



Diseño arquitectónico integrado de sistemas solares térmicos en techumbres de viviendas

Integrated architectural design of active solar thermal collector at dwelling's roofs

Esteban Zalamea León y Rodrigo García Alvarado

RESUMEN: El diseño arquitectónico y el cálculo de sistemas de energía alternativa suelen ser tareas separadas, lo que trae como consecuencia que las instalaciones se sobrepongan en los edificios y afecten su apariencia arquitectónica. Este artículo revisa una novedosa estrategia para proyectar de manera integrada tanto la arquitectura como el comportamiento energético, definiéndose la arquitectura conjuntamente con un sistema de aprovechamiento solar activo incorporado en la techumbre de una vivienda en Concepción, Chile. Se desarrolla el proyecto residencial en un software BIM con simulador energético incorporado, analizando paramétricamente el tamaño del sistema, la inclinación de techumbre y orientación de la vivienda, con su resultado arquitectónico y evaluación solar simultánea. Posteriormente se elabora la instalación térmica total en la configuración de la vivienda. Finalmente se evalúa el resultado espacial interior, sugiriendo estrategias pasivas compatibles y estimaciones económicas. La experiencia demuestra la definición integrada de un sistema solar térmico en el diseño arquitectónico de la vivienda.

PALABRAS CLAVE: energía solar, diseño integrado, simulación energética, vivienda sostenible, BIM.

ABSTRACT: Alternative architectural design and calculation of power systems are usually separate tasks, which results in that the facilities in buildings overlap and affect its architectural appearance. With the aim of review an integrated platform of architectural design and energy analysis, this work analysis implementation of thermal solar systems for single housing in Concepción, Chile. A residential model is assessed in BIM software with an energy calculator incorporated; based on parameters to size the systems, slope of roofs and orientation of construction. After that, the design of the installation is developed according to the architectural configuration and spatial visualization. Besides passive strategies and economic savings are suggested. The experience showed that the platform can determine proper characteristics of thermal system, and raise a facility integrated into the architectural design of housing.

KEYWORDS: solar energy, integrated design, energy simulation, sustainable housing, BIM.

Introducción

Se ha estimado que las edificaciones son responsables del 60 % de las emisiones de CO₂, y que su funcionamiento consume el 40 % de la energía global [1]. Más del 50 % de la electricidad mundial es generada a partir combustibles fósiles, y únicamente el 2 % proviene de fuentes de bajo impacto ambiental [2]. En Chile el 26 % del consumo energético está destinado a demandas habitacionales, monto que por el crecimiento económico se ha duplicado en los últimos 25 años [3]. La matriz energética nacional posee además una alta dependencia externa y base carbonizada [4]. Es relevante entonces explorar alternativas energéticas renovables como la captación solar, especialmente en las propias edificaciones, para disminuir redes de distribución y grandes instalaciones de explotación y/o generación que producen impacto ambiental [5; 6; 7]. Se han desarrollado una variedad de equipos para captación solar activa, tanto paneles térmicos o fotovoltaicos, que se suman a estrategias de aprovechamiento solar pasivo [8; 9]; también se ha analizado producción energética, especialmente fotovoltaica, acorde con la inclinación y orientación de colectores [10;11], y se ha medido resultados de producción energética de instalaciones arquitectónicamente integradas [12]; sin embargo existe una carencia de alternativas para desarrollo proyectual de sistemas de captación solar activa durante el diseño de los edificios, que permita definir equipos adecuados para diversas configuraciones constructivas y situaciones geográficas, compaginado con resultados arquitectónicos [7]. Los captadores se suelen planificar o instalar de manera posterior al proceso diseño y construcción, aplicando equipos sobrepuestos, con la consecuente reforma de las instalaciones originales previstas y deterioro de la apariencia arquitectónica de las casas [13; 14].

Desde 2009 en Chile rige la ley de “Franquicia tributaria para la instalación de Sistemas de Captación Térmica Solar en Viviendas” (ley 20.365), que busca contribuir a abastecer el 15,5 % de demanda energética residencial destinada a Agua Caliente Sanitaria (ACS) [15]. Son subsidiadas aquellas instalaciones que abastecen más de 30 % de requerimiento de ACS de viviendas de interés social. La misma ley busca impulsar la integración arquitectónica de los captadores, al tolerar en su normativa una menor producción, cuando la instalación se incorpora en el diseño proyectual¹. Sin embargo, la proliferación de esta tecnología por el mencionado subsidio ha provocado la adaptación de los captadores sin consideraciones arquitectónicas, sin participar en la concepción original del edificio y en consecuencia, sin dimensionamiento arquitectónico-energético adecuado.

La integración arquitectónica de sistemas solares activos en las envolventes presenta tres dificultades fundamentales: a) Una limitada diversidad de productos, consecuencia del escaso conocimiento de los desarrolladores de tecnología solar activa acerca de integración arquitectónica. b) Débil difusión entre arquitectos acerca de las posibilidades ofrecidas por las tecnologías y productos disponibles. c) Escasez de herramientas para cuantificar, ilustrar y comunicar el efecto de los dispositivos solares tempranamente en el proyecto [16]. Los dos últimos aspectos conciernen directamente a la arquitectura, son decisiones importantes de la disciplina concernientes a orientación, geometría, aperturas, materialidad y expresión, factores que se definen inicialmente.

El diseño arquitectónico dispone de plataformas de modelación constructiva Building Information Modeling (BIM), con programas como Revit®, Archicad® o Microstation, que permiten la elaboración de la geometría completa del

1. CELIS, Flavio, *et al.* “Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile”. *Arquitecturavista*. 2012, pp. 62-75.
2. CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN. *Estudios de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial*. Santiago de Chile: Cámara Chilena de la Construcción, 2010.
3. BUSTAMANTE, Waldo. *Guía de diseño para la eficiencia energética en la Vivienda Social*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile. Facultad de Arquitectura, 2009.
4. DONOSO, Nicolás. *Análisis técnico y económico en mejoras de eficiencia energética para viviendas de precio entre 1000 y 3000 UF*. [en línea], Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2009. [consulta: 25 abril 2013]. Disponible en: www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/cf-donoso_nr/pdfAmont/cf-donoso_nr.pdf
5. AGENCIA CHILENA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA. *Programa de Inversión pública para fomentar el reacondicionamiento térmico del parque construido de viviendas*. Santiago de Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2007.
6. HACHEM, Caroline. *Investigation of Design Parameters for Increased Solar Potential of Dwellings and Neighborhoods*. Montreal: Concordia University. Department of Building, Civil and Environmental Engineering, 2012.
7. WALL, Maria *et al.* “Achieving Solar Energy in Architecture-IEA SHC Task 41”. *Energy Procedia*. 2012, vol. 30, pp. 1250-1260.
8. GAJBERT, Helena. *Solar Thermal Energy Systems*. Lund: Lund University. Faculty of Engineering. Division of Energy and Building Design, 2008.
9. COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. *Registro solarimétrico*. Santiago de Chile: CNE. Proyecto CHI/00/G32, 2008.
10. GROSSI GALLEGOS, H y RIGHINI R. “Ángulo óptimo para planos colectores de energía solar integrados a edificios”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2012, vol. 16.

¹ Acorde con la Ley 20365 la integración arquitectónica de colectores solares se cumple cuando estos adicionalmente a la función de captación de irradiación, son envolvente en si mismos.

edificio, inclusive definiciones constructivas, materiales, de instalaciones, etc, con resultados planimétricos y tridimensionales automáticos. El modelo es organizado por componentes constructivas, con información técnica asociada para coordinar las diferentes especialidades y luego posibilitan gestionar la ejecución. Por otro lado para mejorar el desempeño energético, se han desarrollado simuladores ambientales, como Ecotect® o EnergyPlus®, destinados a calcular de manera dinámica requerimientos energéticos y confort, algunos de ellos incluyen calculadores de sistemas de captación solar térmica o fotovoltaica; sin embargo, deben aplicarse de manera separada durante el diseño arquitectónico [16; 13]. Se han desarrollado métodos para asociar simuladores energético-ambientales con herramientas de diseño arquitectónico, pero la necesidad es integrar las herramientas de forma directa en el trabajo cotidiano de los arquitectos [17]. Un avance relevante ha sido la incorporación de una función de cálculo energético denominada Ecodesigner®, en el software BIM Archicad®, que permite analizar directamente el modelo, a través de herramientas de revisión de condiciones de diseño y energéticas en una misma plataforma de trabajo, sin necesidad de exportaciones entre software (figura 1).

11. LESCANO, Jorge *et al.* "Diseño e implementación de estrategias para el uso eficiente de energía solar en aplicaciones fotovoltaicas en sitios aislados de la provincia de Santa Cruz-Avances". En: *XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES)*. San Miguel de Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2013.
12. EYRAS, Ismael. "Integración Arquitectónica de Sistemas de Energía solar en nueva fábrica de paneles ISOFON". *Avances en Energías renovables y medio ambiente* [en línea]. 2006. [consulta: 25 abril 2013]. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/contador.php?id=1259&arch=trabajos/2006/2006-t005-a005.pdf>

