

Criterios de diseño para la implementación de sistemas fotovoltaicos integrados (BIPV) en mansardas de viviendas de la Región Metropolitana.

Hacia la edificación de viviendas cero consumo de energía.

Estudiante: Andrés Soto-Ruiz Hernández
Profesor guía: Jeannette Roldán

Resumen

Las problemáticas ambientales actuales incentivaron planes de acción, mediante acuerdos como las NetZero Buildings. Así, las viviendas cero consumo abordan el uso de energías renovables no convencionales mediante tecnologías eficientes de generación energética, como los sistemas BIPV. La tipología de vivienda con mansarda aumenta la superficie útil habitable, pero, además, permite la implementación de energías renovables, pues posee una superficie de recolección solar relevante en la techumbre, generando aportes hacia los planteamientos NetZero. Mediante un análisis de sistemas BIPV se establecen los requerimientos de los sistemas, luego, bajo el análisis de un caso específico, se realizan simulaciones con softwares y cálculos de dimensionamiento fotovoltaico, logrando cubrir un 100% de las demandas eléctricas y un 48% de las demandas energéticas totales del caso de estudio, reconociendo las variables de diseño arquitectónico que permiten la integración BIPV eficiente en la mansarda de viviendas de la Región Metropolitana hacia el NetZero.

Palabras clave: Vivienda, Mansarda, BIPV, NetZero Buildings, Sistema solar fotovoltaico

1. Introducción

El escenario global actual de cambio climático es un tema recurrente de discusión ante la preocupación de los impactos ambientales de origen humano. Por ello, la energía y el uso de alternativas tecnológicas sostenibles resulta fundamental para reducir los daños producidos y venideros, en el marco de los objetivos fijados internacionalmente en instancias como el Acuerdo de París, el *Anual Energy Outlook* (EIA) y mediante diversos organismos de discusión sobre energía neta cero (NetZero) y específicamente en el ámbito de las edificaciones con las Net Zero Energy Buildings (nZEB).

Bajo este contexto, los tratados y compromisos internacionales sobre NetZero y *Nearly Zero energy Buildings* (nZEB), buscan la reducir los consumos energéticos contaminantes desde la arquitectura y la

construcción, pues, hasta un 40% del consumo energético proviene de las edificaciones (EIA, 2021). Así, cuando se habla de nZEB no se hace referencia a una edificación que no consume energía, sino que a aquella que logra consumir prácticamente la misma energía que produce, que, a su vez, procede de fuentes renovables. La Comisión Europea establece que la energía requerida por una edificación debe ser cubierta en gran medida por energía de fuentes renovables no convencionales (ERNC), incluyendo la energía de fuentes renovables producida en el lugar o en las cercanías (Comisión Europea, 2021), y también establece junto a la Directiva de Desempeño Energético de Edificaciones (EPBD) que todos los edificios nuevos deben cumplir con los lineamientos nZEB a partir de 2021. Así también, se busca integrar estrategias de diseño constructivo en viviendas y edificaciones de gran escala para fomentar la reducción de consumos energéticos

contaminantes, incentivando el uso de sistemas fotovoltaicos (PV) en el sector residencial para responder a las demandas energéticas de la vivienda actual, satisfaciendo los planes NetZero propuestos para solucionar las necesidades climáticas actuales y futuras.

En el caso particular de Chile, según el último reporte del Anuario Estadístico de Energía otorgado por el Ministerio de Energía, correspondiente al año 2020, un 22% del consumo energético total corresponde al sector "residencial, público y comercial", cifra que ha aumentado un 4,7% respecto al año 2009 y que se espera aumente aún más en los próximos años, debido a las nuevas formas del habitar residencial que se han experimentado con la integración tecnológica. En esta línea, la política energética nacional ha tomado una dirección clara desde el año 2015, mediante el plan "Energía 2050" y la ley de eficiencia energética aprobada en 2021, que buscan acoger los intereses y necesidades de la sociedad actual y futura en ámbitos tecnológicos y ambientales, en beneficio del bien común y el medioambiente, buscando la competitividad, inclusividad, confiabilidad y sostenibilidad.

Particularmente, la energía de procedencia solar fotovoltaica (PV) posee un potencial notable en gran parte del territorio nacional, debido a la alta radiación solar que se recibe, sobre todo desde la zona central a la zona norte del país. Sin embargo, la gran mayoría de implementaciones solares fotovoltaicas en el sector residencial se encuentran en Europa y Norteamérica, latitudes donde la radiación solar varía entre 650 kWh/m² y 1800 kWh/m² anuales según la zona, mientras que Santiago, ubicado en el centro del país, posee poco más de 1850 kWh/m² al año, superior al máximo de las zonas de mayor radiación de los países pioneros en la materia. Por esta razón, además de los recientes incentivos nacionales de producción autogenerada solar y la inyección de excedentes a la red local, existe la posibilidad de integrar la tecnología PV a la planificación y construcción de la vivienda. En este sentido, los sistemas fotovoltaicos integrados a la edificación (BIPV) se pueden definir como:

"Corresponden a la sustitución de un elemento de la envolvente del edificio por otro con células fotovoltaicas. Es una solución prometedora para lograr un desarrollo sostenible e, incluso, energía neta cero en edificaciones" (Peres Suzano, 2021, p. 2)

Así, existe una gran diversidad de productos constructivos como tejas, paneles, superficies

semitransparentes, vidriadas y flexibles, entre otras. En este ámbito, las viviendas con mansarda poseen una superficie de recolección solar relevante en la techumbre, superior a las demás áreas irradiadas de la vivienda (Zalamea et al, 2014), debido a factores como la superficie útil disponible, la inclinación, la orientación y las posibilidades de diseño. Por ello, es necesario identificar las variables de diseño arquitectónico y las soluciones constructivas que permiten la integración de sistemas BIPV en la mansarda para promover el aprovechamiento solar eficiente de la vivienda hacia el consumo de energía cero, permitiendo así cubrir, al menos, el 60% de las demandas de consumo energético residencial.

2. Antecedentes

2.1. Acuerdos internacionales sobre el NetZero y la política nacional

El contexto climático mundial de los últimos años ha causado que diferentes organismos, principalmente europeos, plantearan la necesidad de reducir las emisiones contaminantes al máximo en el corto, mediano y largo plazo, fijando metas y desafíos para diferentes sectores, como lineamientos y planes de acción generales que puedan ser beneficiosos contra el cambio climático (Oxford NetZero Climate, 2020). En este sentido, han surgido diversos conceptos, como NetZero o Carbono Neutral, que apuntan a diferentes formas en las que fuentes de emisiones fijan el objetivo de mitigar el calentamiento global con metas fijas a 10, 20 o 30 años plazo.

Por ejemplo, la Comisión Europea ha establecido que la energía requerida por una edificación debe ser cubierta en una medida muy significativa por energía de fuentes renovables, incluyendo la energía de fuentes renovables producida en el lugar o en las cercanías (Comisión Europea, 2021), y también establece junto a la Directiva de Desempeño Energético de Edificaciones (EPBD) que todos los edificios nuevos deben cumplir con los lineamientos nZEB a partir de 2021. Así también, se ha creado el sistema Zebra2020 que busca integrar estrategias de diseño constructivo en viviendas y edificaciones de gran escala para fomentar la reducción de consumos energéticos contaminantes, fomentando el uso de sistemas fotovoltaicos en el sector residencial para responder a las demandas energéticas de la vivienda actual, pero satisfaciendo también los planes NetZero propuestos en una región que

busca solucionar las necesidades climático-ambientales actuales y futuras, plantando desafíos para el resto de regiones y países.

La planificación de la política energética en Chile ha tomado una particular dirección desde el año 2015, con la conformación del plan "Energía 2050", que busca hacer frente a los intereses y necesidades de la sociedad actual y futura, en cuanto a ámbitos tecnológicos, sociales, económicos y ambientales, procurando mantener el bienestar personal y colectivo, preservando el bien común. Dicho planteamiento abarca temas de eficiencia y educación energética, sostenibilidad y seguridad del suministro, además de políticas de generación distribuida e incorporación de energías con fuentes renovables, producción e inyección de energías particulares a la red local (*Net Billing*) y fomento de organismos locales de fomento de generación de energías renovables como Casa Solar, Enel X, Barrio solar y Comuna Energética, programas orientados principalmente a la autogeneración energética renovable con sistemas fotovoltaicos en el sector residencial.

2.2. Sistemas fotovoltaicos y tecnología BIPV

La energía solar corresponde a la fuente de mayor y más abundante existencia en nuestro planeta, se estima un promedio de entre 1300 a 1400 W/m² en la capa exterior de la atmósfera en forma de radiación solar. Esta última, transfiere la energía mediante ondas electromagnéticas que provienen desde el sol en distintas direcciones.

