

DISEÑO DE EDIFICIOS DE ENERGÍA POSITIVA. AUTOSUFICIENCIA ENERGÉTICA E INTEGRACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

XABIER BARRUTIETA BASURKO

Doctor arquitecto

Este documento es un resumen de la tesis: "Diseño de edificios de energía positiva. autosuficiencia energética e integración solar fotovoltaica.", dirigida por los profesores Rufino Javier Hernandez Minguillón y María Olatz Irulegi Garmendia, y defendida el 31 de enero de 2025 en la Universidad del País Vasco.

enero / febrero 2025

Directores:	José Fariña Tojo – Ester Higuera García
Editores:	María Cristina García González – Rafael Córdoba Hernández
Consejo de Redacción:	
Directora:	María Emilia Román López
Comisión ejecutiva:	Agustín Hernández Aja, José Antonio Corraliza Rodríguez, María Cristina García González, Rafael Córdoba Hernández, María Emilia Román López, Eva Álvarez de Andrés, José Fariña Tojo, Ester Higuera, Marian Simón
Vocales:	Isabel Aguirre de Urcola (Escola Galega da Paisaxe Juana de Vega, A Coruña), Pilar Chías Navarro (Univ. Alcalá de Henares, Madrid), José Antonio Corraliza Rodríguez (Univ. Autónoma de Madrid), Alberto Cuchí Burgos (Univ. Politécnica de Cataluña), José Fariña Tojo (Univ. Politécnica de Madrid), Agustín Hernández Aja (Univ. Politécnica de Madrid), Francisco Lamiquiz Daudén (Univ. Politécnica de Madrid), María Asunción Leboeiro Amaro (Univ. Politécnica de Madrid), Rafael Mata Olmo (Univ. Autónoma de Madrid), Luis Andrés Orive (Centro de Estudios Ambientales, Vitoria-Gasteiz), Javier Ruiz Sánchez (Univ. Politécnica de Madrid), Carlos Manuel Valdés (Univ. Carlos III de Madrid)
Consejo Asesor:	José Manuel Atienza Riera (Vicerrector de Estrategia Académica e Internacionalización, Univ. Politécnica de Madrid), Manuel Blanco Lage (Director de la Escuela Superior de Arquitectura, Univ. Politécnica de Madrid), José Miguel Fernández Güell (Director del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, Univ. Politécnica de Madrid), Antonio Elizalde Hevia, Julio García Lanza, Josefina Gómez de Mendoza, José Manuel Naredo, Julián Salas Serrano, Fernando de Terán Troyano, María Ángeles Querol.
Comité Científico:	Antonio Acierno (Univ. Federico II di Napoli, Nápoles, ITALIA), Miguel Ángel Barreto (Univ. Nacional del Nordeste, Resistencia, ARGENTINA), José Luis Carrillo (Univ. Veracruzana, Xalapa, MÉXICO), Luz Alicia Cárdenas Jirón (Univ. de Chile, Santiago de Chile, CHILE), Marta Casares (Univ. Nacional de Tucumán, Tucumán, ARGENTINA), María Castrillo (Univ. de Valladolid, ESPAÑA), Dania Chavarría (Univ. de Costa Rica, COSTA RICA), Mercedes Ferrer (Univ. del Zulia, Maracaibo, VENEZUELA), Fernando Gaja (Univ. Politécnica de Valencia, ESPAÑA), Alberto Gurovich (Univ. de Chile, Santiago de Chile, CHILE), Josué Llanque (Univ. Nacional de S. Agustín, Arequipa, PERÚ), Angelo Mazza (Univ. degli Studi di Napoli, Nápoles, ITALIA), Luis Moya (Univ. Politécnica de Madrid, ESPAÑA), Joan Olmos (Univ. Politécnica de Valencia, ESPAÑA), Ignazia Pinzello (Univ. degli Studi di Palermo, Palermo, ITALIA), Julio Pozueta (Univ. Politécnica de Madrid, ESPAÑA), Alfonso Rivas (Univ. A. Metropolitana Azcapotzalco, Ciudad de México, MÉXICO), Silvia Rossi (Univ. Nacional de Tucumán, ARGENTINA), Adalberto da Silva (Univ. Estadual Paulista, Sao Paulo, BRASIL), Carlos Soberanis (Univ. Francisco Marroquín, Guatemala, GUATEMALA), Carlos A. Torres (Univ. Nacional de Colombia, Bogotá, COLOMBIA), Graziella Trovato (Univ. Politécnica de Madrid, ESPAÑA), Carlos F. Valverde (Univ. Iberoamericana de Puebla, MÉXICO), Fernando N. Winfield (Univ. Veracruzana, Xalapa, MÉXICO), Ana Zazo (Univ. del Bio-Bio, Concepción, CHILE)

Realización y maquetación:

Diseño y maquetación: Mónica del Río

Contacto:

Dirección: Avenida Juan de Herrera 4, 28040, Madrid

Teléfono: 910675090

Email: ciur.urbanismo.arquitectura@upm.es

Web: <https://polired.upm.es/index.php/ciur>

Redes Sociales: @UPM_Urbanismo en Twitter

© COPYRIGHT 2025

XABIER BARRUTIETA BASURKO

Fecha de recepción: 01/01/2025

Fecha de aceptación: 1/02/2025

I.S.S.N. (edición digital): 2174-5099

DOI: 10.20868/ciur.2025.158.5448

Edición bimensual | Año XIII | Núm. 158 | enero-febrero 2025 | 87 págs.

Edita: Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio. ETSAM. UPM.

Revista *Cuadernos de Investigación Urbanística*

Diseño de edificios de energía positiva. Autosuficiencia energética e integración solar fotovoltaica.

Positive Energy Building Design. Energy self-sufficiency and solar photovoltaic integration.