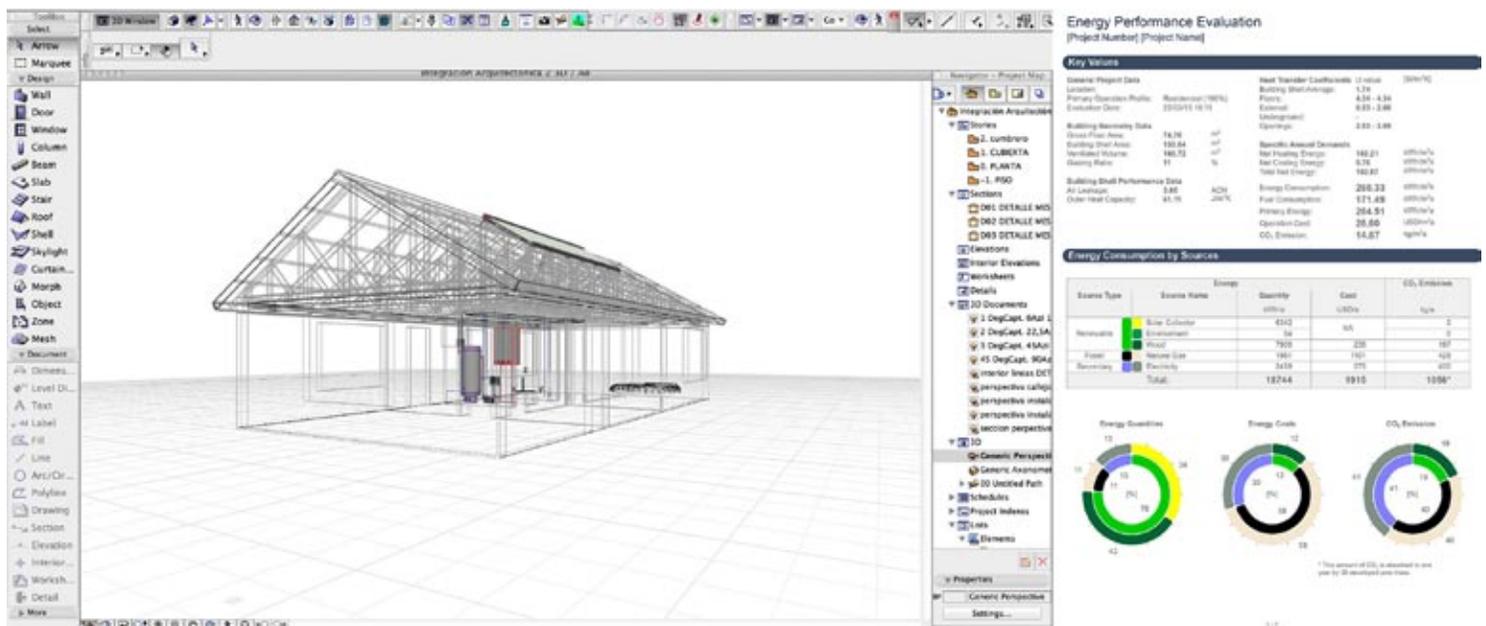


Figura 1: Modelación de la vivienda en Archicad® con reporte del moduloEcodesigner®.

Con la alternativa proyectual mencionada, se desarrolló una vivienda de la zona centro-sur de Chile, adoptada de un modelo oficial MINVU (Ministerio de Vivienda de Chile), para ser provista de calefacción y agua caliente sanitaria con tecnología solar Combi[18; 19]. Se analizaron distintas configuraciones y dimensionamientos de estos sistemas para advertir las mejores captaciones solares activas, con distintos parámetros de diseño y colectores incorporados en la cubierta. Las variables revisadas fueron: superficie de captadores, orientación de la construcción e inclinación de techumbre y colectores, todo ello frente a resultados arquitectónicos. Posteriormente se ha planteado la definición constructiva y detalle de los equipos de captación y redes necesarias en modelo 3D. Se comprobó que la herramienta permite identificar configuraciones adecuadas de recolección energética y diseñar una integración cabal en la vivienda. Se logró prever resultados adecuados de manera temprana en el proyecto, cuantificando además la ventaja de incluir la energía solar térmica.

13. KALOGIROU, Soteris. "Solar thermal collectors and applications". *Progress in Energy and Combustion Science*. [en línea]. 2004, vol. 30, issue 3, pp. 231-295. [consulta: 25 abril 2013]. Disponible en: <http://www.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/eBook/heat%20pump/HP%20for%20desalination/Solar%20thermal%20collectors%20and%20applications.pdf>
14. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, based in. "Solar Combsystems". En: *Solar Heating and Cooling Program 2003 Annual Report*. Paris: IEA., 2003.

Materiales y métodos

Integración de Diseño Arquitectónico y Análisis Energético

Entre algunos programas de arquitectura y simuladores energéticos, es posible transferir información (envío de datos geométricos de diseño para simulación energética); sin embargo, mucha información es afectada o perdida en esta interacción, además representa tiempo y manejo de datos complejos [16]. Archicad® es un software para arquitectura, de dominio privado, pero amplia distribución internacional, que ha incorporado gratuitamente una capacidad de análisis energético. Es soportado por plataformas y sistemas operativos Macintosh y PC, y ha destacado por su temprana adopción del concepto BIM [20]; desde 2009 en su versión 14, ofrece un plug-in para estimación de comportamiento energético denominado Ecodesigner®; posteriormente desde la versión Archicad 16® [2013][20], es una herramienta integrada directamente en el programa. El módulo Ecodesigner® (validado por ASHRAE 90.1-2004), utiliza motor de cálculo VIP-Energy de Strussoft, el cual permite estimar las demandas de un modelo en desarrollo, de acuerdo con la geometría, materialidad y localización. El programa maneja valores editables, como coeficiente de transmisión térmica "U" e índices de infiltración de recubrimientos, comportamiento de carpinterías y envolvente en general, así como bases climáticas, calendarios de ocupación, equipamiento, etc. El modelo puede ser localizado geográficamente y climáticamente, utiliza archivos climáticos TMY (Typical Meteorological Year), WYEC2 (Weather Year For Energy Calculations) o IWEC (International Weather for Energy Calculation). Por otra parte se pueden adoptar condiciones de entorno, composición de suelo, bloqueo solar y vientos. La fuente y gasto energético es necesario introducirlos, tanto su origen primario como secundario, datos que deben programarse acorde con la localidad. El programa o uso de la edificación también se indica para que el software estime el consumo de energía por actividad (figura 2).

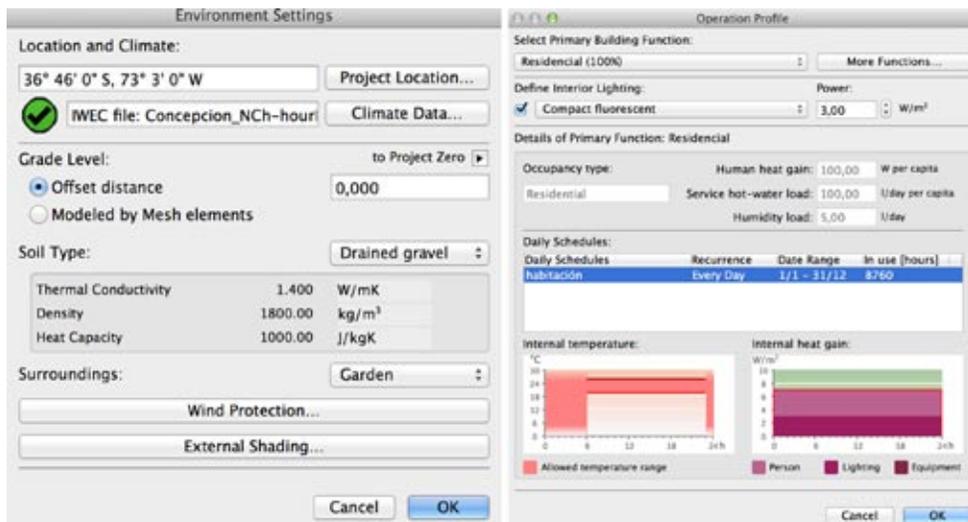


Figura 2: Determinaciones paramétricas climáticas y funcionales en Ecodesigner (Los Autores).

Con un modelo creado y datos térmico-energético ingresados, el software calcula: consumo energético anual, uso de energía y tipo, fuentes primarias y secundarias, CO2 emanado al medioambiente, ahorro monetario, etc. Reportes instantáneos vinculados al diseño son generados automáticamente;

15. ATHIENITIS, Andreas. "Design of a solar home with BIPV-Thermal System and ground source heat pump". En: *2nd Canadian Solar Buildings Conference*. Montreal: Concordia University. Department of Building, Civil and Environmental Engineering, 2007.
16. CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN. *Sistemas solares térmicos. Manual de diseño para el calentamiento de agua*. Santiago de Chile: Camara Chilena de la Construcción, 2007.
17. ERCAN, Ataer O. "Storage of thermal energy". En: *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Oxford: Eolss Publishers, 2006.
18. LUND, Peter. "Fast market penetration of energy technologies in retrospect with application to clean energy futures". *Applied Energy*. 2010, vol. 87, No. 11, pp. 3575-3583.
19. CYPE INGENIEROS S. A. Generador de precios, Chile. [consulta: 25 abril 2013]. Disponible en: http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=2_0_1_2_310_0_0_0_0_0|IICB007licb_007:c17_0
20. CHILE. MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. "Alternativas de vivienda definidas con subsidio. Política urbana". En: *MINVU* [en línea]. Santiago de Chile: MINVU, 2010. [consulta: 25 abril 2013]. Disponible en: http://www.minvu.cl/opensite_20100526104950.aspx

cuando algún parámetro geométrico, energético, climático etc. es alterado, los resultados se modifican en nuevos reportes. Los balances obtenidos son anuales y generales, destinados principalmente a comparar alternativas durante diseño. En proceso de proyecto se puede revisar secuencialmente las distintas resultantes de consumo energético acorde con la variaciones formales o constructivas.

Para una revisión inicial de la plataforma integrada, se modeló una vivienda representativa del Centro-Sur de Chile localizada en la ciudad de Concepción. Esta zona posee clima templado con 13 °C de media anual, oscilaciones estacionales y diarias. Aquí predominan viviendas unifamiliares, aisladas o adosadas, edificadas en albañilería de ladrillo o entramados de madera [21]. La probeta virtual que se utilizó es una casa de una planta rectangular, con superficie construida total de 72 m²; se modela con paramentos exteriores de albañilería y techumbre de estructura de madera. Se eligió un modelo simple para establecer modificaciones paramétricas evidentes, obteniendo resultados fácilmente descifrables. La proporción largo-ancho del modelo fue 2:1, correspondiente a una situación media, en relación con las sugerencias de eficiencia térmica por forma, para este clima [3].

El modelo posee altura piso-techo de 2,40 m, dimensión usual para la tipología de casa, además techumbre de dos aguas, estructurada en cerchas dispuestas longitudinalmente e integradas por correas desplegadas también en dirección longitudinal. Fueron dispuestas ventanas en las cuatro fachadas las que ocupan proporcionalmente el 30 % de superficie de muros con vanos, consecuencia con estadísticas locales de proporcionalidad lleno-vanos [1]; se consideró también una puerta de acceso. En módulo Ecodesigner® se indicó el programa funcional de vivienda, lo que determinó requerimientos energéticos residenciales automáticamente. Adicionalmente fue necesario especificar secciones y parámetros de materiales de pared, suelo y cielo-techumbre envolventes. Los valores seleccionados son especificados en Tabla 1 y Figura 3.