"Por otro lado, la relevancia de esta fuente energética es de tal relevancia que anualmente se recibe el doble de la cantidad de energía extraíble de todos los medios no renovables, incluyendo también a los combustibles fósiles y al uranio nuclear, superando en 10.000 veces la energía consumida por toda la humanidad, donde la energía solar recibida en 1,6 km² de superficie es comparable a 4 millones de barriles de petróleo." (Wegertseider, 2016, p. 4).

Los sistemas solar fotovoltaicos corresponden a un conjunto de elementos tecnológicos que transforman la energía de la radiación solar en energía eléctrica, su elemento principal corresponde a la celda fotovoltaica, producida a partir de diferentes materiales, aunque principalmente silicio en sus diferentes formas. La manera de actuar de estas celdas se basa en el efecto fotoeléctrico, fenómeno en el que algunos

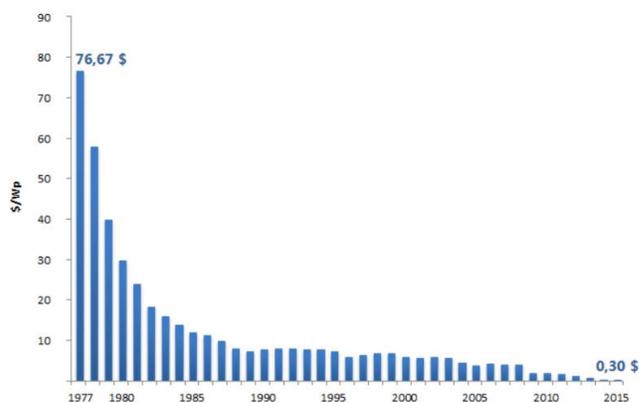


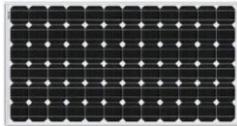
Fig. 1: Evolución de costo de celdas fotovoltaicas a través de los años. Fuente: Bloomberg New Energy Finance, 2020.

materiales, al ser expuestos a la luz del sol, absorben fotones y liberan electrones, logrando generar corriente eléctrica continua de intensidad variable que luego debe ser transformada en corriente alterna para el caso de uso residencial.

Desde el descubrimiento del efecto fotovoltaico en 1839 por el Físico francés Alexandre-Edmond Becquerel, cuando al experimentar con pilas electrolíticas observó el incremento de corriente que causaba en ellas la exposición solar, han existido diversos avances tecnológicos en esta materia: desde el punto de vista funcional, la primera celda fotovoltaica construida, por Charles Fritts en 1883, poseía una eficiencia de un 1%, lo que las hacía imposibles de aplicar en la realidad. Posteriormente, entre 1946 y 1954 se crean y patentan las primeras celdas a base de Silicio, a partir de este momento comenzó la creación de paneles solares, y, recién desde la década de 1970, empiezan las aplicaciones reales para consumo humano, al reducir considerablemente los costos por vatio, disminuyendo exponencialmente a través de los años, desde USD \$100 en 1970 hasta USD \$0,30 en 2015 (Fig. 1).

Dado el avance tecnológico de los últimos años, hoy existen sistemas PV que no requieren de una implementación aislada, como un artefacto, permitiendo su integración total en edificaciones. Los sistemas BIPV son piezas o sistemas para la construcción que, además generan electricidad a partir de la energía solar, reemplazan a los materiales de construcción convencionales, siendo, por tanto, sistemas de construcción multifuncionales. Existe una amplia gama de tipologías BIPV, desde las que buscan la eficiencia máxima de las celdas, hasta las que, a costa de perder eficiencia, bajan la cantidad

Tabla 1: Comparación de sistemas PV tradicionales a base de Silicio en tres diferentes formas compositivas. Fuente: Elaboración propia.

Materialidad	Descripción	Efectividad
<p>Silicio monocristalino</p> 	Corresponden a aquellas provenientes de un único cristal de silicio, convirtiéndolas en celdas más caras de producir, pero con una mayor eficiencia para convertir la luz solar a energía eléctrica.	17% aproximadamente
<p>Silicio policristalino</p> 	Es aquel que resulta de la fundición del material y que posee los cristales orientados en distintas direcciones, por lo que la eficacia de la penetración y captación solar se ve afectada. Resulta un producto más económico de producir, pero con una efectividad ligeramente menor.	15% aproximadamente
<p>Silicio amorfo</p> 	Resultante de la aplicación de una fina capa de silicio sobre una superficie, pudiendo ser esta de diferentes materiales, permitiendo que estas sean más flexibles, con mayor posibilidad de aplicaciones y donde los costes de producción son aún menores. Sin embargo, su eficiencia es mucho menor, siendo una opción evidentemente menos eficiente.	5% aproximadamente

de silicio, buscan ganar o perder rigidez o transparencias con fines estéticos. En este sentido, se pueden realizar dos métodos de agrupamiento en dichos sistemas: por materialidad o por funcionalidad. El primero de ellos hace relación a los materiales que conforman a los sistemas, donde el más común en el mercado es el Silicio, diferenciado en tres tipologías fundamentales: el silicio monocristalino, el silicio policristalino y el silicio amorfo (Tabla 1) y son los de mayor relación costo-efectividad. Sin embargo, hoy en día existe una amplia variedad de materiales PV, como el compuesto Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS), Tedlar o, incluso, compuestos orgánicos (Fig. 2), con porcentajes de efectividad cada vez superiores.

Por otro lado, también se puede hablar de las tipologías existentes dependiendo de la funcionalidad, entre una amplia gama según el proveedor como paneles sin marco, vidrios, baldosas, módulos flexibles, textiles, pavimentos, tejas, zócalos, aleros, domos, marquesinas o barandas (Solar Innova, 2021), e, incluso, nuevas tecnologías en spray. Hoy en día, empresas como Onyx Solar o Solar Innova otorgan servicios de personalización BIPV.

Diversos autores (Hestnes, 1999) (Roberts et al, 2010) (IEA, 2012) han definiciones a este tipo de sistema PV que es integrado en edificaciones, con enfoques similares. Una de las definiciones con mayor aceptación es:

“BIPV: Los módulos son también un componente constructivo del edificio, diseñados específicamente integrar su envolvente. Cumplen con uno o más requisitos exigidos a los cerramientos, a la vez que generan energía” (Cronemberger, 2015, p. 39)

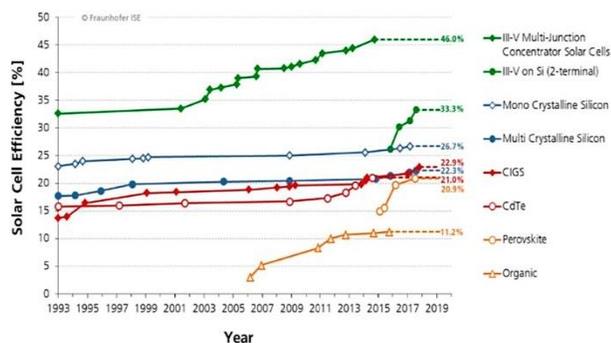


Fig. 2: Evolución de la eficiencia energética de células fotovoltaicas. Fuente: Bloomberg New Energy Finance, 2020.

Actualmente, en el mercado se encuentra una gran variedad de módulos y productos destinados específicamente a ser utilizados como componentes constructivos integrados y aplicados a edificios (Cerón, y otros, 2013). También, es posible personalizarlos y es común la adopción de soluciones hechas a medida proporcionadas por las



Fig. 3: Esquema de aplicaciones BIPV en edificaciones. Fuente: SUPSI, 2020.

empresas dedicadas a ello. Son variadas las posibilidades que permiten modificar la apariencia de los componentes, desde la forma y dimensión de las células, la estructura morfológica de los módulos, los colores y las texturas, la transparencia y los sistemas de integración a la estructura. En particular, el manual para edificios solares 2020 realizado por La *University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland* (SUPSI) en conjunto con el Becquerel Institute detalla 6 grandes grupos de sistemas (Fig. 3) aplicables en las distintas zonas de la envolvente de una edificación. Además, se realizó un análisis de diferentes proveedores, certificados

por la Unión Europea y/o SUPSI, de sistemas fotovoltaicos, seleccionando aquellos con mayor cantidad de información posible, para comparar las diferencias morfológicas, funcionales y técnicas de las diversas aplicaciones BIPV del mercado (Tabla 2).

2.3. La vivienda y el cero consumo de energía

A principio de los años 70, el Dr. Elliot Berman junto a la empresa EXXON logran crear celdas solares mucho más baratas, permitiendo la integración de dichos sistemas en instalaciones aisladas de la red eléctrica. Desde este punto, la aplicación solar fotovoltaica en edificaciones comienza a multiplicarse dado que resultaban más rentables económicamente y eficientes en su labor y comienzan a surgir viviendas prototipo como *Solar One* o *Energy Roof*.