DOI: 10.20868/ciur.2025.158.5448

DESCRIPTORES:

Edificios de Energía Casi Nula / Edificios de Energía Positiva / Autosuficiencia energética / Indicadores para integración fotovoltaica / Optimización del diseño arquitectónico / Diseño de envolvente de edificios / BIPV

KEY WORDS:

Nearly Zero Energy Buildings / Positive Energy Buildings / Energy Self-Sufficiency / Indicators for Photovoltaic Integration / Architectural Design Optimization / Building Envelope Design / BIPV

RESUMEN:

Ante la emergencia climática y la necesidad de transformar el modelo energético, la arquitectura debe asumir un papel activo. La transición hacia edificios que generen su propia energía es clave para abandonar las fuentes fósiles. A nivel urbano, cada edificio debe maximizar el uso de recursos sostenibles y equilibrarlos con su entorno.

El estudio analiza trece edificios de oficinas NZEB y PEB en climas oceánicos con datos reales de uso. A partir de estos datos, se ha creado una base homogénea para evaluar la relación entre parámetros arquitectónicos, climáticos y energéticos. Se identifican ratios clave que vinculan diseño, consumo y generación de energía fotovoltaica, y localización, para culminar proponiendo indicadores aplicables en la fase inicial de diseño de futuros edificios autosuficientes.

La principal contribución de este trabajo es una herramienta de apoyo al diseño que utiliza datos reales pensada para ser aplicada de manera secuencial en la fase inicial de diseño de edificios PEB. Su objetivo es orientar el diseño para la toma de decisiones arquitectónicas efectivas en la integración de sistemas fotovoltaicos, tanto en la cubierta como en la fachada.

La principal conclusión es que la sensibilidad por maximizar la captación de energía solar tiene un impacto evidente en el lenguaje arquitectónico contemporáneo, tanto en las estrategias de diseño como en las ecotecnologías adoptadas, impulsando una evolución tanto en la escala del diseño de los edificios como a escala urbana.

ABSTRACT:

In the face of climate emergency and the need to transform the energy model, architecture must take an active role. The transition to buildings that generate their own energy is key to abandoning fossil fuels. At the urban level, each building must maximize the use of sustainable resources and balance them with its surroundings.

The study analyzes thirteen NZEB and PEB office buildings in oceanic climates with real-life usage data. Based on these data, a homogeneous basis has been created to evaluate the relationship between architectural, climatic, and energy parameters. Key ratios linking design, photovoltaic energy consumption and generation, and location are identified, culminating in the proposal of indicators applicable in the initial design phase of future self-sufficient buildings.

The main contribution of this work is a design support tool that uses real-life data and is designed to be applied sequentially in the initial design phase of PEB buildings. Its objective is to guide the design process for effective architectural decision-making in the integration of photovoltaic systems, both on the roof and the façade.

The main conclusion is that the focus on maximizing solar energy capture has a clear impact on contemporary architectural language, both in design strategies and in the eco-technologies adopted, driving an evolution both at the scale of building design and at the urban scale.

* Xabier Barrutieta Basurko, Arquitecto y Doctor por la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.
Xabier.barrutieta@ehu.eus
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4572-9300> (Xabier Barrutieta Basurko)

CONSULTA DE NÚMEROS ANTERIORES/ACCESS TO PREVIOUS WORKS:

La presente publicación se puede consultar en la siguiente dirección:

This document is available on the following web page:

<https://duyot.aq.upm.es/publicaciones>

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	Recorrido personal y motivación.....	9
2	ARQUITECTURA PARA LA ERA DE LA NEUTRALIDAD CLIMÁTICA.....	18
2.1	Objetivos de sostenibilidad para la arquitectura.....	18
2.1.1	Circularidad.....	19
2.1.2	Robustez.....	20
2.1.3	Medir la sostenibilidad.....	21
2.1.4	Autosuficiencia.....	21
2.1.5	Replicabilidad.....	22
2.2	Europa hacia la neutralidad climática en el 2050.....	23
2.3	Europa hacia los edificios de energía positiva.....	25
2.4	Los edificios de energía positiva y la fotovoltaica integrada.....	30
3	METODOLOGÍA.....	32
3.1	Medir.....	33
3.2	Comparar.....	34
3.3	Estandarizar.....	35
4	Hipótesis y objetivos.....	36
4.1	Hipótesis.....	36
4.2	Objetivos.....	38
5	RESUMEN Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS.....	38
5.1	Edificio Zero: un NZEB de primera generación.....	38
5.2	Análisis de datos reales de funcionamiento.....	43
5.3	Selección de casos de estudio.....	45
5.3.1	Powerhouse Brattørkaia.....	46
5.3.2	Ayuntamiento de Friburgo.....	46
5.3.3	Centro Tecnológico de Aspern IQ.....	47
5.3.4	Windkraft Simonsfeld AG.....	48
5.3.5	ArcheNEO.....	49
5.3.6	Green Office Meudon.....	49
5.3.7	Green Office Rueil.....	50

5.3.8	Arkinova activity generator	51
5.3.9	Pépinère d'entreprises en Montlieu la Garde.	51
5.3.10	Elithis tower	52
5.3.11	Pixel building	53
5.3.12	Edificio ZERO	53
5.3.13	UBA 2019	54
5.3.14	Tablas resumen de datos energéticos y geométricos	55
5.4	Principales sistemas y estrategias de diseño de los PEB.....	56
5.5	Autosuficiencia energética a través de sistemas fotovoltaicos.....	58
5.6	Relaciones entre indicadores energéticos y de diseño arquitectónico.	59
5.7	Propuesta y selección de KPIs	60
5.8	Marco de aplicación práctica al diseño inicial de un PEB.....	63
5.9	Próximas líneas de investigación	71
6	CONCLUSIONES.....	71
6.1	Autosuficiencia energética	72
6.2	Integración solar fotovoltaica	73
6.3	Diseño de los edificios de energía positiva	75
7	BIBLIOGRAFÍA.....	77

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Recorrido personal y motivación