La materialidad del modelo adoptada es usual para la zona: piso en radier de concreto directamente sobre suelo, muros de albañilería enlucida a

Tabla 1: Determinaciones de materiales constructivos y aislamiento en Ecodesigner.

| Elemento constructivo | Material | Espesor (cm) | Valor U |
|--------------------------------------------------|-------------------------|--------------|---------|
| Piso radier sin aislamiento | Hormigón armado. | 10 | 4,34 |
| Muro exterior, albañilería estucada ambas caras. | Ladrillo. | 14 | 2,6 |
| Cielo falso más aislamiento. | Yeso +Poliestireno. | 1 + 9 | 0,53 |
| Techumbre. | Placa metálica ondulada | 0,4 | 7,1 |
| Ventana. | Vidrio doble. | 3,5 | 2,6 |
| Puerta. | Madera sólida. | 6 | 3,17 |

dos caras, cielo-falso de yeso con aislamiento; como resultado el software entregó valores de transmitancia en muros inferiores a los sugeridos por la normativa vigente, sin embargo, son el resultado de propiedades de materiales regularmente utilizados (U=2,6 frente a 1,7 especificado en la norma). Por otro lado se contempló excepcionalmente vidriado doble en ventanas, tecnología que está siendo incorporada progresivamente en la construcción local con mayor recurrencia que incrementar el aislamiento en muros; el resultado fue una envolvente vertical muy homogénea (vanos y muro con U=2,6). Para el entorno se consideró espacio abierto, sin obstrucción

21. GRAPHISOFT. "Virtual Building Concept". En: *Graphisoft*. [en línea] [consulta: 9 septiembre 2013]. Disponible en: <http://www.graphisoft.com/support/archicad/edu/0.html>

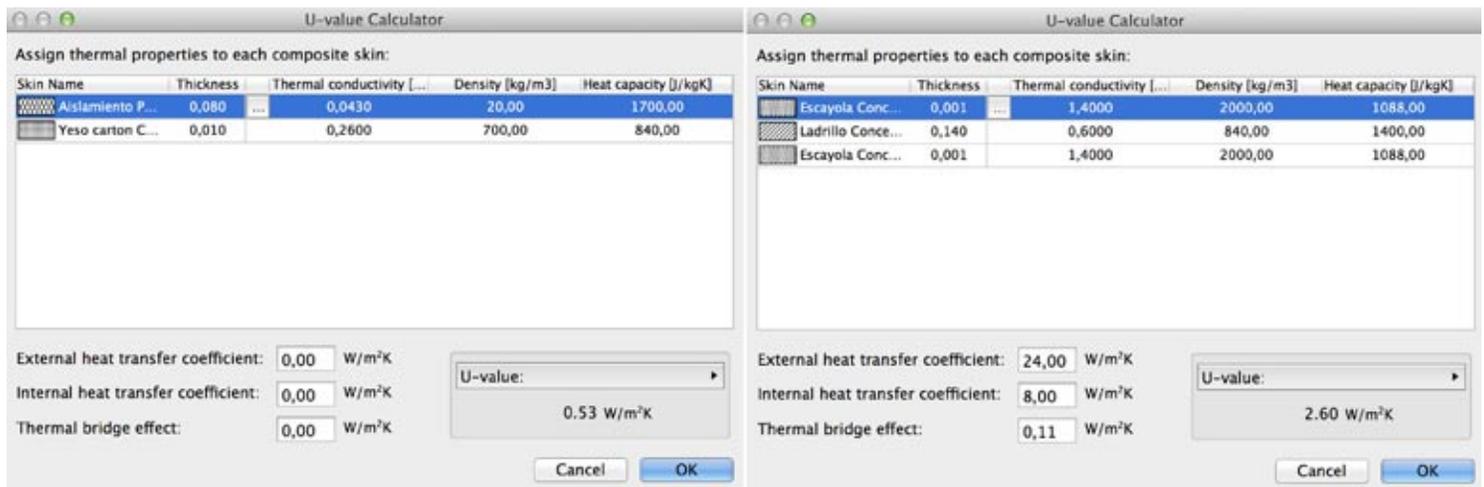


Figura 3: Determinaciones de materiales constructivos y aislamiento en Ecodesigner. (Los Autores).

solar y sin protección contra vientos. El suelo circundante se modeló de grava granular para representar un jardín en el contorno de la vivienda. El índice de infiltración, tanto en muros como carpinterías resultante fue 1,10; en consecuencia el software estimó que el índice de renovación de aire ACH es 3,78. Como fuentes de alimentación energética tradicional, se especificó calefacción a partir de leña, agua caliente proveniente de combustión de gas y la electricidad de red general, todos ellos considerando precios locales y la realidad de consumo zonal [2]. A partir del modelo programado, el software estipuló que las ganancias internas están en el orden de los 200 kWh por mes aproximadamente, lo cual se traduce en nuestro modelo en un índice de 92,59 kWh/m².

Como fuente comparativa de validación, se realizó la compilación de cuatro investigaciones que mostraron resultados de simulaciones precedentes de viviendas en la zona (tabla 2).

De la comparación realizada se detectó que la vivienda simulada en Ecodesigner® presentó una demanda para calefacción entre 6 873 y 9 803 kWh, es decir 95,45 kWh/m² a 136,15 kWh/m² por año, con variaciones acorde con el soleamiento y viento predominantes en Concepción versus orientación. Los resultados del BIM se aproximan a los resultados de

Tabla 2: Comparaciones de simulaciones de viviendas de investigaciones previas de demandas para calefacción frente a resultados de Ecodesigner. (Los Autores)

| Estudio | Dimensión probeta | Localización | Software | Ganancias Internas | Particularidades (especificaciones) | Demanda en calefacción |
|----------------------|------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bustamante W. (2009) | 76 m ² | Concepción (Sur Litoral) | TAS | 160 Wh/m ² al día | Temperatura de confort 20°C día/17°C noche. Renovaciones de aire: 1 ACH. Valores U Cielos 0,38 / Muros 1,7 | 115 kW/m ² por año |
| Donoso (2009) | 100, 17 m ² | Puerto Montt (Sur Litoral) | Ecotect | 252 kWh/m ² al mes | Valores U Cielos: 0,23 / Muros 0,57 / Ventanas 3,10 Doble vidrio | 130 kWh/m ² por año |
| Celis (2012) | 90 m ² | Concepción (Sur Litoral) | Casanova | No determinado | Valores U Cielos: 0,38/ Muros : 1,7/ Suelo 0,6 | 147 a 140 kWh/m ² al año (variación por orientación) |
| Ambientes (2007) | 72 m ² | Concepción (Sur Litoral) | No especificado | No especificado | Acorde de mediciones casos reales (No publicado) | 180 kWh / m ² al año |
| El Autor | 72 m ² | Concepción (Sur Litoral) | Ecodesigner | 200 kWh/m ² por mes | Valores U Cielos 0,53 / Muros 2,6 / Suelo 4,34 / Ventanas 2,6. ACH:3,78. Temperatura de confort: entre 20 y 25 °C | 95,45 kWh /m ² a 136,15 kWh/m ² al año (variación por orientación y vientos predominantes) |

investigaciones de Bustamante y Donoso [3; 4]; respecto a Celis [1], está cercano a su valor máximo y en relación con el Ambiente [5], nuestro modelo presenta un desempeño sustancialmente superior, diferencia atribuible a las mejores carpinterías de ventanas, ya que este último referente considera la no utilización en absoluto de aislamientos, con altos rangos de infiltración acorde con las mediciones in situ. Se comprobó que la herramienta de simulación BIM muestra resultados semejantes a obtenidos en software especializado y estudios anteriores, aunque con alta dispersión, atribuible a que todos los casos provienen de supuestos distintos.

Con el objeto de revisar el simulador de captadores térmicos, se analizaron diferentes modelos de Ecodesigner® para ser comparados con otras

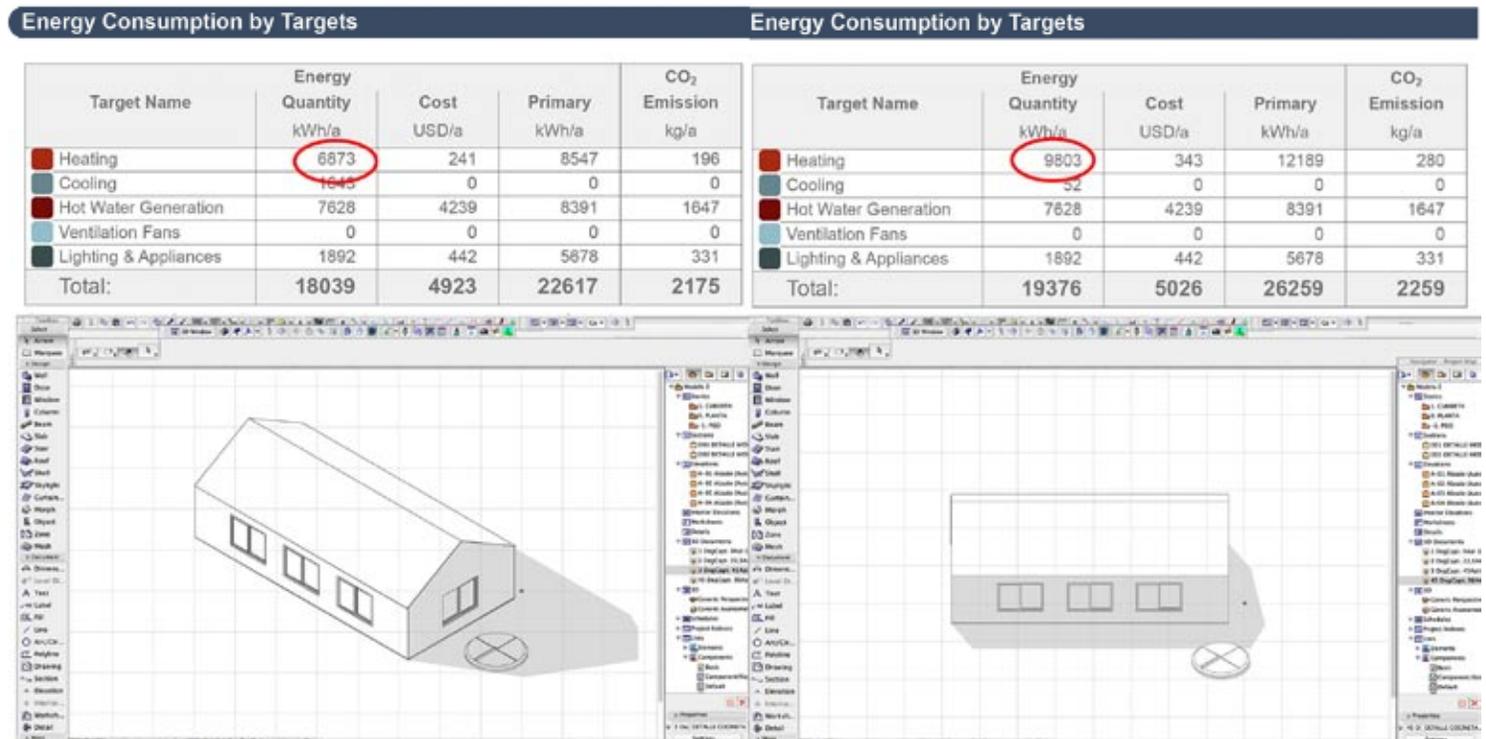


Figura 4: Resultados de energía para calefacción acorde con la orientación. (Los Autores).