El mercado BIPV ha crecido exponencialmente en base a aumentos de eficiencia, alternativas diferentes a los paneles convencionales y precios menores, que han llevado a la ejecución de múltiples proyectos residenciales con sistemas PV y de incentivos gubernamentales que han apuntado a integrar esta tecnología a la vivienda, principalmente en Europa y Norteamérica, donde, como ya se mencionó anteriormente, la radiación solar oscila entre 650 kWh/m² y 1800 kWh/m² anualmente según la latitud, mientras que Santiago se encuentra sobre los 1850 kWh/m² anuales, teniendo una mayor capacidad de aprovechamiento solar que dichas zonas estudiadas. Por esta razón, en

Tabla 2: Tabla comparativa de diferentes sistemas BIPV existentes en el mercado y sus especificaciones técnicas. Fuente: Elaboración propia a partir de fichas de especificaciones técnicas del proveedor.

Características	Modulo flexible eFlex - Flisom (Suiza)	Placa de techo PowerMax 150 - AVANCIS (Alemania)	Teja larga M66-12 - Megasol (Suiza)	Teja corta 8x1 - DAS Energy (Austria)	Vidrio semitraslúcido C-SI - SRL (Chile) /Onix Solar (España)	Vidrio bifacial M340-60-t - Megasol (Suiza)
Potencia (Wp)	165 Wp	150 Wp	66 Wp	36 Wp	102 Wp	340 (+ 5 - 30%)
Tipo de celda	Compuesto CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio)	Compuesto CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio)	Silicio monocristalino	Silicio monocristalino	Silicio Cristalino	HiR n-type bifacial (5 - 35% ganancia bifacial)
Dimensiones (mm)	4571 x 411 mm	1587 x 664 mm	1046 x465 mm	1630 x 400 (Pack 4 tejas)	1000 x 1000 mm	1669 x 999 mm
Peso (Kg) (Kg/m ²)	5,3 Kg	17 Kg	4,8 Kg	3,3 Kg/m ²	14,4 Kg/m ²	29,5 Kg
Transparencia (%)	0%	0%	0%	0%	43%	25%
Eficiencia (%)	20,4%	14,2%	22,5%	22%	18%	24,2%

los últimos 10 años (2010-2020) se incrementó de un 0,5% de aporte total nacional energético mediante sistemas PV a un 12,8%, según datos de la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2020).

2.4. Sistemas BIPV y mansardas

Existen diversos ejemplos internacionales sobre la aplicación de sistemas BIPV planificados y optimizados arquitectónicamente en el sector de la construcción y específicamente en el residencial en la envolvente de las edificaciones, tanto en techumbres como en otras zonas construidas. Por ejemplo, el estudio de Peng (2013) realiza simulaciones y monitoreos BIPV en Hong Kong, arrojando resultados de un 41% de generación de energía eléctrica para el interior de un ambiente de 250 m². Otro ejemplo es el realizado por Peres Suzano e Silva (2021), que buscaba optimizar la envolvente de edificaciones mediante simulaciones y cálculos para la integración de sistemas BIPV en Rio de Janeiro.

“En cuanto con el monitoreo de edificaciones donde se ha instalado sistemas BIPV se tiene el estudio de resultados de dos ejemplos que han utilizado esta tecnología en el Reino Unido, el primero es un edificio educativo, donde se instala BIPV en la fachada y el segundo en el techo de una vivienda unifamiliar. Esta investigación revela anomalías de rendimiento y sugiere cambios en la configuración del sistema para optimizar el rendimiento.” (García, 2015, p. 3)

En el contexto nacional, existe un mercado en expansión de viviendas de segmentos intermedios, entre 1500 y 4000 UF, representando un 28% de la oferta inmobiliaria (CChC, 2021), con diversas tipologías, principalmente en el área de expansión urbana de la Región Metropolitana, destacando comunas como Padre Hurtado (12%), Puente Alto (14%), Colina (19%) y San Bernardo / Buin (31%). Además, la vivienda aislada representa el 38,3% del total nacional (In-Data, 2019), donde también existe un mercado de viviendas que aprovechan la superficie construida de la techumbre para la integración de mansardas, existen incluso soluciones de viviendas tipo como las del programa MINVU “La casa quiero” donde hay prototipos como “Yero” o “EP Loncomilla”, entre otros, que estandarizan dicha tipología, donde la techumbre posee una superficie relevante e inclinación óptima para el aprovechamiento energético solar ante las demandas energéticas residenciales.

En el caso de Chile, el consumo final residencial de energía entre los años 1991 y 2011 aumentó un 122% según datos del Plan de Eficiencia Energética 2020 y tiene una alta dependencia energética, ya que el 70% de energía del país es importada y según el Ministerio de Energía, el año 2011 el sector comercial, público y residencial representó el 26% del consumo total de energía del país. Ante este escenario, en la actualidad existen programas como “Casa Solar” y “Barrio solar”, además de la nueva ley de eficiencia energética (2021) que establece que las viviendas y edificaciones deben cumplir con la calificación energética, apuntando a la carbono neutralidad en 2050.

En este sentido, los sistemas BIPV aplicados a las techumbres de viviendas en la Región Metropolitana pueden acercarse a los planteamientos recientes de organizaciones europeas sobre viviendas cero consumo de energía, prácticas que se han comenzado a implementar en dichas regiones. Así, la Región Metropolitana posee condiciones óptimas para la instalación de sistemas PV como ya ha sido investigado en estudios como el realizado en Concepción (García, 2015) en diversas tipologías de casas con mansarda del sector. Por su parte, el seminario de Patricio Cruz (2019) entrega lineamientos de diseño pasivos para la optimización energética de viviendas calificadas, considerando aspectos como la envolvente y la orientación, el caso de los BIPV como elementos integrados dentro de la planificación arquitectónica se traduce en herramientas de aporte activo energético en la vivienda para sector de la construcción en relación a la disminución de uso de fuentes convencionales no renovables, pero también deben considerarse lineamientos de diseño similares, para la optimización energética. Por último, el seminario Santiago Terol sobre el acceso a la energía distribuida mediante sistemas fotovoltaicos en la Villa Olímpica de Santiago, es un ejemplo nacional de estudio de integración eficiente de paneles fotovoltaicos convencionales en conjuntos residenciales, realizando estudios bibliográficos, normativos y de dimensionamiento fotovoltaico.

3. Métodos

3.1. Visión general

El estudio realizado se basó en tres pasos estructurantes: El análisis y comparación de diversos sistemas BIPV a partir de las fichas técnicas proporcionadas por fabricantes existentes en el

mercado, teniendo en consideración variables morfológicas, materialidades y eficiencia, para hacer una selección de diferentes tipologías posibles de aplicar sobre un caso de estudio específico que cumpliera con los requisitos expuestos. En segunda instancia, se realizó la simulación y estudio de las condiciones climáticas de radiación y la optimización de azimut e inclinación de la techumbre, mediante un caso de estudio, comparaciones de variables y simulaciones computarizadas. Por último, se realizó el cálculo del aporte energético generado mediante el método convencional y el del Mes Crítico, para lograr obtener el porcentaje de aporte real a través de resultados y comprender las consideraciones necesarias de diseño arquitectónico para la implementación eficiente de dicha tecnología.

En primera instancia, dado el estudio del panorama tipológico de viviendas de la zona de expansión del área urbana de Santiago, obtenido del último reporte del sector inmobiliario en el Gran Santiago, otorgado por la Cámara Chilena de la Construcción (CChC) en 2021, se seleccionó una vivienda aislada de dicha zona que cumpliera con cinco requisitos: Ubicación en las comunas del área de expansión urbana de Santiago, dimensiones (acorde en m² al segmento intermedio de la CChC), certificación CEV, información real de consumo energético de los últimos 12 meses (boleta de electricidad) y diseño con mansarda. Dicho caso de estudio fue introducido al programa de modelamiento Rhinoceros 7 para aplicar los sistemas BIPV en 3D y poder utilizar los *plugins* LadyBug, Honeybee y Galapagos de Grasshopper que permitieron conocer en tiempo real y adaptables a condiciones específicas factores de radiación, orientación e inclinación directamente en la superficie inclinada de la techumbre de la mansarda, así como también la posibilidad de realizar optimizaciones matemáticas

Luego de obtener la información correspondiente a sistemas y radiación se calculó el aporte energético



Fig. 4: Vivienda con mansarda tipo “Lingue” seleccionada para estudio de caso. Fuente: Sitio web de Constructora Pocuro, visitado en 2022.

del sistemas BIPV seleccionado, mediante el cálculo convencional de dimensionamiento otorgado por Explorador solar o PVGIS y, también, el de mes crítico, para la posterior comparación de resultados y el porcentaje de aporte energético real. En el último apartado se analizaron los criterios específicos que desde la arquitectura pueden aportar a la integración eficiente, estética y funcional de dichos sistemas.