Esta tesis es el fruto de un proceso de investigación de varios años que se ha llevado a cabo junto a una evolución personal, profesional y académica. Los temas de investigación han ido variando en el tiempo, cambiando de escala y escenario, siendo a veces más teóricos o prácticos, pero pivotando sobre unos pilares que fundamentan la investigación de la tesis:

- Medir la sostenibilidad
- Integrar la tecnología y el diseño arquitectónico
- Ser y parecer: nueva técnica y nueva estética

La sensibilidad por la sostenibilidad comenzó con mi trabajo Fin de Carrera, que consistió en unas Termas Urbanas en Stuttgart (Imagen 1 y 2). La idea principal consistía en amplificar el concepto de “impluvium” a todo y crear una plaza de agua al interior edificio. Uno de los objetivos clave fue que todo el conjunto fuera energéticamente autosuficiente mediante el aprovechamiento de la energía geotérmica y la captación solar fotovoltaica en cubierta.



Imagen 1. Maqueta general del Proyecto Fin de Carrera “Termas Urbanas en Stuttgart”, 2003.

Fuente: Xabier Barrutieta

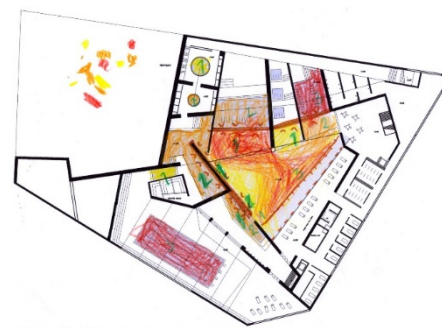


Imagen 2. Dibujo de la planta de cuerpos de agua con gradientes de temperatura del Proyecto Fin de Carrera “Termas Urbanas en Stuttgart”, 2003.

Fuente: Xabier Barrutieta

Posteriormente tutoricé un taller europeo de verano con estudiantes de arquitectura en el EASA (European Architecture Students Assembly) en Kalø, Dinamarca, bajo el tema “Sustainable Living”, que ahondaba en la relación entre lugar, forma y material (Imagen 3). Exploramos la relación entre estos tres elementos tan íntimamente relacionados en la arquitectura bajo la óptica del diseño sostenible, reconociendo las particularidades de un lenguaje intrincado y adaptado en la arquitectura tradicional que sirve para inspirar los diseños más contemporáneos realizados con medios, materiales y sistemas avanzados.

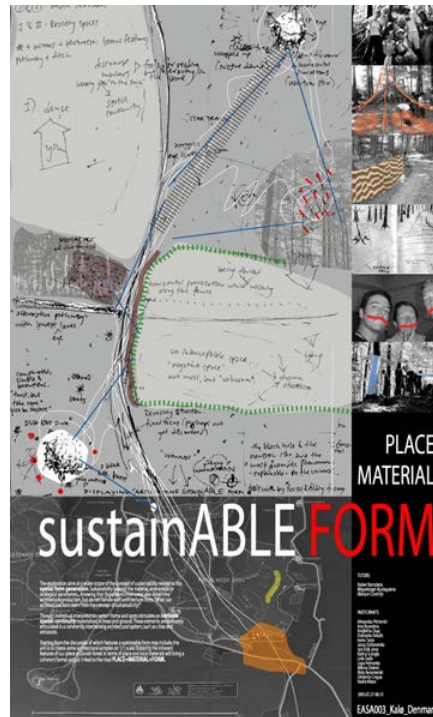


Imagen 3. Poster del taller "SustainABLE FORM" organizado para el EASA de Dinamarca que tuvo como tema general "Sustainable living", 2003.

Fuente: Xabier Barrutieta.

Durante los años 2004 y 2006 tomé parte en el comité científico y en la organización para el Colegio de Arquitectos Vasco-Navarro de varios cursos y congresos internacionales sobre Sostenibilidad, entre los cuales destacan los dos congresos ForumBabel, con el objetivo de perfilar y entender cuáles eran las claves de la sostenibilidad aplicada a la arquitectura, al urbanismo y al paisaje. La doble vertiente de la disciplina, dividida artificialmente entre la parte creativa "arquitectura" y la parte técnica/tecnológica "ingeniería", hacía difícil la investigación contrastada de casos reales de edificios sostenibles que integraran ambos enfoques. Esto se debía a que los edificios que eran reconocidos desde el punto de vista técnico como buenas prácticas no tenían mucho que ver con los que se reconocían como buenos diseños en las revistas de arquitectura.

Desde los trabajos para configurar un panel de ponentes amplio y variado, en lo referente al concepto de sostenibilidad se observaban dos tendencias. Por un lado, arquitect@s e ingenier@s anónimos construían (a menudo autoconstruían) con materiales ecológicos que daban como resultado proyectos poco vistosos con bajo impacto medioambiental. Por otro lado, la arquitectura reconocida como culta apenas

incorporaba referencias de las soluciones medioambientales, y apenas se podían encontrar datos que dieran cuenta de su efectividad.

Las revistas de arquitectura apenas hablaban de manera superficial y poco concreta de sostenibilidad y sus aspectos técnicos. Por el contrario, las publicaciones técnicas especializadas ofrecían datos de energía y sostenibilidad de edificios con un pobre interés arquitectónico. Por lo tanto, mi impresión fue que la literatura especializada en arquitectura se encuentra mayoritariamente segmentada en dos mundos: por un lado, el correspondiente al diseño formal y material de edificios en su vertiente proyectual y espacial, y por otro, la disciplina de los aspectos puramente técnicos, como los constructivos, los energéticos y la medición de indicadores, entre ellos los de sostenibilidad. Por tanto, me surgían algunas preguntas:

- ¿Dónde puedo encontrar los datos técnicos de los proyectos que se publican en las revistas de arquitectura?
- ¿Por qué no existen datos de estos edificios en las revistas especializadas relacionadas con la sostenibilidad y la energía?