investigaciones. En el modelo de vivienda elaborado en Archicad®, con uno de los costados de la techumbre orientada exactamente perpendicular al norte e inclinada 36°, con un colector de 2 m² en Concepción, la producción resultante simulada es 2 553 kWh/año. El modelo con la misma orientación y techumbre inclinada 51° indicó una producción de 2 384 kWh al año, lo que implica una disminución de 6,6 %. Una variación similar se advirtió en el estudio de Caroline Hachem [6], quien al incrementar la inclinación desde 45° a 60°, vio disminuir la producción en 7,5 %. Al revisar la orientación, cuando el modelo se rotó 30° respecto al norte, con pendiente de 36°, la producción disminuyó a 2 195 kWh/año o 14 %; C. Hachem [6] cuando realizó la misma modificación redujo únicamente 5 % respecto a máxima producción. Estos resultados reflejaron una concordancia en variación por inclinación y algo de diferencia en la variación por orientación, que puede ser originado por distinta latitud de ambas ciudades analizadas (Concepción y Montreal) y el tipo de captación: térmica con fluido líquido, vs. aire sin dispositivo de almacenamiento. En ningún caso las variaciones comparadas provocaron disminución que afecte más de 85 % de captación y las pérdidas por orientación mostraron ser superiores a las generadas

por pendiente, equivalente a otros estudios. Variaciones en inclinación y orientación muestran ser factores de potencial aprovechamiento en otras investigaciones, cuando intencionalmente se mejora la producción en distintas temporadas u horas [7; 6; 8], considerando una disminución de producción anual mínima. En cuanto a eficiencia del colector, más factores de pérdida por almacenamiento, distribución, etc; teniendo en cuenta que para Concepción, un plano inclinado 370 recibe 1 602 kWh/año [9], para obtenerse 2 553 kWh/año de energía útil (resultado de Ecodesigner®), el nivel de rendimiento o eficiencia utilizado por el software está en el orden de 0,75, indicador en el rango máximo para colectores térmicos.

Evaluación Paramétrica de caso de estudio.

Se explora paramétricamente aspectos formales de modelo de vivienda frente a sistemas solares térmicos y demandas energéticas consecuentes. En los antecedentes respecto a colectores se advierte que inclinación y orientación son relevantes para la producción energética [13; 14], incluso puede resultar estratégico para mejorar la producción temporal: En invierno cuando existe mayor demanda, al incrementar la verticalidad del colector, contribuye a evitar sobrecalentamiento en verano y aumentar producción cuando crece el requerimiento [8], por el contrario si se necesita mayor producción en verano, por ejemplo para acondicionar piscinas, la inclinación del captador puede ser inferior [13; 15]. Con estos criterios, para Concepción se admite un rango de inclinación de captadores entre 21° y 51°, por latitud lo óptimo es 36°. Para requerimientos de calefacción, lo adecuado será adicionar 10° a 15° de pendiente (por mayor demanda invernal), entonces coincidiría con los 45° de inclinación sugerido también por CDT [16].

Con estas consideraciones, se modelan y simulan algunas opciones, incluyendo algunas en condiciones no adecuadas, modificando los siguientes parámetros:

- Orientación de la vivienda: disposición del volumen y orientación consecuente de ala de techumbre al norte verdadero, es decir, 0° de desvío en azimuth (situación óptima), luego rotaciones paulatinas de 22,5°, 45°, 90° (este se considera similar entre este/oeste) y 180°, que corresponde a colocar captadores en la cubierta opuesta a la disposición a 0°, para determinar la producción potencial energética más desfavorables, con nula irradiación directa.

- Inclinación de cubierta/captadores: Ángulo de inclinación de techumbre respecto a la horizontal. Se consideraron variaciones desde 1° (prácticamente horizontal), luego 15°, 30°, 45° y 89° (prácticamente vertical representando colector ubicado en fachada).

- Cantidad de captadores o área de captación: Se considera un dimensionamiento modular de paneles con área de absorción de 2 m² cada uno. Desde 0 captadores como caso base, luego 1, 2, 3 y 6 captadores (0, 2, 4, 6 y 12 m² respectivamente).

La combinación de estos factores genera 125 modelos en Archicad® y se analizan consecutivamente con Ecodesigner®, registrando sus resultados individuales en una matriz de datos (figura 5).

Resultados

Demanda y Aporte Energético Térmico Solar

Para cada modelo analizado, se obtuvo un reporte de demanda energética total, y contribución solar activa (ambos en kWh por año); el gasto de combustibles estimados (en dólares-año), emisiones de gases invernadero (en kilos de CO₂ anual) y gasto monetario potencial con los precios

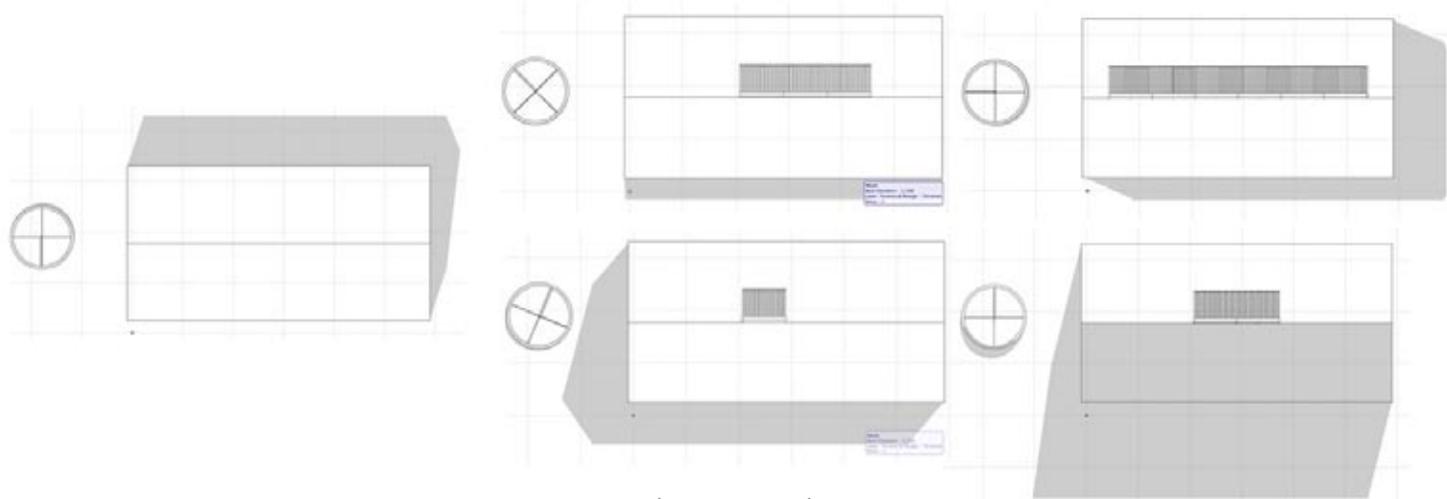


Figura 5: Vista superior de algunos modelos estudiados (Los Autores).

energéticos locales (o ahorro consecuente), los cuales son resumidos en tabla 3. Al sumarse demandas y ganancias internas se observó que para calefacción puntualmente, el requerimiento osciló entre 6 800 a 9 500 kWh/año. En gasto monetario, el software estimó desde prácticamente 1 000 hasta más de 5 000 dólares anuales en los casos extremos, y esto en dependencia directa con el número de captadores; las emisiones de CO₂ calculadas oscilan entre 700 hasta 2 200 kg de CO₂ por año (también en consecuencia fundamentalmente al número de captadores). Se evidenció que los parámetros revisados poseen incidencias sustanciales en la eventual recolección de energías renovables, consumo de combustibles e impacto a la atmósfera, los cuales son descritos en lenguaje sencillo al arquitecto.

Al consolidarse datos, considerando únicamente orientación, el requerimiento energético total es menor cuando se emplaza el modelo con su lado más extenso rotado 45° respecto al norte, resultando en una demanda de 6 874 kWh para calefacción, lo cual significa 96 kWh/m² al año. La disposición con mayor requerimiento fue con orientación norte/sur, con 9 803 kWh por año, lo que implica 136,5 kWh/m² por año. Este resultado contradice las recomendaciones de disposición mayor este-oeste, por un incremento de la contribución solar. Sin embargo, el modelado se programó en lugar abierto descampado, con vientos predominantes acorde con el archivo climático (proviene de SW y S) lo cual incidió en las demandas. El requerimiento energético global promedio para calefacción considerando todas las orientaciones según resultados de Ecodesigner® fue 119,34 kWh/m² por año, similar a otros estudios.