3.2. Caso de estudio y métodos de simulación

La vivienda seleccionada como caso de estudio debía cumplir con los requisitos expuestos y tener información energética disponible, tanto de la Calificación Energética de Viviendas (CEV) como en gastos mensuales energético posibles de obtener la boleta de electricidad. La casa de tipología “Lingue” y “Nahuen” del condominio “Valles de Peñaflo IV” (Fig. 4) posee todos los requisitos necesarios planteados para ser considerada como referencia para este estudio, pues posee información del consumo eléctrico real de los últimos 13 meses obtenido de una boleta de luz del año 2019 y reflejado en el gráfico de consumos (Fig. 5), además

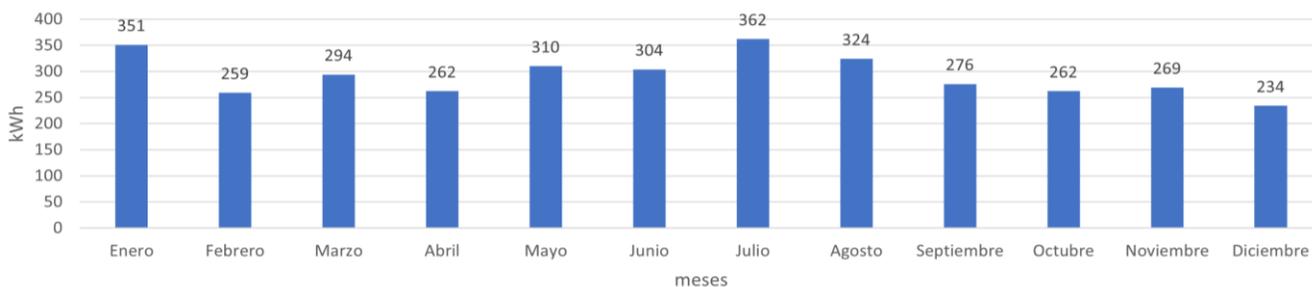


Fig. 5: Consumo eléctrico mensual correspondiente a la vivienda estudiada (2019). Fuente: Boleta eléctrica CGE.

de la calificación energética D (26% de ahorro total) según la Certificación Energética. En cuanto a la tipología, corresponde a una casa aislada perteneciente al segmento intermedio según la CChC, con segundo piso de mansarda y con 90 m² de superficie total (89,4 m² útiles).

Por otro lado, mediante los planos facilitados por la constructora a cargo del proyecto de las viviendas, fue posible modelar la casa con el programa Rhinoceros 7 y así conocer la superficie de cubierta total. Luego, mediante el *Plugin* Grasshopper y las extensiones Ladybug y Honeybee conocer la irradiación y horas de sol diaria en cada una de las superficies inclinadas de cubierta, principalmente del Ala de Mayor Dimensión (AMD) y de la Segunda Ala de Mayor Dimensión (SAMD). Dicho procedimiento fue extraído de lo presentado en la investigación de Anna Peres Suzano en 2021, trabajo realizado en búsqueda de métodos de simulación para la integración BIPV en fachadas de edificios en Brasil, que propone el uso de Rhinoceros debido a que posee una interfaz interactiva y con diversas extensiones, además de modelos tridimensionales adaptables a cualquier circunstancia.

Así, la extensión Grasshopper entrega la posibilidad de integrar información de softwares consolidados en la industria fotovoltaica y de simulación energética como es Energy Plus. Mediante el *plugin* Honeybee, se pueden realizar simulaciones de demanda energética neta, sin embargo, en el presente trabajo se consideró la información real existente de consumos energéticos reflejados en la boleta eléctrica y en el certificado CEV. La información otorgada por la boleta eléctrica corresponde al consumo real de la vivienda solo en cuanto a elementos que consuman electricidad, siendo, en el caso particular del caso de estudio, el consumo generado por iluminación, radiadores de calefacción, ventiladores, electrodomésticos y elementos electrónicos de los cinco habitantes de la vivienda. Por el otro lado, la certificación CEV

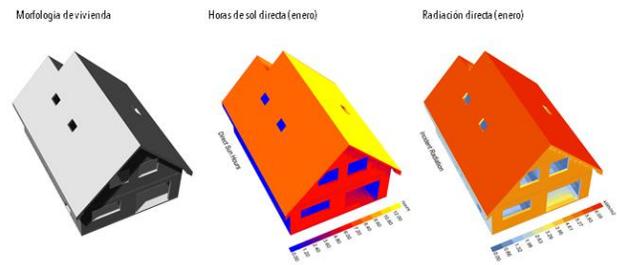


Fig. 6: Parámetros de la extensión Ladybug aplicados en el caso de estudio con información de Energy Plus. Fuente: Elaboración propia.

entrega una simulación de la demanda estimada total de la vivienda, considerando, además de los elementos descritos anteriormente como iluminación, aspectos térmicos de la arquitectura, calefacción y enfriamiento totales.

El *plugin* Ladybug permitió geolocalizar la vivienda y obtener los datos climatológicos locales, mediante Energy Plus, como irradiación y horas solares aplicadas directamente sobre la envolvente de la vivienda y actualizables en tiempo real según parámetros introducidos específicos, como orientación e inclinación (Fig. 6). Galapagos, por otro lado, es un *plugin* de Grasshopper que permite realizar simulaciones volumétricas mediante ecuaciones matemáticas con parámetros específicos introducidos, en búsqueda de la optimización de resultados. Mediante esta extensión, se aplicaron variables de inclinación y orientación (Azimut) en el plano inclinado AMD para que encontrara la configuración óptima que maximizara la radiación recibida por el plano [kWh/m²]. El programa realizó 1000 simulaciones y encontró superficies óptimas de recepción de radiación [KWh/m²], es decir, que lograban la mayor efectividad de los sistemas BIPV a implementar y que permitió compara dichos resultados con los otros dos métodos de diseño y dimensionamiento propuestos para el cálculo de aporte fotovoltaico hacia el NetZero (Fig. 7).

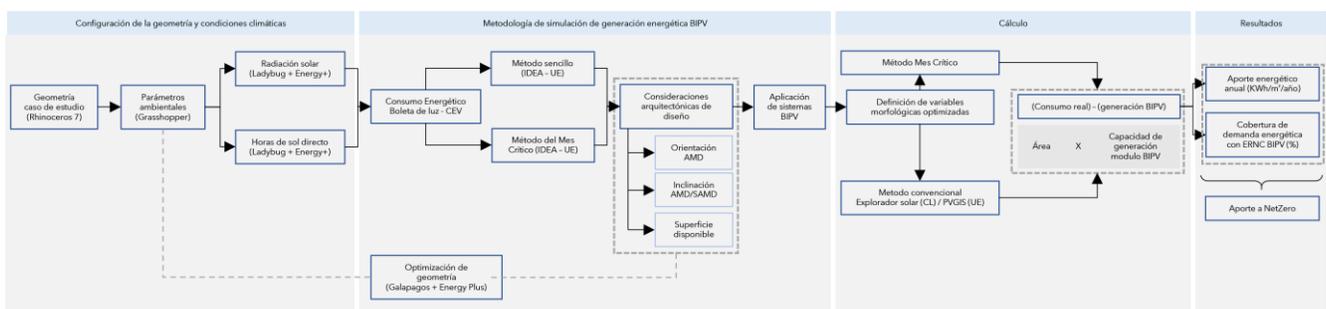


Fig. 7: Esquema de metodología utilizada en la investigación. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Dimensionamiento y aporte energético BIPV

Para realizar el cálculo fotovoltaico de los sistemas BIPV se consideró el consumo eléctrico reflejado en la boleta de la vivienda correspondiente a los 12 meses del año 2019 y la simulación de demanda total energética de la certificación CEV, por lo que el dimensionamiento se debió ajustar a las demandas reales de la vivienda de 5 integrantes, pero también a la proyección de demanda total. Además, se tomaron en consideración dos vías alternativas: el cálculo convencional de dimensionamiento y el denominado cálculo del "Mes Crítico". Como referencia, el estudio realizado por Zalamea, García y Sánchez en 2016 planteaba los conceptos de Ala de Mayor Dimensión (AMD) y Segunda Ala de Mayor Dimensión (SAMD) (Fig. 8) en los que se realizaron comparaciones de radiación recibida por cada una de las superficies según diferentes grados de inclinación y azimut. Luego, se ejecutó una comparación de irradiación según diferentes métodos de cálculo, entre ellos el método convencional según la latitud y el del Mes Crítico.