En la sostenibilidad aplicada a la arquitectura resultaba necesario conectar y tender puentes entre una visión más técnica y otra más estética, y así poder hablar de una “arquitectura sostenible”. Sentí, por tanto, la necesidad de contribuir a conectar el enfoque técnico de la sostenibilidad y el diseño arquitectónico, ya que ambos puntos de vista deben converger en el mismo proyecto de forma coherente y sinérgica.

La investigación personal siguió con los trabajos para los cursos de Doctorado “Idea forma y materia en Arquitectura” en la ETS de Arquitectura de la Universidad del País Vasco, UPV/ EHU, donde trataba de investigar sobre las claves de la sostenibilidad. Realicé un trabajo de Tesina para la suficiencia investigadora dirigido por Rufino Hernández Minguillón, donde abordé la relación entre aspectos relacionados con factores climáticos, constructivos y de localización unidos al diseño arquitectónico a través de proyectos reales (Imagen 4).

En esta investigación me puse como objetivo aprender de los casos de estudio más interesantes relacionados con la sostenibilidad, el clima y la construcción industrializada de guarderías con el fin de poder aplicarlo a otros diseños reales de arquitectura. Desde la propia búsqueda bibliográfica, tuve la impresión de que el mundo académico se divide en dos ramas: la centrada en los temas más técnicos que podemos resumir en “energía y edificios”, o una visión centrada en el diseño de arquitectura donde las preocupaciones medioambientales son tenidas en cuenta de forma tangencial en el mejor de los casos.

SERVICIO WEB PARA EL ANÁLISIS DE EDIFICIOS EN BASE A
CRITERIOS CLIMÁTICOS Y CONSTRUCTIVOS APLICADO A
PROYECTOS DE GUARDERÍAS Y PARVULARIOS

<http://www41.websamba.com/x2b00/>

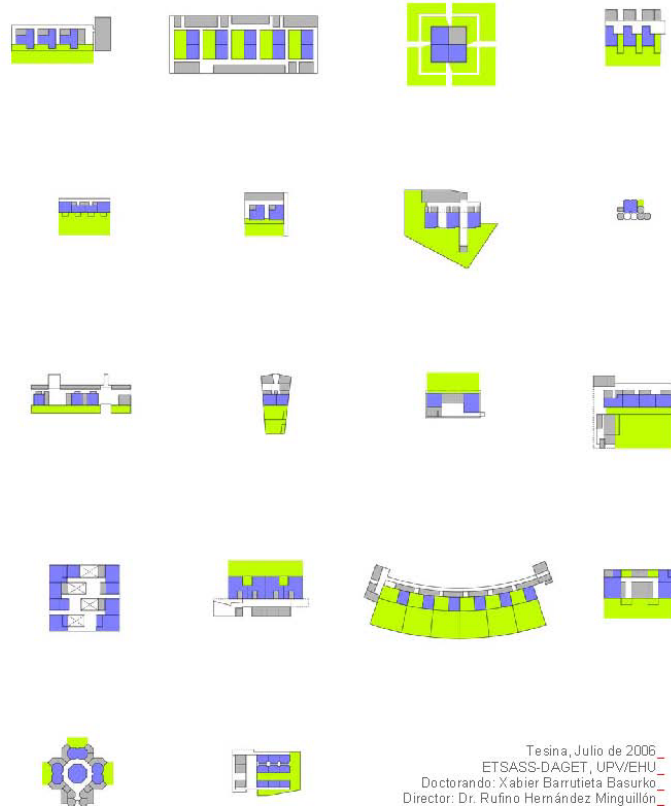


Imagen 4. Tesina de doctorado. Portada ilustrada con los esquemas de plantas a escala de los casos de estudio investigados.

Fuente: Xabier Barrutieta.

El resultado del trabajo de Tesina consistió en una base de datos de edificios de guarderías consultable vía web. Los campos de búsqueda habituales de año, localidad, arquitecto se enriquecieron con datos constructivos, datos referentes a sistemas industrializados, datos climáticos y referencias de materiales que mostraban como resultado diseños de escuelas infantiles incluyendo fichas particulares (Imagen 5). Este trabajo obtuvo una nota de evaluación de 9,5/10 y fue seleccionado para el catálogo Arquia Próxima 2010 como Investigación, formando parte de la exposición realizada (Barrutieta, 2010).

HERRAMIENTA ONLINE PARA EL ANÁLISIS DE EDIFICIOS EN BASE A CRITERIOS CLIMÁTICOS Y CONSTRUCTIVOS APLICADO A PROYECTOS DE GUARDERÍA

0135_School Assembly Hall in Camberwell

Datos generales

Autor:
James Stirling
Situación País:
Camberwell (London), Reino Unido
Año:
1968

Datos climáticos

Latitud y longitud:
51,50N 0,17O
Temperatura media del mes más frío:
3,3 C
Incidencia anual:
975 kWh/m2
Precipitación anual:
800 l/m2

Datos constructivos

Sistema constructivo:
industrializado < 50%
Sistemas de control climático:
captadores solares directos
Tipología:
compacta
Número de plantas:
-



Este edificio es una extensión de una escuela victoriana. Los edificios contiguos presentan gran variedad de tipos y alturas, y en este entorno de caos arquitectónico y barrios bajos superpoblados, se consideró necesario crear una isla verde de césped y espacios abiertos.

La planta está dividida en cuatro partes; las tres partes con cubierta inclinada son subdivisibles y la parte de la cubierta plana alberga los cuartos de servicio.

El edificio se integra en el paisaje mediante terraplenes cubiertos de hierba que se sitúan contra un muro, que hacia el interior es útil para bailes y ejercicios gimnásticos. El edificio es polivalente ya que sirve como lugar de reunión, comedor escolar y puede subdividirse en aulas. Durante los fines de semana se utiliza como centro social del barrio.

