acciones de mejoramiento pueden ser evaluados con una plataforma combinada de modelación constructiva, simulación energética, estudio financiero y consulta a los ocupantes, con el fin de determinar la factibilidad económica y social de los distintos casos, y promover acciones

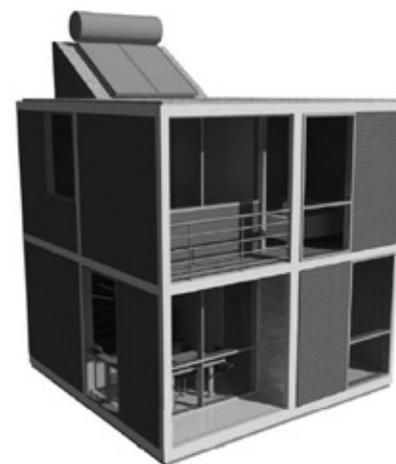


Figura 6. Prototipo de vivienda, adición de espacio solar y protección de ingreso. Elaboración propia.

efectivas de rehabilitación o nuevos proyectos, en iniciativas privadas o programas masivos, de modo de facilitar estrategias colectivas que otorguen soluciones particulares eficaces, pero con masificación. El trabajo posterior de esta investigación es la elaboración de un sistema integrado de análisis energético, constructivo y de rentabilidad, con visualización social, comprobando la aplicación de mejoramientos energéticos residenciales.

Agradecimientos

Esta investigación cuenta con financiamientos del proyecto Fondecyt 1120165 y MEL-Conicyt 8110003, apoyo de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, además de colaboración de los investigadores Ariel Bobadilla, Rodrigo Herrera, Cristián Muñoz, Waldo Bustamante, Reinaldo Sánchez, Gerardo Saelzer, Francisco Schiappacase Flavio Celis, Ernesto Echeverría y Olavo Escorcía, así como el apoyo de los tesisistas y ayudantes Gerth Wandersleben, Muriel Díaz, Paulina Wegertseder, Miguel Ángel Rodríguez, Alex González y Alexis Salinas.

Aclaraciones

Una versión resumida en inglés de este texto aparece en "Proceedings of the 2013 ARCC Spring Research Conference", realizado en Charlotte, NC, Estados Unidos entre el 27 al 30 de marzo del 2013.



Rodrigo García Alvarado.
Arquitecto, Máster en Informática para Arquitectura, Doctor en Arquitectura, Profesor Asociado del Dpto. de Diseño y Teoría en Arquitectura y Director del Doctorado en Arquitectura de la U. del Bío-Bío, Concepción, Chile.
rgarcia@ubiobio.cl



Maureen Trebilcock Kelly.
Arquitecta, Máster y Doctora en Arquitectura Sustentable. Profesora Asociada del Dpto. de Diseño y Teoría en Arquitectura y Directora del Magister en Hábitat Sustentable de la U. del Bío-Bío, Concepción, Chile.
mtrebilc@ubiobio.cl



Jaime Soto Muñoz.
Ingeniero Constructor, Máster en Administración de Empresas. Profesor Asistente del Dpto. de Ciencias de la Construcción y Académico del Magister en Hábitat Sustentable de la U. del Bío-Bío, Concepción, Chile.
jsotom@ubiobio.cl