En el primero de ellos, se consideró el ángulo de inclinación de los sistemas basado en la latitud, 33° ($\pm 5^\circ$) para Santiago de Chile basado en la recomendación de la Asociación Chilena de Energía Solar (ACESOL) mediante el Explorador Solar del Ministerio de Energía, sin embargo, en este artículo solo se consideró como referencia, pues se calculó a partir del ángulo de inclinación preexistente de la techumbre de la vivienda seleccionada como caso de estudio (50°) para ser analizado con cuatro distintos ángulos de azimut: 0° , 45° , 90° y 315° (-45°) respecto a la AMD y así se obtuvo el porcentaje de aporte energético del sistema BIPV a la vivienda en diferentes situaciones. Para dicho proceso, se

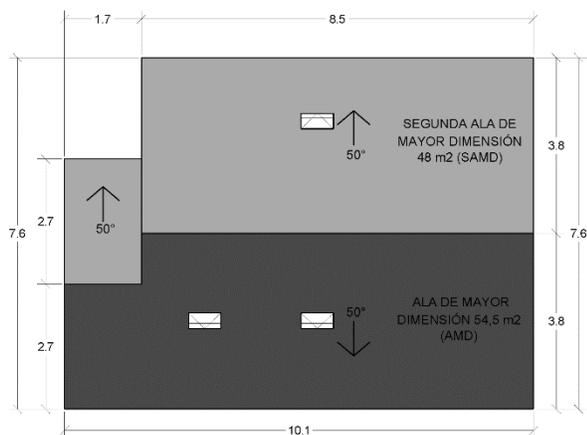


Fig. 8: Superficies de techumbre AMD y SAMD del caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

consideraron dos fuentes de cálculo de dimensionamiento fotovoltaico, PVGIS (UE) y el formulario de generación eléctrica fotovoltaica del Explorador solar (Ministerio de Energía), softwares de simulación online con una interfaz fácil de manipular, que cuentan con datos climáticos georreferenciados, opciones de modificación de Azimut e inclinación, así como también diversos sistemas fotovoltaicos del mercado y la posibilidad de agregar sistemas BIPV personalizados, siendo utilizada esta última opción ingresando los datos específicos de un sistema BIPV seleccionado.

Para efectos de la investigación, se realizó una recopilación de sistemas BIPV específicos otorgados por diversos proveedores certificados por la Comisión Energética Internacional (IEC). En dicha recopilación se analizaron las fichas de especificaciones técnicas y se seleccionó la tipología de teja, dada las condiciones de techumbre del caso de estudio. A partir de cinco proveedores diferentes de tejas PV, se seleccionó aquella que posee la mayor cantidad de información técnica y constructiva. Así, para el estudio realizado, se utilizaron los datos del modelo de teja solar "MATCH Slate M66-12" de la empresa Megasol, recopilados de la ficha de especificaciones técnicas y utilizadas como datos de estudio (Tabla 3).

Tabla 3: Información relevante de propiedades eléctricas y térmicas del sistema BIPV seleccionado. Fuente: Ficha de especificaciones técnicas Megasol.

Propiedades eléctricas/térmicas	Teja larga M66-12
Potencia máxima (Pm)	66 Wp
Voltaje de máxima potencia (Vmp)	6,8 V
Corriente de máxima potencia (Imp)	9,69 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	8,1 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	10,74 A
Eficiencia de celda	22,5%
Coefficiente de temperatura Voc	-0,26 $\frac{\%}{^\circ C}$
Coefficiente de temperatura Isc	0,031 $\frac{\%}{^\circ C}$

Por otro lado, el sistema de dimensionamiento del Mes Crítico permite conocer los requerimientos de orientación y azimut específicos para el mes de menor relación entre consumo energético e irradiación por metro cuadrado. Dicha fórmula plantea aumentar la eficiencia y el porcentaje de aporte energético en los meses más críticos, para así asegurar aportes más equilibrados entre verano e invierno.

En primera instancia, dicho sistema requiere de datos de irradiación media diaria mensual [Wh/m²], obtenida de tablas de irradiación según ángulos de superficie, en este caso, fue elaborada a partir del software Ladybug con datos de Energy Plus. Posteriormente, junto a los datos de consumos mensuales (Fig. 5) se establece una tabla de la relación consumo/irradiación para conocer el mes crítico y la inclinación óptima. Para ello, se seleccionó aquella columna que tuvo el promedio más alto, en este caso corresponde al mes de Julio. Posteriormente, dentro de dicha columna se escogió al que poseía la menor relación entre irradiación y consumo.

Esta información fue recogida con orientación norte, es decir, Azimut 0°, por lo que debe obtenerse diferentes resultados según la rotación de la vivienda respecto al norte. En este caso, la información permitió reconocer los ángulos de inclinación óptimos para la mayor eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en el mes de menor radiación por metro cuadrado, para así generar la mayor cantidad de energía posible en dicha época.

Luego de obtenidos dichos resultados, se aplicó la fórmula para calcular la cantidad de paneles a utilizar, con los datos del modelo de teja solar MATCH Slate M66-12 de la empresa Megasol como ejemplo (Tabla 3).

Ecuación 1

$$N_T = \frac{L_{mdcrit} \text{ [Wh/dia]}}{P_{MPP} \text{ [W]} \times HPS_{crit} \times PR}$$

Donde:

- N_T = Número total de módulos solares necesarios. En caso de sistemas continuos corresponde a m² de PV instalados.
- L_{mdcrit} = El consumo medio diario mensual para el mes crítico. Obtenido de tabla de consumo o, en este caso, de la boleta de electricidad.
- P_{MPP} = Potencia *peak* del módulo en condiciones estándar. Obtenido de ficha de especificaciones técnicas.
- HPS_{crit} = Horas de sol *peak* del mes crítico. Obtenido de tablas de radiación o, en este caso, del software Ladybug + Energy Plus. Es decir: coeficiente [consumo/radiación] del Angulo del mes crítico /1000 W/m² = HPS.
- PR = Factor global de funcionamiento que varía entre 0,65 y 0,9. Obtenida de ficha de

especificaciones técnicas o 0,9 de aplicación por defecto.

El resultado obtenido mediante ambos métodos de dimensionamiento corresponde a la cantidad de paneles necesarios para suplir la demanda eléctrica correspondiente al consumo total o al mes desfavorables respectivamente, Posteriormente se debe recurrir a la ficha técnica del fabricante para calcular la superficie requerida total a partir de las dimensiones del módulo si posee forma definida, en caso de ser personalizadas se recurre a dichas dimensiones o medidas en m².

Ecuación 2

$$D_{TR} \text{ [m}^2\text{]} = N_T \times D_{mod} \text{ (m}^2\text{)}$$

Donde:

- D_{TR} = Dimensión total requerida [m²] de techumbre para cubrir el consumo energético promedio diario del mes crítico.
- D_{mod} = Dimensión del módulo [m²]. Obtenido de la ficha de especificaciones técnicas.

Esta metodología corresponde a una vía alternativa propuesta en diversas investigaciones de dimensionamiento fotovoltaico como el realizado por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España (Alonso Abella, 2012), y por diversos fabricantes PV como Sunfields, proveedor del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea. Sin embargo, el presente trabajo solo abarcó los cálculos referentes a dicho dimensionamiento, sin considerar otros cálculos como el de baterías, cableado o del inversor requerido, pues la finalidad reside en la reinterpretación de la techumbre como elemento constructivo capaz de generar energía que aporte a reducir los consumos de energías convencionales no renovables en la vivienda.

Luego de reconocer el aporte a los consumos eléctricos de la vivienda reflejados en la boleta eléctrica, se calculará, respecto de los datos de la simulación de consumos energéticos totales, que considera sistemas activos y pasivos, desde la arquitectura hasta aparatos y sistemas de calefacción/enfriamiento. En el caso de la vivienda seleccionada, la certificación CEV estima un consumo energético de 236,4 KWh/m² al año en una

vivienda de 89,4 m² de superficie, a ser cubierto con ERNC fotovoltaica.

Ecuación 3

$$SC_T \text{ [kWh]} = C_E \text{ [kWh/m}^2\text{/año]} \times ST_V \text{ [m}^2\text{]}$$

Donde:

- SC_T = Simulación de consumo total de la vivienda.
- C_E = Consumo energético estimado de la vivienda por m².
- ST_V = Superficie total de la vivienda.

Posteriormente, se dividió la producción energética total por el número de tejas obtenido y se multiplicó por la cantidad máxima de tejas que la techumbre, dada la superficie existente disponible, permitía.

Ecuación 4

$$P_{MT} \text{ [KWh/m}^2\text{/año]} = P_T \text{ [KWh/año]} \times C_{TT}$$

Donde:

- P_{MT} = Producción máxima posible de generar con la superficie de techumbre.
- P_T = Producción total por teja.
- C_{TT} = Cantidad total de tejas que caben en el ala seleccionada.

Mediante dichos cálculos fue posible conocer el aporte a las demandas totales de energía simuladas en la calificación energética de la vivienda, además de las diferentes posibilidades de planificación de techumbre para el dimensionamiento fotovoltaico, obteniendo datos sobre aporte energético y, junto con las fichas técnicas de instalación, sobre lineamientos de diseño para la construcción de viviendas con mansardas óptimas para la instalación de captación de energía solar activa.