Keywords

Extensión, urbano, polivalente, exterior, parque

Bibliografía

Esquema tipológico



Fotos



Imagen 5. Tesina de doctorado. Ejemplo de ficha de un edificio con tipología de guardería indicando parámetros climáticos y constructivos.

Autor: Xabier Barrutieta.

Una posterior etapa profesional de diseño e innovación en urbanismo y territorio me permitió trazar el puente entre las escalas de territorio, urbanismo, la escala intermedia y arquitectura. Esta parte de la investigación la realicé como alumno invitado en la ETS de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid con la profesora Esther Higuera, donde me centré estudiar la sostenibilidad en escala intermedia, e identificar los indicadores más adecuados a los retos de esta escala entre arquitectura y urbanismo. Esta investigación sobre las Células Urbanas la plasmé en un artículo y una ponencia presentados en el congreso internacional SBmad10 (Sustainable Building Madrid 2010), bajo el título “Los indicadores de sostenibilidad a escala microurbana” (Barrutieta, 2010).

También investigué sobre el concepto de escala y tamaño aplicado a elementos urbano-arquitectónicos de carácter híbrido, analicé el grado de complejidad incremental que adquieren los proyectos cuando aumenta su tamaño y las estrategias para crear diseños conjuntos diversos y con mezcla de usos. En el trabajo de investigación profundicé en la conceptualización de las Células Urbanas como una escala que permite abordar muchos aspectos importantes que trascienden el edificio y que enriquecen y vertebran la realidad micro urbana de la ciudad (Imagen 6).

El resultado fue una síntesis del concepto de Células Urbanas en 10 puntos:

- 1- Tráfico urbano perimetral
- 2- Densidad urbana y compacidad
- 3- Mezcla efectiva de usos y actividades
- 4- Fusión entre arquitectura, urbanismo y paisaje
- 5- Autosuficiencia energética
- 6- Adaptación bioclimática conjunta de los edificios
- 7- Movilidad y logística capilar
- 8- Diseño combinado de arquitectura y espacios libres
- 9- Diversidad del paisaje urbano
- 10- Unidad de gestión global

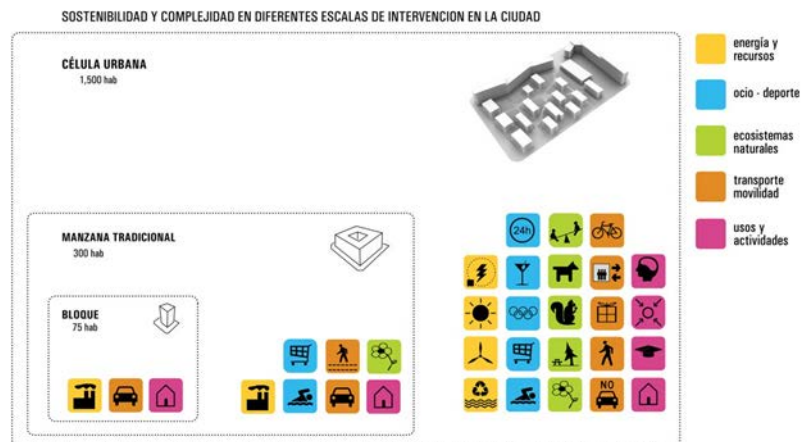


Imagen 6. Esquema indicando la complejidad incremental de las escalas de estudio y el potencial del concepto de Célula Urbana, 2010.

Fuente: Xabier Barrutieta.

Para profundizar en estos aspectos, la metodología de la investigación que utilicé fue al análisis de casos de estudio reales y contrastados de proyectos a escala de células urbanas. Este método de trabajo y contraste con la realidad ha sido una forma recurrente de estudio también en investigaciones posteriores.

Como conclusión de las mencionadas etapas profesionales y académicas se podría decir que los trabajos llevados a cabo me sirvieron tanto para tener una base más sólida de investigación del concepto de sostenibilidad a diferentes escalas, como para estudiar y medir los aspectos de sostenibilidad enfocados al diseño de proyectos y su medición en casos de estudio reales.

Mi siguiente etapa profesional fue clave, porque tuve la oportunidad de liderar un gran proyecto en el que las capacidades desarrolladas anteriormente pudieron cristalizarse en una actuación profesional innovadora.

En el proyecto Orona Ideo en Hernani, donde actué como arquitecto principal y gestor del proyecto desde 2010 a 2014, se materializaron muchas de las ideas previamente exploradas en un proyecto real de varios edificios, diseñado, construido y posteriormente estudiado en su fase operativa.

Este proceso de diseño tuvo una fase previa de estudio del estado del arte y de investigación de edificios singulares tanto en Euskadi como a nivel europeo. Visité varios edificios en uso ya construidos de la mano de personas que los gestionaban en su día a día. Por otro lado, también organicé viajes para visitar otros edificios referentes por su planteamiento sostenible por Dinamarca, Suecia, Alemania, Suiza, Francia y España principalmente, entre los que destacaría los edificios del CIC Energigune en Vitoria-Gasteiz, la Green Lighthouse de Velux en Copenhague, la sede de la compañía Solon en Berlín (Imagen 7), el barrio Sonnenschiff de Friburgo y el campus Novartis en Basilea.



Imagen 7. Cubierta de la sede de la empresa Solon SE, Adlershof, Berlin.
Fuente: Solon SE, Manfred Jarisch.

El objetivo planteado para el proyecto Orona Ideo fue ambicioso desde el inicio: diseñar y llevar a cabo un proyecto referente en sostenibilidad e innovación, para alojar la sede principal y el ecosistema de innovación de la empresa de elevación Orona. El conjunto consta de cuatro edificios, de entre los que destaca el Edificio Zero (Imagen 8).