Cuando se adoptó la hipótesis de captadores solares térmicos dispuestos casi verticalmente (89°), se observó que de todas las orientaciones estudiadas, la producción máxima obtenida fue 7 469 kWh con orientación norte. Cuando se giró 22,5° respecto al norte la producción anual disminuyó al 80 %; con 45° de rotación, la disminución de producción fue a 66 % del máximo y con rotación de 90°, la producción alcanzó únicamente el 45 %; finalmente con los captadores orientados completamente al sur, se generó 21 % respecto a la mejor producción. Se muestra una fuerte incidencia de la orientación con inclinación alta, obteniéndose una quinta parte respecto a la máxima posible. En contraparte cuando la cubierta y captadores fueron dispuestos casi o cerca de la horizontal (150 de pendiente), la producción máxima mejora a 9 959 kWh/año y disminuye únicamente a un 77 % en

condiciones más desfavorable (encarando al sur), hecho explicable porque recibe mayor irradiación, incluso directa, gran parte del año, a pesar de estar completamente mal orientado (figura 6).

Según pendientes de cubierta se observó una producción máxima con 45°; en esta circunstancia con 6 captadores se alcanzó un aporte de 11 141 kWh/año. Con los colectores inclinados 300, la producción disminuye mínimamente. Se confirmó que una variación cercana a 10° respecto a la pendiente óptima no representa una pérdida apreciable, coincidiendo con CDT [16] y Hachem [6]. Con 15° de inclinación también se apreció una pérdida leve. Una reducción sustancial se produjo con los colectores en vertical

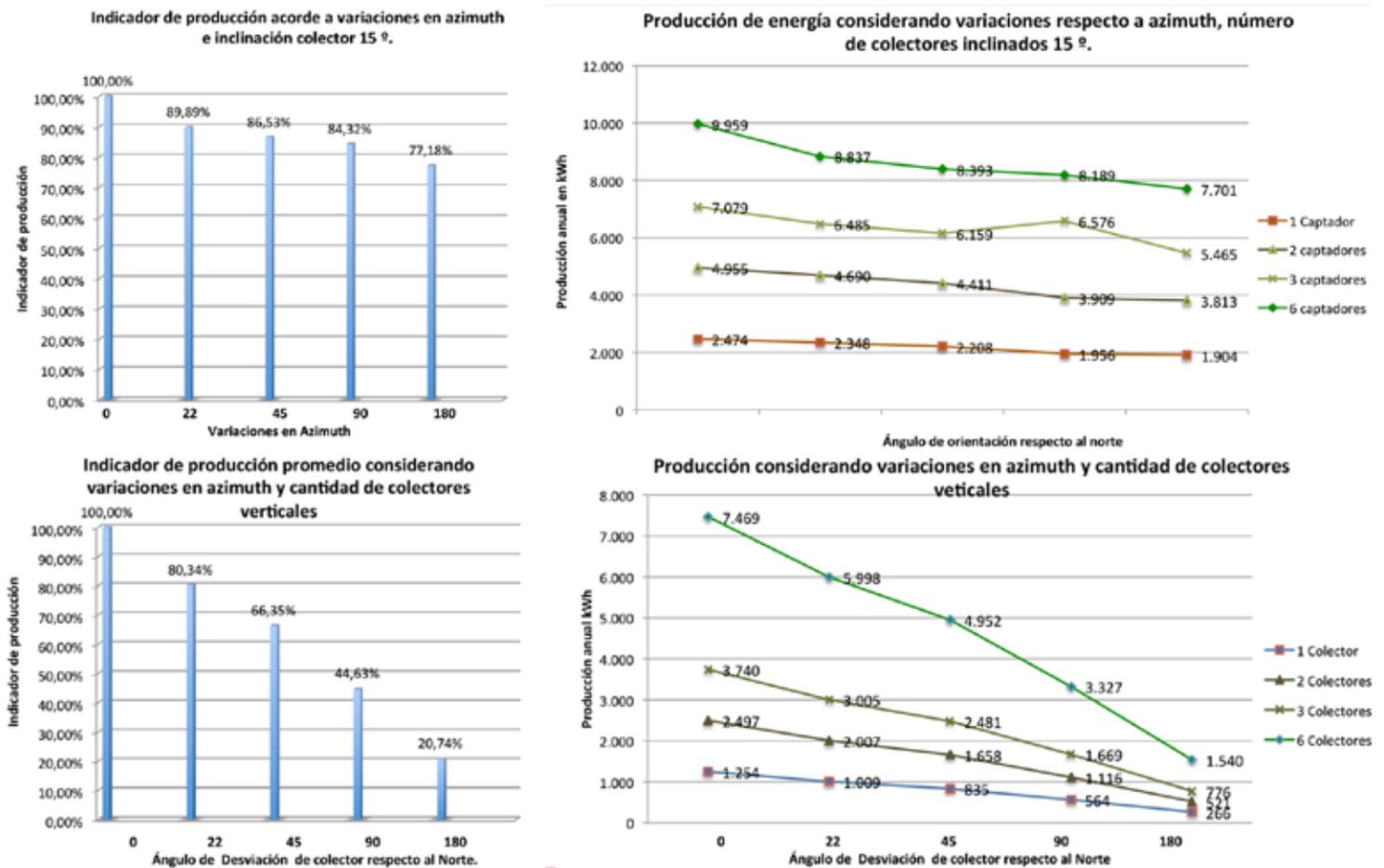


Figura 6: Comparación de desempeño de colectores dispuestos verticalmente respecto a colocados prácticamente horizontal. (Los Autores)



Figura 7: Distintas variaciones visuales generadas conjuntamente con simulaciones energéticas. (Los Autores)

presentando una producción de 57,57 %, respecto a la máxima; además esta disposición es más proclive a agentes externos como sombreados, especialmente con colectores dispuestos en fachada (figura 7).

De acuerdo con la superficie de captación, se advirtió que el incremento de producción es casi lineal hasta colocar seis metros cuadrados o tres colectores. Luego, al haberse completado la demanda de ACS y no requerirse calefacción en verano, el aporte disminuye por m² de colector. Colectores adicionales producen menos energía por m² conforme se incrementa la superficie de captación mostrando ineficiencia. Se concluye que para el requerimiento global de la vivienda estudiada, no debería instalarse más de tres colectores de 2 m². (figura 9)

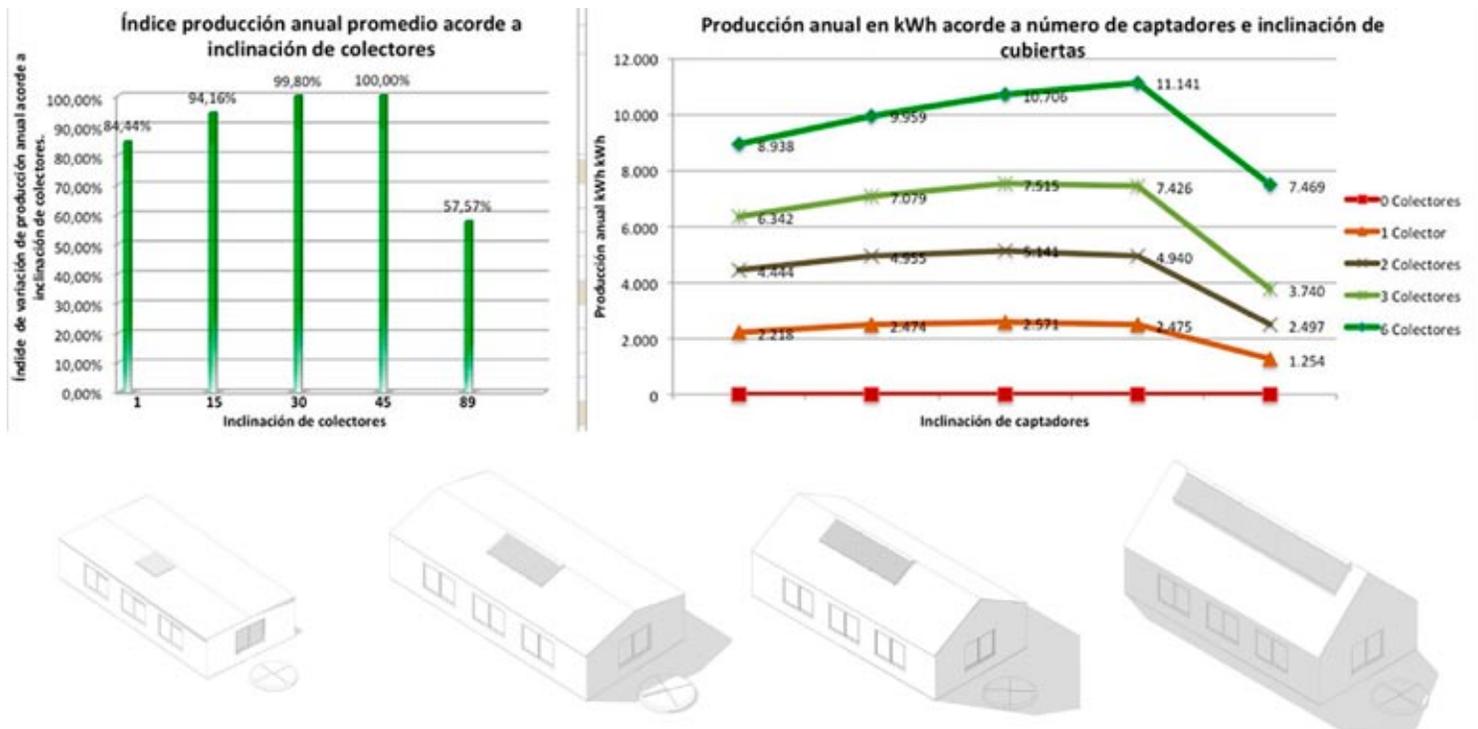


Figura 8: Producción acorde con la variación en pendiente y cantidad de colectores. (Los Autores)

Finalmente para determinar el volumen requerido de almacenamiento y en consecuencia al volumen del tanque, se adoptó la fórmula indicada en CDT [16], la cual expresa: $50 L > (V/a) < 180 L$ (V : Volumen de agua de almacenamiento; a : Área de captadores), la cual determinó un volumen máximo de 1 080 L para los 6 m² de captación. Otra alternativa de dimensionamiento es acorde al uso de ACS por persona, en este caso Ecodesigner® se rige por la normativa Sueca que establece 100 L/ persona (superior a la indicada en CDT [16] de 50 L/persona en Chile), otra relación utilizada es optar entre 75 y 100 L/m² de captación [17], en nuestro modelo esto representa 420 a 600 L. Hay que considerar almacenamiento en el rango mayor, por la contribución propuesta y conexión a calefacción con tecnología Combi, para lo cual H. Gajbert [8] sugiere que con 50 m² de captación es necesario un almacenamiento de 4 m³. Bajo este precepto para el sistema planteado de 6 m², el volumen de almacenamiento deberá estar alrededor de 480 L de adoptarse el dato de Gajbert proporcionalmente. En cualquier caso, es necesario ubicar el almacenamiento a nivel de suelo, idealmente al interior de la vivienda por aislamiento y por peso de fluido (por lo menos media tonelada de agua en zona sísmica). El espacio interior necesario es inferior al actual utilizado en la mayoría de viviendas de la zona