4. Resultados

4.1. Cálculos de dimensionamiento

En primera instancia, se realizó el cálculo correspondiente a la formula simple de optimización anual utilizada por PVGIS (UE) y Explorador solar del Ministerio de Energía (MinEnergía). Para ello, se consideraron tres factores principales, el consumo mensual de la vivienda, la orientación y la inclinación. El primero de ellos se obtuvo de la boleta eléctrica de la vivienda, la inclinación utilizada fue la misma que posee la casa (50°) y la orientación (Azimut) fue analizada en 0°, 45°, 90° y 315° (Fig. 9). Dicha herramienta fue analizada con los datos de la Teja solar MATCH Slate M66-12 de la empresa Megasol mediante los parámetros específicos (Tabla 3).

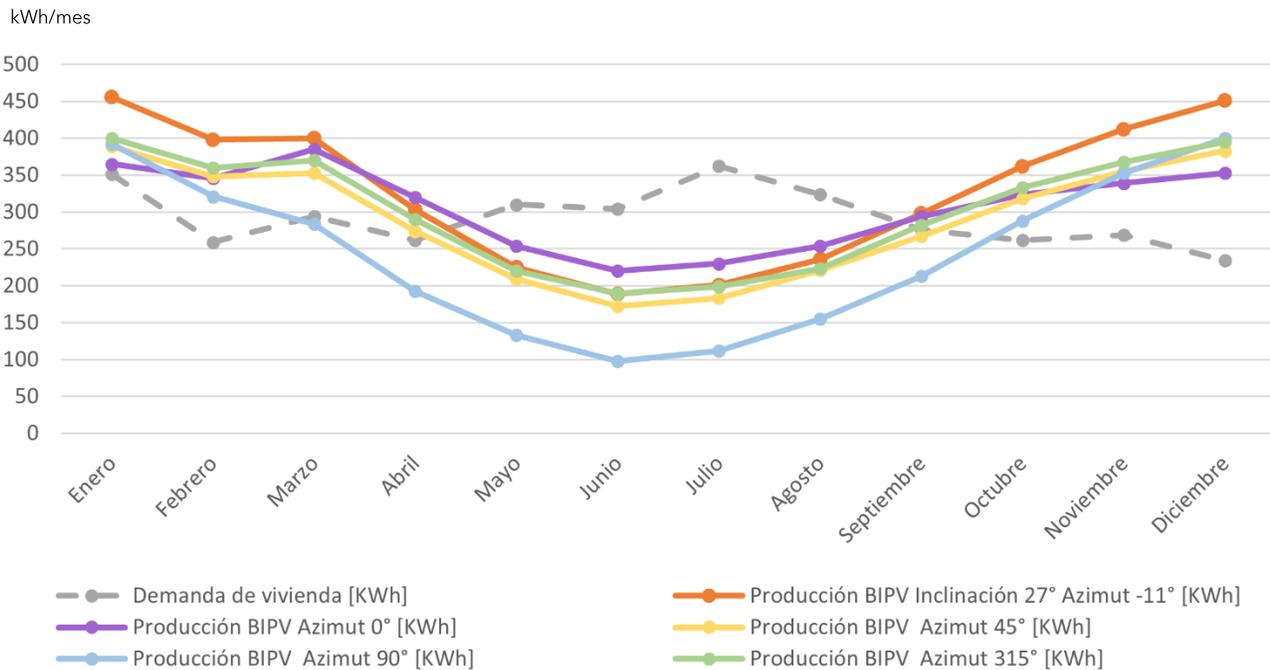


Fig. 9: Gráfico de aporte energético de teja solar según ángulos de azimut en contraste con el consumo eléctrico de la boleta de electricidad de 2019. Fuente: Elaboración propia.

Dicha información muestra que la inclinación óptima para dicha vivienda corresponde a aquella con un Azimut entre -45 y 0° respecto al norte, en este último con una producción total de 3684 KWh anual, un 5% superior al consumo de la vivienda durante el año de estudio (3507 KWh), siendo un 34% superior en diciembre, pero un 36,5% menor que el consumo durante julio, el mes crítico de invierno. Dicha información, validada en la plataforma Explorador solar, expone que un Azimut de 45° representa un 6% de pérdida productiva, mientras que 90° representa un 20% y 315° un 2% de pérdida respecto a 0° de orientación norte. Dicha información muestra, además, que en los meses de invierno existe una mayor diferencia de producción mientras mayor sea la lejanía respecto al norte. Dichos resultados fueron contrastados, además, con el sistema de optimización de inclinación y azimut geolocalizado del Explorador Solar del Ministerio de Energía, que, para efectos del caso de estudio, sugiere 27° de inclinación y -11° de azimut, generando un 6% extra de energía que la de mayor aprovechamiento fotovoltaico encontrada en el caso de estudio mediante este método de dimensionamiento propuesto, validando la conclusión del gráfico que evidencia la mayor eficiencia para orientaciones en -45° y 0° de azimut.

La cantidad de módulos de teja larga M66-12 requerida en la vivienda mediante este sistema de dimensionamiento y optimización es de 40 dispositivos fotovoltaicos integrados. Considerando que la dimensión de cada teja BIPV seleccionada es de 1046 mm x 465 mm, se calcula la superficie de techumbre requerida mínima para cubrir el 100% de los consumos reflejadas en la boleta de electricidad del año analizado (Ecuación 2).

$$40 \text{ módulos} \times (1,046 \text{ m} \times 0,465 \text{ m}) = 19,5 \text{ m}^2$$

Por tanto, si la superficie disponible de techumbre en AMD es de 54,5 m² y la de SAMD es de 48m², el porcentaje de ocupación necesario es de 36% y un 41%, respectivamente, para cubrir dicho consumo eléctrico.

Por otro lado, para el cálculo de dimensionamiento basado en el método del Mes Crítico fue analizado el caso base de estudio, con inclinación de techumbre 50° y azimut 0°. Así, se utilizó la tabla de irradiación mensual sobre ángulos inclinados y la tabla de consumo diario promedio mensual [Wh/día] (Fig. 5) para generar la tabla de cocientes consumo/radiación (Tabla 2).

Para obtener el mes crítico se seleccionó aquel que posee el promedio más alto, pues esto significa que existe una mayor cantidad de consumo en relación a la irradiación total. Luego, se seleccionó, dentro de julio, aquella inclinación que tuviera el cociente menor, pues, por el contrario, es aquel que mayor cantidad de radiación recibe en comparación al consumo del mes, en este caso 50° y 60° poseen factores similares. Para el cálculo de ambos dimensionamientos se recurrió a la ecuación de dimensionamiento (Ecuación 1). En el caso del cálculo de 60° correspondería a la siguiente ecuación:

$$N_T = \frac{11677 \text{ [Wh/día]}}{66 \text{ [W]} \times 4,25 \times 0,9} = 46,25$$

Para el caso de 50°:

$$N_T = \frac{11677 \text{ [Wh/día]}}{66 \text{ [W]} \times 4,22 \times 0,9} = 46,58$$

Tabla 2: Tabla comparativa de diferentes sistemas BIPV existentes en el mercado y sus especificaciones técnicas. Fuente: Elaboración propia a partir de fichas de especificaciones técnicas del proveedor.

Inclinación	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Noviembre	Diciembre
10°	1,37	1,20	1,44	1,86	2,79	3,75	3,80	2,76	1,75	1,29	1,21	0,89
20°	1,40	1,20	1,37	1,68	2,47	3,29	3,34	2,51	1,65	1,27	1,23	0,92
30°	1,47	1,22	1,34	1,58	2,26	2,99	3,05	2,36	1,60	1,28	1,28	0,97
40°	1,58	1,29	1,35	1,52	2,14	2,81	2,86	2,27	1,59	1,32	1,37	1,06
50°	1,75	1,39	1,39	1,51	2,08	2,71	2,77	2,25	1,62	1,40	1,52	1,18
60°	2,01	1,55	1,47	1,53	2,07	2,68	2,75	2,28	1,69	1,52	1,74	1,37
70°	2,42	1,81	1,61	1,60	2,12	2,73	2,80	2,38	1,82	1,72	2,08	1,67
80°	3,07	2,22	1,82	1,73	2,24	2,84	2,93	2,55	2,03	2,02	2,61	2,15
promedio	1,88	1,49	1,47	1,63	2,27	2,98	3,04	2,42	1,72	1,48	1,63	1,28

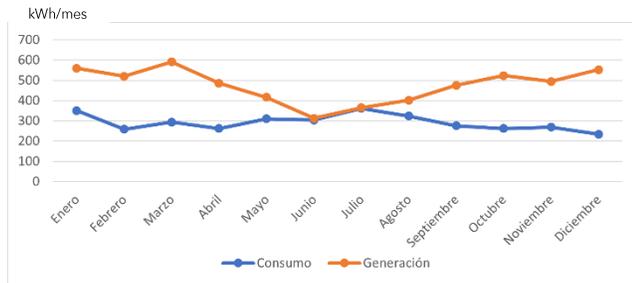


Fig. 10: Generación energética mensual mediante el método del mes crítico en contraste con el consumo eléctrico de 2019. Fuente: Elaboración propia.