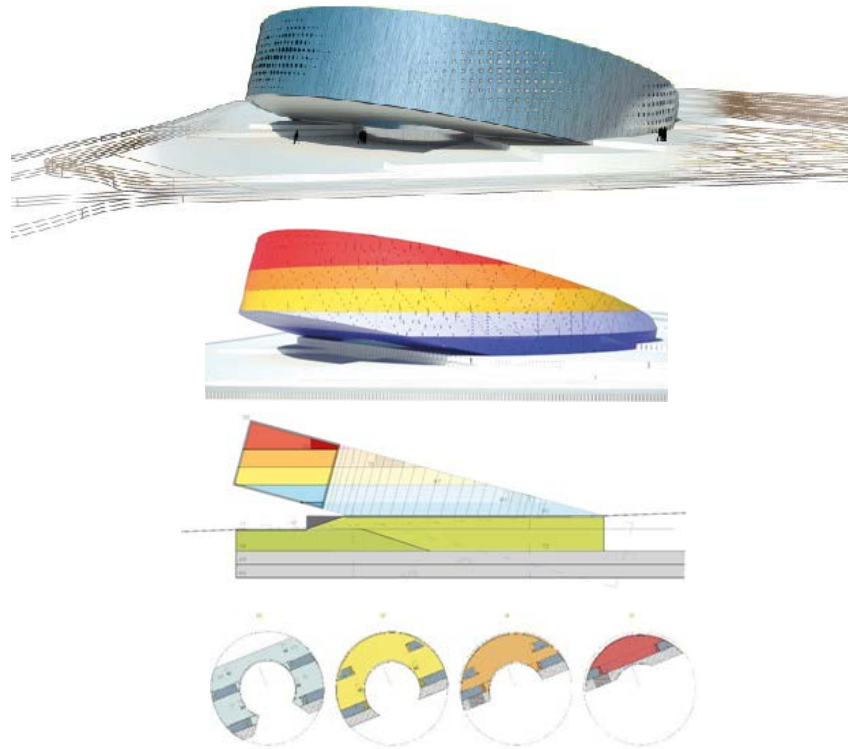


Imagen 8. Croquis iniciales del Edificio Zero indicando volumen total con las diferentes plantas interiores, sección por el eje de simetría, y croquis conceptuales de las plantas altas, 2011.

Fuente: Xabier Barrutieta.

De esta primera investigación de campo obtuve las siguientes lecciones:

- Los mensajes publicitarios sobre los logros en cuanto a sostenibilidad de los edificios corporativos no se corroboran con los datos de uso reales, porque intervienen factores difíciles de simular y predecir.
- Los sellos de sostenibilidad del tipo LEED y BREEAM no garantizan un buen y eficiente funcionamiento del edificio en su fase operativa, y son farragosos de documentar porque exigen certificar por parte del promotor o usuario ciertas acciones que son difíciles de medir y documentar.
- Es vital dar forma al sistema energético del proyecto en base a los recursos naturales y energéticos del lugar, por lo que no existe una receta común de diseño.
- Apenas existen datos del funcionamiento real de los edificios, y raramente siguen criterios comparables con las simulaciones energéticas de proyecto.
- Las publicaciones arquitectónicas no recogen ni relacionan con rigor científico los aspectos de sostenibilidad y clima en los proyectos.

Durante la fase de proyecto y obra del proyecto Orona Ideo realicé una extensa labor de comunicación tratando de subrayar la coherencia entre la base conceptual del proyecto y las soluciones arquitectónicas y técnicas aplicadas en el mismo. Participé en varios Congresos tanto nacionales como internacionales sobre Edificios de Energía Casi Nula compartiendo esta experiencia (G. T. R. S.L., 2016).

Una vez finalizado el proyecto se podría haber acabado ahí mi labor como arquitecto. Sin embargo, sentí la curiosidad y el deber de conocer cómo se comportaba el edificio, si se habían cumplido los objetivos marcados, y de aprender lecciones que pudieran servir de mejora para futuros proyectos.

Esta es la verdadera motivación del proceso de investigación que da cuerpo a la tesis, y que ha dado pie a publicar estos tres artículos en revistas de alto impacto:

Artículo 1: The Zero Building: an exemplary nearly zero energy office building (NZEB) and its potential to become a positive energy building (PEB)

Revista: *Architectural Science Review* 2021

<https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1977607>

Artículo 2: Energy balance and photovoltaic integration in positive energy buildings (PEB). Design and performance in built office case studies.

Revista: *Architectural Science Review* 2022

<https://doi.org/10.1080/00038628.2022.2134091>

Artículo 3: Decision-making framework for positive energy building design through key performance indicators relating geometry, localization, energy and PV system integration.

Revista: *Energy And Buildings – Building and Construction* 2022* (2023)

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113442>

2 ARQUITECTURA PARA LA ERA DE LA NEUTRALIDAD CLIMÁTICA

En una tesitura global de emergencia climática por el aumento de la temperatura en todo el planeta, es absolutamente imprescindible que el diseño de las ciudades y los edificios incorporen adaptaciones e innovaciones que permitan minimizar su impacto medioambiental de forma rápida. El objetivo no es otro que garantizar la calidad de vida de las personas a escala local y global para la generaciones actuales y futuras. Ante este reto colosal, la arquitectura debe responder a su tiempo ofreciendo soluciones viables y escalables.

En el primero de los siguientes subapartados se presentan los principales objetivos de sostenibilidad para la arquitectura y se identifican retos concretos. En el siguiente se centra el foco en la estrategia europea para conseguir la neutralidad climática en 2050 y en las directivas europeas. En el último apartado se estudia el estado del arte del concepto de Edificio de Energía Positiva (PEB en inglés), las definiciones existentes, y su aplicación como futuro estándar europeo.

2.1 Objetivos de sostenibilidad para la arquitectura

Afortunadamente, ya inmersos en la década de los 2020, podemos afirmar que el concepto de sostenibilidad ha dejado de ser una opción para convertirse en un elemento central y vertebrador de la acción humana en el paradigma actual.