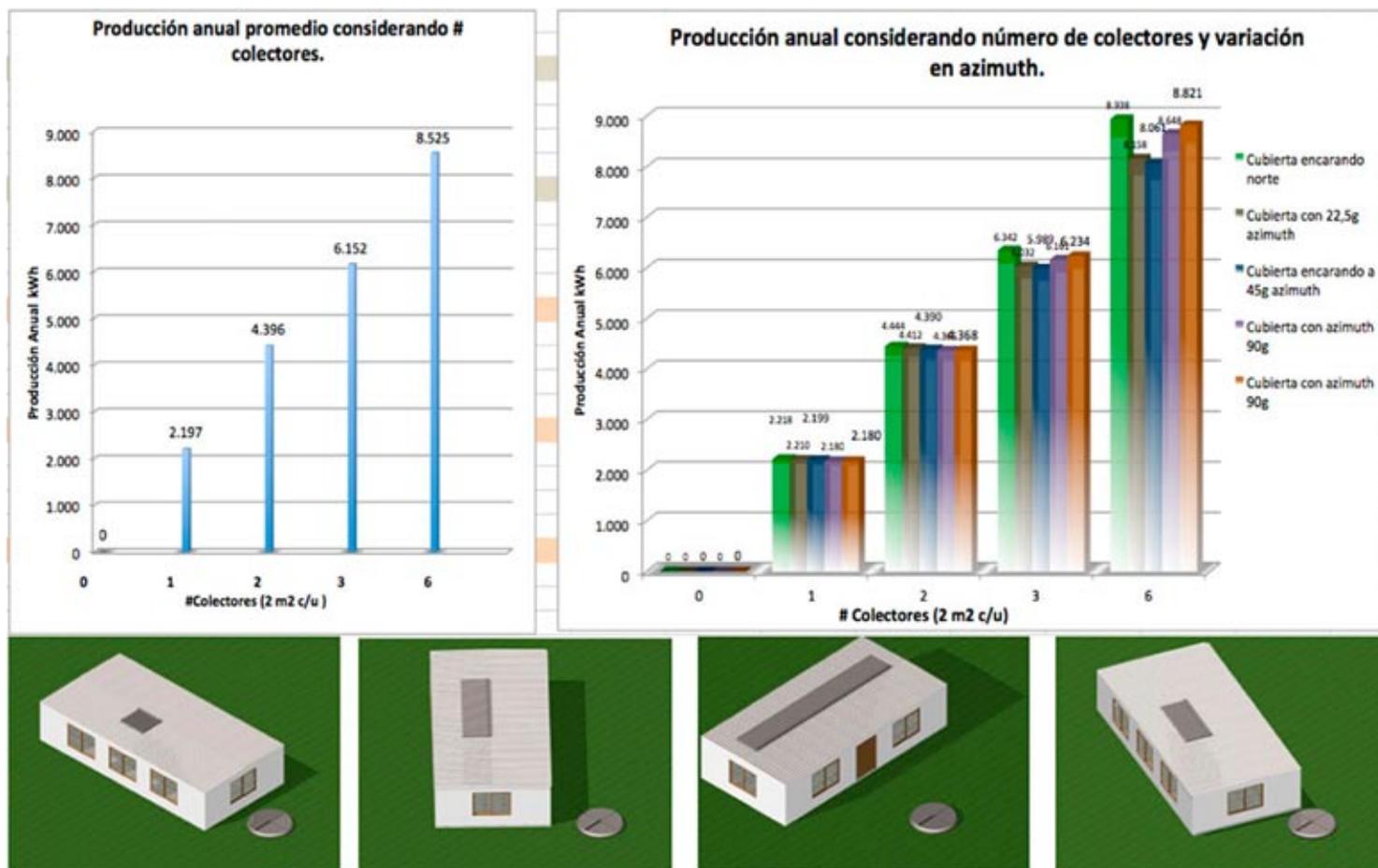


Figura 9: Desempeño acorde con el número de captadores.

para almacenar leña. Otra consideración importante expuesta por Gajbert [8], es no superar con producción el 95 % de demanda de ACS (y volumen de almacenamiento), antes de tornar en ineficiente por sobreproducción; ante esto, los resultados de Ecodesigner® muestran que con tres captadores se generan 6 427 kWh para una demanda de ACS de 7 628 kWh, cubriendo el abastecimiento en un 84 %, próximo a lo expuesto por Gajbert [8] para tecnología Combi (95 %). Con 4 captadores, se rebasa el requerimiento mencionado para ACS, coincidente con pérdida de eficiencia por m² de colector. Se demuestra entonces que el programa permite al arquitecto detectar sobredimensionamiento si analizamos resultados de aumentar superficie de recolección cuidadosamente, aunque debería (y sería óptimo) que lo alerte o declare directamente. Se descifró entonces que tres colectores representan un área apropiada de captadores térmicos para este modelo, con tecnología Combi ACS-Calefacción.

Para resolver la limitación por sobreproducción y almacenamiento e incrementar al máximo la capacidad de recolección térmica, existe la posibilidad de almacenamiento de energía térmica en subsuelo, en colaboración con tecnología geotérmica y bomba de calor, para recolección con almacenamiento térmico comunal (varias casas unifamiliares con grandes superficies de captación), sistema que puede cubrir demandas estacionales, almacenándose energía por meses [2; 3; 18], por ahora costoso, con potencial a futuro.

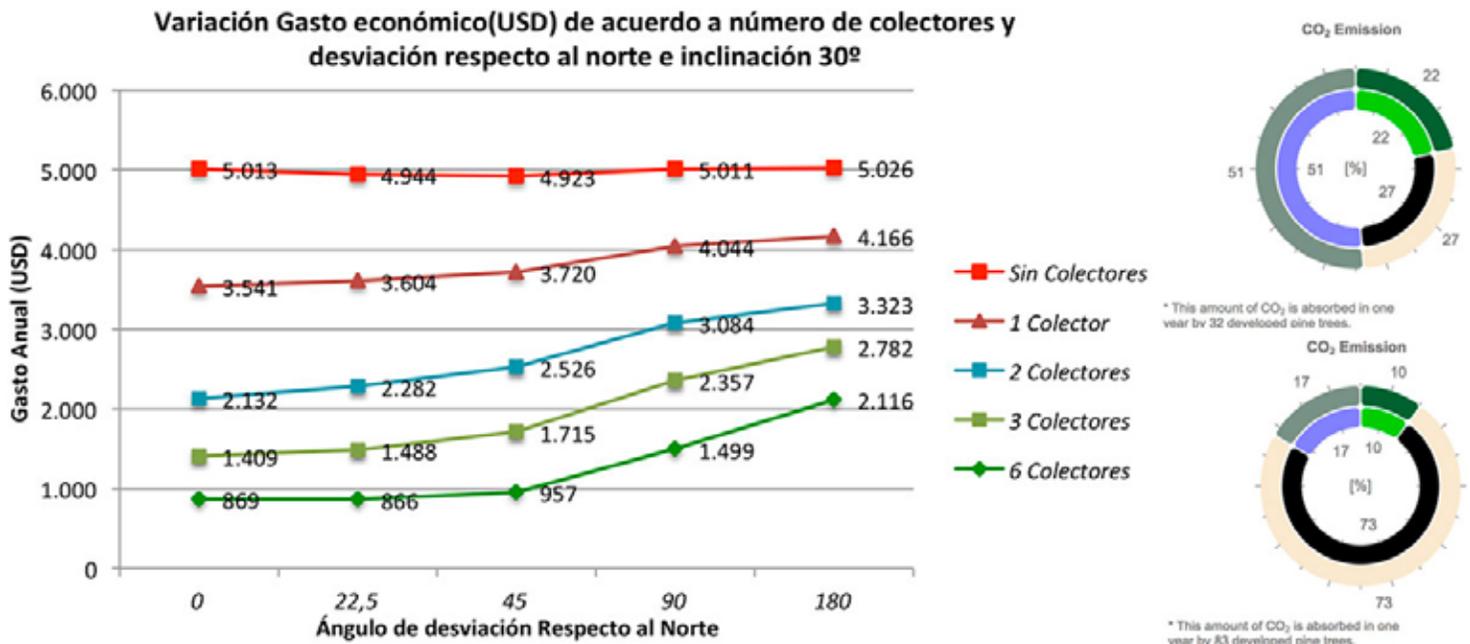
Financieramente considerando precios energéticos de septiembre de 2013 para electricidad, leña y gas natural, el ahorro económico estimado

se muestra en tabla 4. Se observa disminución de gasto parejo cuando se instalan entre 1 y 3 colectores alcanzándose un 71,8 % de ahorro; con seis colectores el ahorro llega solamente al 82,7 %, por la pérdida de eficiencia ya explicado; también se muestra incremento de gasto por deficiente orientación. El software declara que la vivienda sin colectores térmicos emite CO₂, equivalente al absorbido en un año por 83 pinos desarrollados, mientras en el caso de la utilización de 3 colectores, las emisiones se reducen a la absorbida por 32 pinos desarrollados. El tiempo de amortización del sistema, teniendo como precio referencial de la instalación, incluyendo piso radiante de 11 700 USD acorde los precios publicados por CYPE Ingenieros Chile [19], podría pagarse la instalación en menos de 5 años.

Desarrollo arquitectónico detallado del Sistema Solar Térmico Integrado

Se revisó una alternativa de integración arquitectónica a través de la misma plataforma computacional, al elaborarse un modelo constructivo completo a partir del anteproyecto esquemático inicial. Se consideró la tipología y dimensionamiento analizado en la evaluación paramétrica y con las capacidades de examen geométrico más la visualización gráfica

Tabla 4: Gasto en energía de uso doméstico anual dependiente de número de colectores y orientación



que posibilita el software BIM, se adoptó una solución de captación solar incorporada en la configuración arquitectónica de la vivienda de forma integral y constructiva.