Para ambos casos, el dimensionamiento mínimo corresponderá a 47 tejas BIPV. Así, la superficie necesaria de techumbre (Ecuación 2) corresponde a:

$$47 \text{ módulos} \times (1,046 \text{ m} \times 0,465 \text{ m}) = 19,5 \text{ m}^2$$

El porcentaje de ocupación de techumbre para AMD y SAMD corresponde a un 42% y 47,6% respectivamente del total disponible en el caso de estudio para lograr cubrir el total de la demanda del mes crítico (Fig. 10), teniendo en consideración que dicho resultado es el mínimo necesario, sin considerar pérdidas de otros artefactos no contemplados en esta investigación, como inversores o baterías.

Por otro lado, Los resultados obtenidos mediante el la extensión Galapagos del *plugin* Grasshopper, reportó resultados similares de orientación e inclinación. De una Simulación automática de poco mas de 1000 configuraciones diferentes (Fig. 11), el programa arrojó conclusiones esperables, pero no resolutivas: las tres configuraciones optimas encontradas corresponden a:

1. Inclinación 34° - azimut -15°
2. Inclinación 43° - azimut -4°
3. Inclinación 48° - azimut -6°

Dicha simulación buscaba matemáticamente la maximización de resultados que entregaran la mayor radiación por m² a partir de variaciones de orientación e inclinación. Sin embargo, dado que es una definición de Grasshopper de elaboración propia, pues no fueron encontradas referencias bibliográficas sobre el calculo especifico, aun posee limitaciones en los resultado, ya que no tomó en

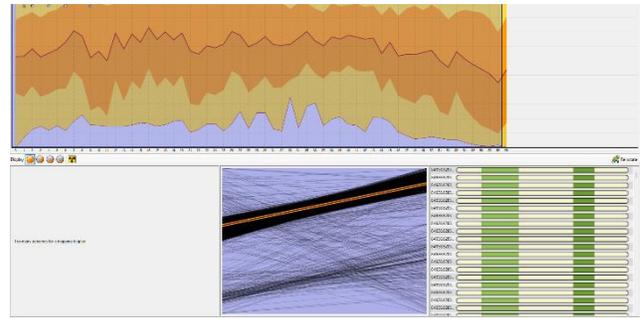


Fig. 11: Gráfico de simulación automática en Galapagos con variables de orientación e inclinación de techumbre AMD. Fuente: Elaboración propia.

consideración todas las configuraciones posibles al poseer un límite de tiempo máximo de trabajo o considerar otras configuraciones extremas de las variables señaladas.

4.2. Contribución BIPV a demanda energética total CEV

Luego de haber reconocido el aporte a los consumos eléctricos específicos, es posible hacer la medición respecto a la estimación de consumos energéticos totales de la vivienda, expuestas en el documento de calificación energética de la vivienda (CEV) otorgado por el Minvu. En dicho documento se menciona el consumo por m² de la vivienda analizada bajo parámetros de arquitectura y equipos de consumo energético, tomando en cuenta demandas de calefacción, enfriamiento y sistemas eléctricos. La vivienda estudiada tiene 236,4 [KWh/m²/año] de consumo energético estimado total, si posee 89,4 m², entonces (Ecuación 3):

$$236,4 \text{ [KWh/m}^2\text{/año]} \times 89,4 \text{ [m}^2\text{]} = 21134 \text{ [KWh/año]}$$

Ante este escenario, el faldón AMD, que dispone de 54,5 m² de superficie total, sin considerar las ventanas, dispone de un máximo de instalación de 110 tejas solares analizadas.

En condiciones de inclinación 50° y azimut 0°:

$$3688 \text{ [KWh/año]} / 40 \text{ tejas} = 92,2 \text{ [KWh/año]} \text{ por teja}$$

Es decir (Ecuación 4):

$$92,2 \text{ [KWh/año]} \times 110 \text{ tejas} = 10142 \text{ [KWh/m}^2\text{/año]}$$

Este resultado representa el 48% de la estimación de consumo energético total de arquitectura y equipos en la vivienda. Dicho porcentaje no considera la implementación de sistemas BIPV vidriados en los tragaluz de la techumbre u otras superficies inclinadas. Por otro lado, se evidencia un aumento porcentual mínimo en la combinación optimizada por el Explorador solar de inclinación 27° y azimut -11°, representando un incremento de un 2%.

5. Conclusiones

Los resultados expuestos reflejan que la planificación y el diseño arquitectónico de la vivienda juega un rol relevante, no solo en la reducción pasiva de los consumos energéticos de energías no renovables, si no también dentro de la integración eficiente de ERNC en la vivienda mediante sistemas activos, donde la mansarda, tipología utilizada principalmente para el aumento de superficie útil habitable, tiene también la capacidad de aportar energía fotovoltaica mediante los sistemas BIPV.

La metodología planteada permitió reconocer diferentes vías para satisfacer los requerimientos NetZero mediante la simulación y dimensionamiento fotovoltaico BIPV. El *Software* Rhinoceros 7 y las extensiones de Ladybug y Honeybee se transforman en una forma interactiva e intuitiva de realizar cálculos, condiciones específicas y adaptables, permite además visualizar las decisiones de diseño arquitectónico y el impacto sobre la generación energética PV en tiempo real. Por otro lado, Galapagos, finalmente, puede ser una herramienta útil de optimización volumétrica en las fases iniciales del diseño arquitectónico de viviendas u otras edificaciones con sistema PV, sin embargo, es más compleja de utilizar e introducir variables, siendo necesario manejar la extensión en detalle y optimizar la definición “.gh” de Grasshopper para lograr resultados totalmente efectivos.

Además, a través del caso de estudio se logró comprobar que la tecnología BIPV efectivamente logra cubrir en un 100% los consumos eléctricos requeridos reflejados en el análisis de los cobros mensuales. De manera distinta, para el caso de los consumos totales estimados de la certificación CEV, que contempla contextos energéticos de calefacción, enfriamiento y electricidad, pese a no lograr cubrir el 60% propuesto como meta inicial de la demanda estimada total (Arquitectura + equipos) del caso de estudio, se logró contribuir un 48% del

total. Este resultado, pese a no ser el esperado, permite considerar la posibilidad de integración de otros sistemas fotovoltaicos, como vidrios PV en los tragaluz del caso de estudio, la utilización de otro sistema BIPV de mayor eficiencia de celdas o la optimización de la superficie total de techumbre utilizable (m²), sin embargo, esta última vía debe ser considerada desde la planificación arquitectónica previa a la construcción.

Así, el análisis permitió reconocer la relevancia de la planificación arquitectónica para la eficiencia PV, a través de tres factores principales; la orientación (azimut) de la AMD o la AMD, reconociendo que la orientación norte, o cercana al norte, de alguna de estos faldones puede aumentar la eficiencia de las celdas en un 20% o 30% logrando condiciones óptimas. Por otro lado, la inclinación de la techumbre es otro aspecto relevante dentro de la planificación previa, no solo para la habitabilidad de la mansarda y el espacio disponible bajo los planos inclinados, sino también para la eficiencia de los sistemas PV. El estudio realizado demuestra hasta un 30% de diferencia de recepción y captación de radiación solar en superficies inclinadas, demostrando condiciones favorables de optimización entre 30° y 50°. Así también, la maximización de la superficie total de recolección solar del ala a utilizar también constituye un factor fundamental en el diseño arquitectónico de la vivienda con sistemas BIPV, pues, a mayor superficie, mayor capacidad de recolección solar, ya sea mediante las tejas analizadas, o superficies traslucidas, paneles opacos, sistemas flexibles u otras tipologías descritas en el panorama BIPV.

Los sistemas BIPV reemplazan a los materiales y métodos de construcción convencionales de mansarda y techumbre, esto convierte a la tecnología en parte constitutiva de la vivienda, dejando de ser considerado como un objeto aislado y reemplazable, sin embargo, esto constituye también contemplaciones estéticas y técnicas, desde el diseño y apariencia hasta los cálculos estructurales y los métodos de construcción. En el caso de las tejas solares (Fig. 12), mediante la ficha



Fig. 12: Esquema constructivo de tejas solares analizadas. Fuente: Guía de construcción de Megasol.

de especificaciones constructivas del proveedor, se deben considerar aspectos como entramados específicos soportantes de las tejas, separación mínima entre superficie interior de aislación de la mansarda con el sistema, para el flujo de aire y cableado específico.