El mismo concepto de sostenibilidad ha ido dotándose de contenidos cada más precisos, de horizontes y objetivos concretos, que durante los últimos años han hecho avanzar a muchos sectores productivos y han transformado convenciones sociales a nivel global. Al igual que los seres vivos, el propio concepto evoluciona, muta, se transforma y adquiere nuevos matices que impactan directamente en las acciones y las vías de innovación de la arquitectura y la edificación.

Sostenibilidad es hoy sinónimo de sentido común, de responsabilidad, de respeto por las personas y del medio ambiente, y de un compromiso con el futuro.

El diseño de ese futuro tanto material como digital en nuestro planeta, debe tener estos nuevos horizontes en cuenta, con sus limitaciones y oportunidades, o no será, al menos, como hábitat para la especie humana

La sostenibilidad como concepto aplicado ha ido mutando constantemente, no exento de contradicciones y matices particulares. La transformación que nos toca impulsar hoy, y en la que debemos perseverar desde el campo de la arquitectura y el sector de la construcción, se conseguirá a base del logro de sucesivos objetivos concretos.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son una hoja de ruta global para abordar los desafíos sociales, económicos y ambientales más apremiantes. Los ODS proporcionan un marco integral con 17 objetivos concretos que aborda estas preocupaciones interrelacionadas con una meta común: mejorar la calidad de vida de las personas en el planeta.

En el contexto de la arquitectura, la integración de los ODS es fundamental para alcanzar una práctica sostenible y climáticamente neutral. A través de la arquitectura sostenible se busca minimizar el impacto ambiental de los edificios y promover la equidad social, la prosperidad económica y la resiliencia comunitaria.

Dentro de este marco, actualmente podemos identificar los principales retos sobre los que pivotará la evolución del concepto global de sostenibilidad aplicado a la arquitectura en los próximos años. De los 17 objetivos de desarrollo sostenible caben destacar dos que aplican de forma exclusiva a los ámbitos de la energía y de las ciudades: 7 “Energía asequible y no contaminante” y 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles”.

2.2 Circularidad

Es clave incorporar varios aspectos desde el diseño:

- **Durabilidad.** El mejor diseño es aquel perdura, porque ha demostrado ser técnicamente solvente y ha logrado adaptarse a los tiempos. Haciendo que las construcciones tengan una vida útil más larga se logra un efecto inmediato, que no es más que la ralentización de la velocidad del proceso circular, entendida como la finalización de la vida útil y el comienzo de una nueva. La creación de nuevos modelos de negocio es vital para hacer posible el camino hacia cambio necesario, a la vez que se logre un impacto en la mejora de la calidad de vida de las personas (Imagen 9).
- **Reparabilidad.** Es clave diseñar de forma que tanto los edificios como sus componentes y sistemas se puedan reparar, para que así puedan adaptarse a situaciones futuras sin comprometer su vida útil. Incluso que puedan ser perfectibles, y puedan ir mejorando su rendimiento con el tiempo.
- **Separabilidad.** Se debe conseguir que desde el punto de vista de los materiales sea posible la separación de los materiales con posteridad a su primer uso previsto. Tal y como aboga el concepto Cradle to Cradle (McDonough & Braungart, 2002) , a través de un diseño inteligente debemos aspirar no sólo que los elementos residuales se vuelvan a convertir en materias primas de otros ciclos, sino que, además, estos círculos puedan significar un aumento de valor de los nuevos productos y servicios (downcycling, recycling, upcycling) (Sánchez Moncho).

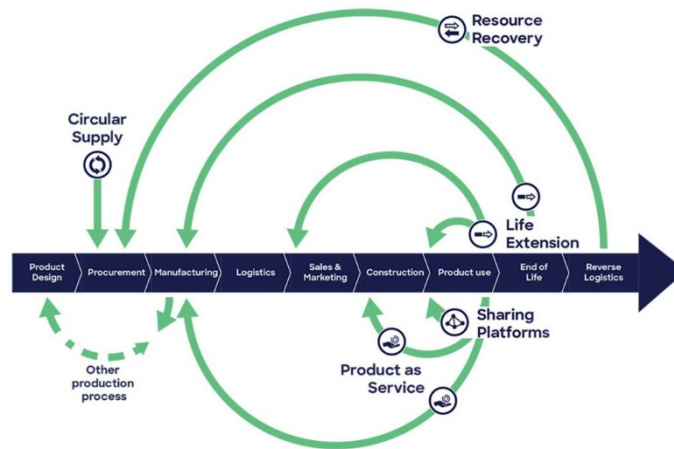


Imagen 9. Esquema indicando nuevos modelos de negocio para la economía circular.

Fuente: *Building a Circular Future* (Kasper, 2018). Autores: 3XN Architects + GXN Innovation

2.2.1 Robustez

El desarrollo de la tecnología está permitiendo llegar a soluciones muy sofisticadas para resolver cualquier situación. Sin embargo, la vida real en los edificios supera normalmente cualquier expectativa o simulación de proyecto, y los verdaderos problemas surgen cuando los edificios teóricamente bien diseñados no son capaces de responder a las necesidades reales de los usuarios. El diseño robusto debe buscar hacer más con menos, incorporando sistemas y productos sencillos de construir, utilizar y mantener, como lo demuestran algunos ejemplos de arquitectura construida. Edificio 2226 en Lustenau, Austria, de Baumschlager Eberle Architekten es un ejemplo de nueva robustez a la vez que de control inteligente. El edificio no tiene sistema de calefacción, ventilación o refrigeración y el flujo de energía se controla mediante software. La envolvente consiste en gruesos muros de ladrillo de 36cm que alojan una cámara interior (Imagen 10).



Imagen 10. Edificio 2226 en Lustenau, Austria, de Baumschlager Eberle Architekten es un ejemplo de nueva robustez a la vez que de control inteligente. El edificio no tiene sistema de calefacción, ventilación o refrigeración y el flujo de energía se controla mediante software. La envolvente consiste en gruesos muros de ladrillo de 36cm que alojan una cámara interior.