La definición material se basó en la normalización oficial del Ministerio de la Vivienda (MINVU), considerándose una casa habitacional popular, basándose en el "Catálogo de Viviendas Aprobadas 2012"[20]. Se adoptó la distribución funcional de la tipología N° DITEC-059-MUS-01-61 que posee una altura y proporción similar (adaptando la superficie total de 61 a 72 m²), con sistema estructural según la tipología N° VIII-031-ELIANA-01-45, que corresponde a la materialidad planteada previamente, asumiendo la techumbre del tipo "Coyahue" aprobada por el Ministerio de Vivienda de Chile (figura 10). El sistema de techumbre contempló estructuras reticuladas de madera y planchas acanaladas de cubierta. El dispositivo de captación solar considerado se compone de colectores de tubo de vacío integrado a la cubierta. Se planteó además adoptar la transparencia y filtración solar del

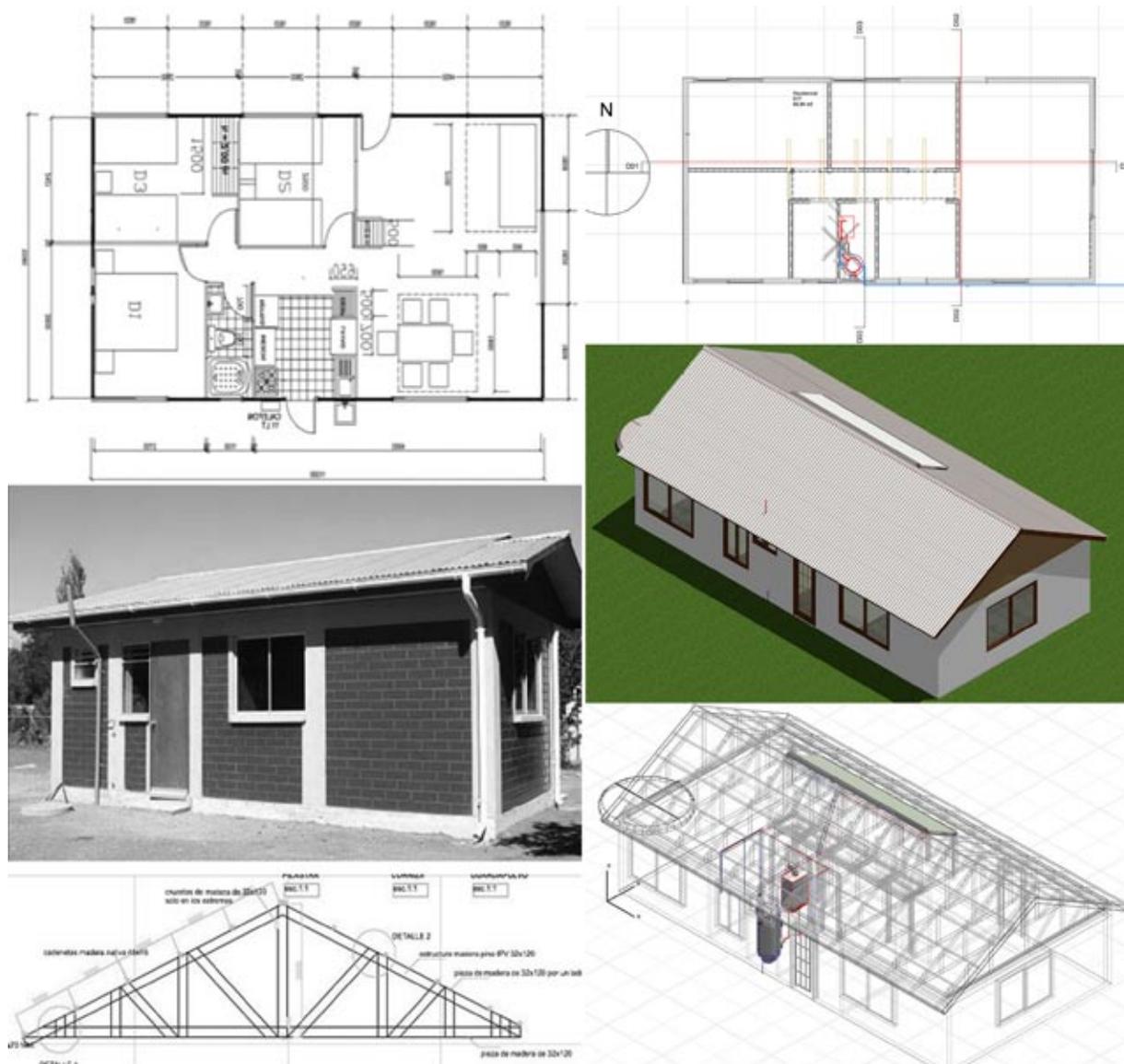


Figura 10: Planta, fotografía y detalle de techumbre de vivienda MINVU de referencia de la zona Centro-Sur de Chile (izq.). [16]. Planta, vista renderizada y transparente del modelo elaborado en Archicad con sistema Combi integrado para captación de energía solar en configuración de vivienda (der.).(Los Autores)

tipo de colector para otorgar y controlar iluminación natural al interior de la vivienda. El tanque de almacenamiento se localizó en recintos de servicios internos, por lo demás se mantuvo la distribución interna y configuración volumétrica del modelo MINVU. Se modeló la adopción del sistema Combi con su totalidad de partes, lo que exigió un sitio interior para localizar el almacenaje, redes y dispositivos de funcionamiento. En cuanto al esquema de redes, se adoptó "Sistema Indirecto con Circulación Forzada" [16], con fluido calo-transportador circulando desde el colector, llevando energía térmica al tanque de almacenamiento.

Con las condiciones manifiestas, se detalló el modelo tridimensional en BIM, considerando la inclusión de tres colectores de tubos al vacío en ala de cubierta orientada al norte, aspecto que se determina como área de captación adecuada en la etapa previa. Se consideró fijaciones a la estructura de cerchas y sellos de aguas lluvias con las restantes planchas metálicas de cubierta. Se conforma un lucernario en pasillo central para aprovechamiento de radiación y luz entre los tubos de vacío, lo cual posibilita captación solar pasiva filtrada. El lucernario considera paramentos aislados

con terminación reflectante y esclusa acristalada en el cielo para evitar fugas térmicas excesivas, a la vez practicable para ventilar en verano (figura 11). Similar aplicación ya ha sido experimentada en edificios corporativos [22]. El software permitió entender el resultado al generar vistas interiores y revisar la espacialidad lograda en las representaciones generadas.

Se modeló las instalaciones, red y equipos necesarios acorde con la disposición Sistema Indirecto con Circulación Forzada [16]. Se prevé un local de 4 m² junto a recintos húmedos de la vivienda, en donde se alojó el tanque de almacenamiento energético, termostato, controles y medidores de funcionamiento, además de la bomba de recirculación. La calefacción es por losa radiante, distribución térmica ideal para sistema Combi [8] por eficiencia, al requerirse menor temperatura en fluido (menos de 40 °C), lo que implica ahorro de energía en comparación con el uso de radiadores

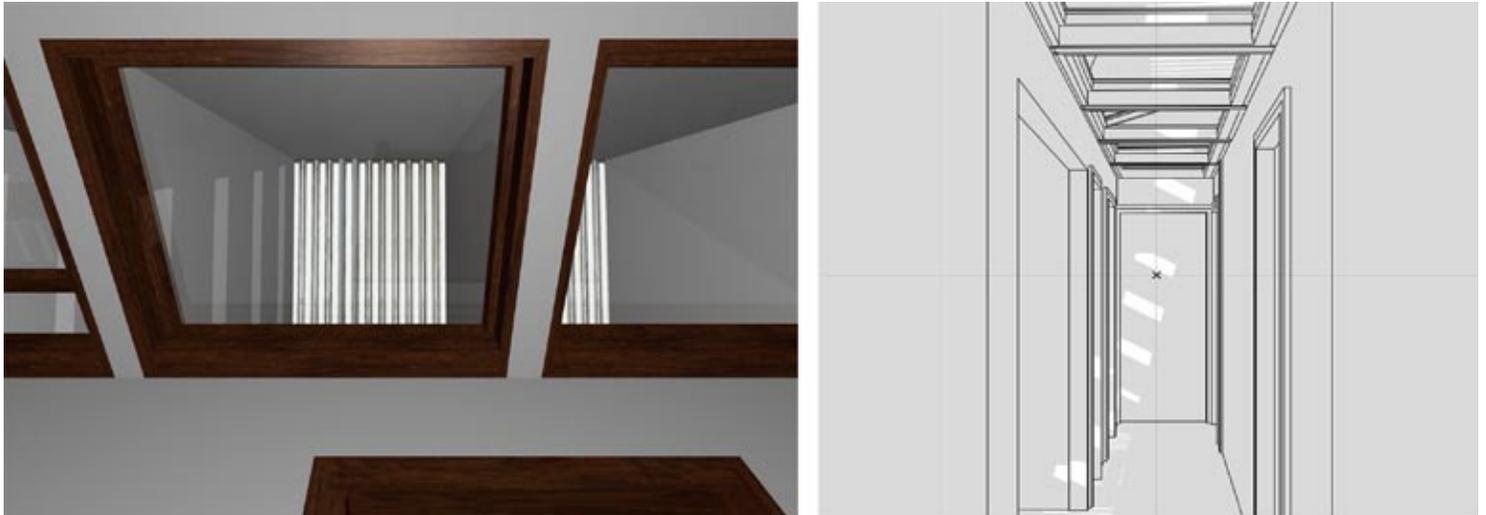


Figura 11: Vistas interiores de integración arquitectónica de colectores con lucernario. (Los Autores)

que requieren entre 700 y 900 °C, (además es calefacción definida como más confortable) [23]. De este modo, se completa el modelo constructivo, técnico y visual con menos posibilidad de error (figura 12). Se comprobó la adecuación de la tecnología a los recintos y posibilidad cierta de ejecución.