El aporte obtenido de los cálculos realizados supone una vía de ejecución de los objetivos planteados a nivel local y global sobre NetZero y nZEB, pues el aprovechamiento energético y funcional de la techumbre la transforma en una fuente energética que logra cumplir con las demandas de las viviendas mediante ERNC, siendo, además, una tecnología en constante aumento de eficiencia y reducción de costos. La metodología expuesta evidencia que la tecnología BIPV, pese a que los costos aún son elevados, es eficiente en el aporte energético generado a la vivienda para el autoconsumo, transforma a la vivienda en algo más que un espacio habitable, lo convierte en una edificación capaz de responder y satisfacer a las necesidades actuales de los habitantes y del cambio climático, aportando a la calidad de vida y los planteamientos NetZero y nZEB. desde las fases iniciales de planificación, por lo que comienza a ser relevante la integración de dichas variables a la arquitectura contemporánea.

Por último, aún existen diversas situaciones por analizar, comenzando por el campo de viabilidad funcional energética, parece relevante aplicar dicha tecnología a otras escalas de la edificación en el contexto nacional, como edificios, ya sean residenciales, de oficinas, comerciales u otros. También es relevancia reconocer el aporte energético posible de obtener en otras regiones del país, bajo condiciones climáticas y espaciales diferentes. Y, finalmente, analizar la factibilidad en cuanto a costos, reconociendo que la tecnología sigue siendo costosa al día de hoy, pero con claras tendencias de disminución de costos y aumento de eficiencia.

Agradecimientos

A la profesora Jeannette Roldán, por orientarme y apoyarme en la ejecución del tema desarrollado, y al profesor Rodrigo Valdovinos, por ayudarme en la comprensión de los sistema activos de energía solar a través de sus clases.

Referencias

- Abella, M. A. & CIEMAT. (2012). Aproximación al autoconsumo fotovoltaico doméstico. Dialnet, 167.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3906156>
- Alarcón-Castro, J., García, R., Sánchez-Friera, P., & Zapico, A. (2018). Evaluación de Ventanas Fotovoltaicas con Concentradores Solares Luminiscentes para Edificios Cero-energía en Santiago de Chile. *Informes de La Construcción*, 70(550), 255.
<https://doi.org/10.3989/id.58081>
- Asociación chilena de energía solar. (2019). Guía para Usuarios de Fotovoltaica. ACESOL.
- Cámara Chilena de la Construcción (2014). El camino hacia la vivienda sustentable. Obtenido de:
<https://cchc.cl/comunicaciones/noticias/65225-el-camino-hacia-la-vivienda-sustentable>
- Cámara Chilena de la Construcción. (2021). Informe inmobiliario gran Santiago. 6, 27.
<https://www.cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Informe-32-2020-2-Actividad-del-Sector-Inmobiliario-del-Gran-Santiago.pdf>
- Cámara Chilena de la Construcción. (2021). INFORME MACH 58 Macroeconomía y construcción octubre 2021.
- Comisión Nacional de Energía. (2019). Balance nacional de energía - Energía Abierta | Comisión Nacional de Energía. Energía Abierta | Comisión Nacional de Energía - Ministerio de Energía | Gobierno de Chile. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- Corti, P., Bonomo, P., Frontini, F., Macé, P., & Bosch, E. (2020). Building Integrated Photovoltaics : A practical handbook for solar buildings' stakeholders Status Report. 107.
www.solarchitecture.ch,
- Cronemberger, J. (2015, diciembre). Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en bajas latitudes: Estudio del balance energético aplicado a Brasil. Universidad Politécnica de Madrid.
- Cruz, P (2019). Lineamientos de diseño arquitectónico pasivo para disminuir el

- consumo energético de la vivienda calificada. Seminario de investigación, Universidad de Chile.
- Debbarma, M., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2017). Comparison of BIPV and BIPVT: A review. *Resource-Efficient Technologies*, 3(3), 263-271. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.11.013>
- Flández, M. A. (2017). Análisis costo-beneficio al implementar mejoras constructivas térmicas para lograr una mayor calificación energética. Caso de estudio: viviendas nuevas en los segmentos medios de Santiago. Tesis Magister, Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143343>
- García, R. (2014). Mejoramiento ambiental de viviendas urbanas unifamiliares en centro-sur de Chile. (2013). In *Arquitectura y Urbanismo* (Vol. 34, Issue 3).
- Guarachi Flores, J., García Alvarado, R., & Jofré Muñoz, J. (2016). Architectural integration of photovoltaic facade. Solar potential and user perception in the Collective Housing. *Arquitectura y Urbanismo*, XXXVII (2), 33-48.
- in - Data SpA. Et al (2019). Informe Final Uso de la Energía Hogares Chile 2018. Diciembre 2019. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf
- International Energy Agency (2021). Net Zero by 2050. In *Net Zero by 2050*. <https://doi.org/10.1787/c8328405-en>
- Lorenzo, J., Sunfields Europe, & APPA. (2022, 1 febrero). Instalación Fotovoltaica Aislada. SunFields. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/calculo-sistema-fotovoltaico-aislado/>
- Maghrabie, H. M., Elsaid, K., Taha, E., Abdelkareem, A., Wilberforce, T., & Olabi, A. G. (2021). Building-integrated photovoltaic / thermal (BIPVT) systems : Applications and challenges. 45(March).
- Ministerio de Energía & In-Data. (2019, diciembre). Informe final de usos de la energía de los hogares de Chile 2018. https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf
- Ministerio de Energía, Deutsche GIZ (2018). BIPV: Paneles fotovoltaicos integrados: introducción al estatus del mercado en Europa.
- Ministerio de Energía. (2021). Ley y Plan de Eficiencia Energética. <https://energia.gob.cl/ley-y-plan-de-eficiencia-energetica#:~:text=La%20ley%20establece%20que%20las,normativa%20aplica%20para%20edificaciones%20nuevas.>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (s. f.). La casa que quiero - Ministerio de Vivienda y Urbanismo. <https://www.minvu.gob.cl/buscar-or-la-casa-que-quiero/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (s. f.). Sector Energía. SNI Chile - Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero de Chile. <https://snichile.mma.gob.cl/principales-resultados/sector-energia/>
- Peres Suzano e Silva, A. C., & Flora Calili, R. (2021). New building simulation method to measure the impact of window-integrated organic photovoltaic cells on energy demand. *Energy and Buildings*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111490>
- Pilar, C., Vera, L., Martínez, C., & Poladian, A. (2019). Estudio de factibilidad de instalación de sistemas fotovoltaicos en viviendas tipo de la ciudad autónoma de buenos aires fe a.
- Pinedo, J., & Lora, C. (2016). Ace 30. Hacia Una tipología De Asentamientos Informales, 10(30), 11-30. <https://doi.org/10.5821/ace.11.30.3979>.
- Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI), & Becquerel Institute. (2020). Building Integrated Photovoltaics : A practical handbook for solar buildings' stakeholders Status Report. 107. www.solararchitecture.ch,
- Silva, J. C. R. (2015). Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en bajas latitudes: estudio del balance energético aplicado a Brasil.
- Terol Calvo, & Roldán Rojas, J. (2018). El acceso a la energía distribuida en conjuntos residenciales : evaluación de sistemas fotovoltaicos comunitarios en la Villa Olímpica. Seminario (arquitecto)--Universidad de Chile, 2018.
- Valencia, L. T., Alvarado, R. G., Bernal, A. N., & Arellano, R. (2015). Mansardas solares por

optimización paramétrica y fabricación digital para viviendas NZE. 317-321.
<https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2015-80041>

Wegertseder, P., Lund, P., J., M., & García, R. (2016, junio). Combining solar resource mapping and energy system integration methods for realistic valuation of urban solar energy potential (N.o 135). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.061>

Zalamea, E., & García Alvarado, R. (2014). Roof characteristics for integrated solar collection in dwellings of Real-Estate developments in Concepción, Chile. *Revista de la construcción*, 13(3), 36-44. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2014000300005>

Zalamea, E., García, R., Sánchez, R. (2016). Influencia de la geometría de techumbres de vivienda unifamiliar para integración de energía solar activa (BIPYTA). *ACE: Architecture, City and Environment = Arquitectura, Ciudad y Entorno*, 10 (30): 57-74, 2016. DOI: 10.5821/ace.11.30.3979. ISSN: 1886-4805.

Anexos

Anexo 1: Modelo caso de estudio (Rhinoceros 7 + definición Grasshopper)

Anexo 2: Fichas técnicas de productos fotovoltaicos comparados

Anexo 3: Reporte de resultados detallados Explorador solar

Todos los anexos están disponibles en la carpeta web:

<https://drive.google.com/drive/folders/1BTLfy717RxFzJ-ewslZtd7LGvSPhAEGJ?usp=sharing>