Se ejecutó una nueva simulación de desempeño energético para compararlos con los modelos esquemáticos previos. Para la comparación se recoge la simulación correspondiente a las mismas condiciones como pendiente de cubierta, orientación y número de captadores previamente desarrollado. Se observó una disminución de requerimiento energético puntualmente en el rubro calefacción, lo cual es producto de la ganancia solar y térmica obtenida en el lucernario. Mientras tanto la cantidad absorbida por los captadores térmicos y las emisiones de CO₂ se mantienen muy cercano en ambos casos. El ahorro que se evidencia es menor requerimiento de leña, de 7 820 a 5 896 kWh/año. Esta reducción representa una baja del consumo en 25 %, reflejando importancia de la captación solar pasiva. Acorde con la simulación se logró además una reducción en la emanación de gases de invernadero, con una demanda energética general equivalente a un tercio de la usual en el país, tomando en referencia viviendas de similar configuración (tabla 5).

Conclusiones

Este trabajo presenta una experimentación computacional integrada de diseño arquitectónico con cálculo energético, para incorporar sistemas de captación solar en vivienda, y así promover sistemas renovables en las

22. VISSMANN, SL. "La tecnología solar bajo una nueva luz: Los colectores como elemento decorativo". En: *Sitio Web de Viessmann*. [en línea] [consulta: 9 septiembre 2013]. Disponible en: http://www.viessmann.es/content/dam/internet-es/pdf_documents/brochures/vitosol/9447023_ti_133_vitosolar.pdf

23. RELAÑO, Antonio. "Proyecto de instalación solar para agua caliente sanitaria, calefacción y piscina en un edificio de viviendas". Director: Domingo José Santana Santana Tesis de Diploma de Ingeniería Industrial [en línea] Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Madrid, 2010. [consulta: 9 septiembre 2013]. Disponible en: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/9478>

construcciones residenciales. Se revisó la modelación y análisis simultáneo de una tipología de vivienda unifamiliar localizada en Concepción, Chile, con superficie de 72 m². Definiendo paramétricamente la orientación y

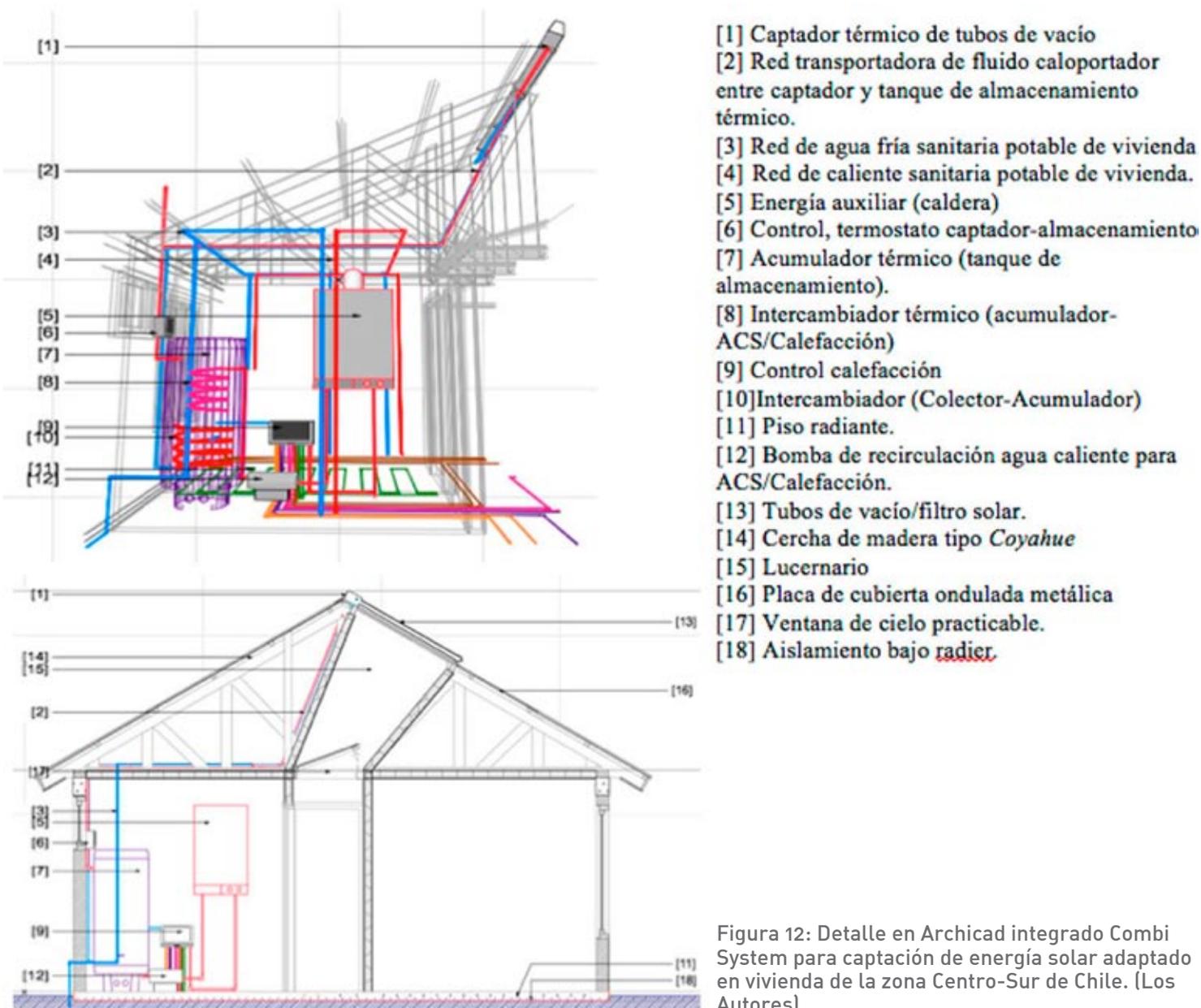


Figura 12: Detalle en Archicad integrado Combi System para captación de energía solar adaptado en vivienda de la zona Centro-Sur de Chile. (Los Autores)

Tabla 5: Comparación de requerimiento energético en modelo de análisis energético respecto a modelo de vivienda con Combi System desarrollado por completo e integrado arquitectónicamente.

| | Consumo total kW/año | Consumo Calefacción kW/año | Cantidad kWh/año en sistemas captación | gasto USD/año | CO2 (kg/año) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|---------------|--------------|
| Modelo simulación original 3 captadores, Pendiente 30°, Orientación norte | 18726 | 9150 | 7426 | 1333 | 832 |
| Modelo simulación con 3 captadores, Pendiente Cubierta 30° y Orientación norte + alteración por referentes funcionales y constructivos MINVU + Integración arquitectónica de lucernarios-captadores | 16807 | 7290 | 7290 | 1333 | 804 |



Figura 13: Conjunto de viviendas con sistema de colectores dimensionados e integrados en Archicad y Ecodesigner. (Los Autores)

configuración arquitectónica en relación con la dimensión y rendimiento de paneles térmicos solares, con las capacidades de modelación BIM de Archicad® y el cálculo directo en Ecodesigner®. Al variar seis parámetros combinados en 125 modelos y simulaciones relacionadas, se encontraron valores iniciales equivalentes a estudios similares, con tendencias consistentes. Se pudo revelar el impacto de la cantidad de paneles y la superficie captadora en relación con el aporte potencial en la demanda energética de la vivienda. Se determina una capacidad adecuada utilizando una fracción de la cubierta, con un área de captación máxima de 6 m² para el modelo de 72 m² planteado, lo que resulta coincidente con sugerencias de investigaciones para una tecnología solar híbrida (Combi). Los resultados mostraron la incidencia de la inclinación y orientación de la techumbre en la capacidad productiva de los colectores (15 % de pérdidas por variaciones de 30° en inclinación y orientación), descifrando las disposiciones más adecuadas.

Luego se desarrolló la configuración completa de la vivienda con una implementación solar térmica, de acuerdo con la tipología más óptima identificada en la evaluación inicial, y con un detallado de acuerdo con los sistemas constructivos vigentes. Se aplica una instalación combinada para agua caliente sanitaria y calefacción, con paneles de tubos al vacío como elemento constitutivo de cubierta. La simulación sugiere la posibilidad de abastecer el 84 % de ACS y 49 % de la demanda térmica total permitiendo un ahorro económico de hasta el 70 % anual bajo condiciones ideales. Además se utilizó las características de filtración de luz del colector para conformar un lucernario que aporte iluminación natural, y disponer los equipos de control y almacenamiento en recintos interiores. Se elaboró la representación técnica de la instalación al tiempo de lograr visualizaciones para entender la configuración arquitectónica.

Esta experiencia permitió comprobar novedosas capacidades integradas de diseño arquitectónico y análisis energético, lo que otorga relevantes posibilidades para la formulación de proyectos de edificación con un mejor

comportamiento, a través del proceso aquí propuesto. El ejercicio aplicado con equipamiento de captación solar en viviendas regulares del centro-sur de Chile, permitió también definir alternativas eficientes de configuración arquitectónica y dimensionamiento de las instalaciones, estimando una contribución importante. Las capacidades integradas sugieren por tanto una potencialidad de formulación de soluciones energéticas adecuadas en los proyectos arquitectónicos, logrando así edificaciones más sustentables.

El caso analizado insinúa posibilidades relevantes para mejorar el desempeño ambiental de las viviendas de la zona, con la instalación de sistemas apropiados de captación solar térmica, demostrando una reducción relevante en los gastos familiares con inversiones reducidas. Se promueve disposiciones de las viviendas por orientación e inclinación de techumbre que permitirían lograr estructuras urbanas con zonas residenciales extensas con bajos consumos energéticos. Adaptando los modelos habitacionales para un crecimiento urbano más sustentable. Ciertamente se deben revisar las implicancias económicas y urbanas de las configuraciones sugeridas, como también verificar su ejecución y comportamiento efectivo.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de tesis en desarrollo en el Doctorado en Arquitectura y Urbanismo, de la Universidad del Bío-Bío, Concepción Chile, con apoyo del proyecto CONFIN AKA-ERNC 007 de Conicyt.



*Esteban Zalamea León.
Arquitecto Universidad de Cuenca;
Magíster en Construcciones de
la Universidad de Cuenca; Dr(c)
en Arquitectura y Urbanismo de
Universidad del Bío Bío; Depto. Diseño
y Teoría de la Universidad del Bío Bío,
Concepción, Chile.
estebanfzl@gmail.com*



*Rodrigo García Alvarado.
Depto. Diseño y Teoría de la
Arquitectura, Universidad del Bío Bío,
Concepción, Chile. rgarcia@ubiobio.cl*