Fuente: Baumschlager Eberle Architekten

2.2.2 Medir la sostenibilidad

Nuestra labor como arquitectos debe centrarse en diseñar y medir la eficacia de nuestras decisiones en aquellas escalas en las que podemos tener un impacto, principalmente en la de los edificios y en la escala microurbana. A estas escalas somos capaces de controlar la tecnología que incorporamos y de cuantificar el grado de satisfacción del diseño y de evaluar su grado de sostenibilidad a través de herramientas y sellos medioambientales como LEED, BREEAM, Cradle to Cradle, Passivhaus etc.

Esta tecnología digital permite tanto simular como medir todo tipo de propiedades físicas del proyecto, como las energéticas, térmicas, higrotérmicas, acústicas, y lumínicas entre otras. Sin embargo, no debemos olvidar los parámetros relacionadas con el propio bienestar de los habitantes, que dependen de la propia condición de la percepción humana y resultan mucho más difíciles de medir. Para todo ello, el secreto está en hacer más con menos, utilizando una dosis justa de tecnología (Haselsteiner, 2023).

2.2.3 Autosuficiencia

El desafío actual es que las ciudades y los edificios sean autosuficientes en cuanto a los recursos que demandan en diferentes planos:

- Alimentación. Se busca producir localmente parte de los alimentos que consumen aplicando la filosofía del Km0.
- Residuos. Se debe maximizar la vida útil de los edificios, fomentar la reutilización y revalorizar el patrimonio construido para minimizar la generación de residuos.

- Movilidad. El reto es crear entornos que permitan una reducida demanda, aplicando conceptos como la “Ciudad de los 15 minutos”.
- Energía. El objetivo es que los edificios sean generadores netos de energía dentro del límite de la parcela o del barrio, y que alcancen así la autosuficiencia energética. Para ello será requisito clave aprovechar al máximo las capacidades que la envolvente del edificio ofrece para la generación de energía solar (Imagen 11).

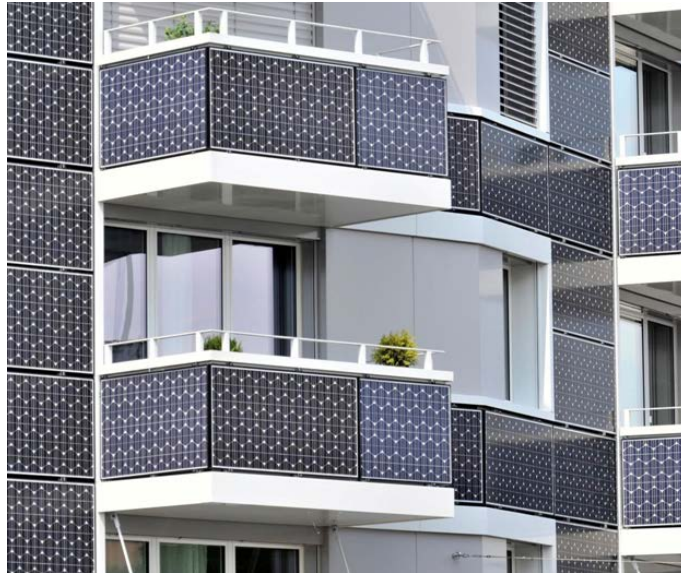


Imagen 11. Renovación y ampliación de un edificio en Alleestrasse Romanshorn, Zurich, con un diseño de energía positiva incorporando elementos BIPV en fachada.

Fuente: <https://www.viriden-partner.ch/plus-nullenergiehaeu-> ser Autor: Viridén-Partner AG

2.2.4 Replicabilidad

Compartir el conocimiento es imprescindible para poder conseguir un impacto real a través de las innovaciones y soluciones que pueden tener mayor éxito. Ante un reto global, las soluciones muy singulares y poco replicables no van a conseguir tener un efecto real, mientras que sí lo harán aquellas que puedan aplicarse de forma sencilla en diversas situaciones. Por tanto, se debe poner el foco en promover soluciones generalizables y replicables, y en generar herramientas sencillas que permitan la toma de decisiones efectivas, ya que sólo así se podrán escalar su aplicación y lograr un efecto a gran escala.

El trabajo de investigación que aquí se presenta se enmarca dentro de esta filosofía de acción que tiene la sostenibilidad como meta, y busca aportar una visión práctica para afrontar los retos descritos desde el diseño de la arquitectura.

2.3 Europa hacia la neutralidad climática en el 2050

La mayor parte de los edificios existentes no son energéticamente eficientes, ya que, en Europa, los códigos de construcción con regulaciones específicas sobre el aislamiento térmico de la envolvente del edificio comenzaron a aparecer después de la década de los setenta del siglo pasado. Esto significa que un alto porcentaje del parque construido actual de la Unión Europea no cumple con ningún tipo de requisito de eficiencia energética: un tercio (35 %) de los edificios de la Unión tiene más de 50 años de antigüedad y más del 40 % se construyó antes de 1960. Casi el 75 % es energéticamente ineficiente, de acuerdo con las normas de construcción actuales (Filippidou & Jiménez, 2019). Muchos edificios dependen de combustibles fósiles para la calefacción y la refrigeración, y emplean tecnologías obsoletas y aparatos poco eficientes.

Por lo tanto, la mejora de la eficiencia energética de los edificios tanto nuevos como rehabilitados, y la reducción de las emisiones de CO₂ relacionadas con ellos es una de las puntas de lanza de la estrategia energética y climática a la hora de mitigar el cambio climático.

En respuesta a los problemas medioambientales y en línea con los objetivos del acuerdo de París, la Unión Europea se compromete a desarrollar un sistema energético sostenible, competitivo, seguro y descarbonizado de aquí a 2050. Por lo tanto, los Estados miembros deben buscar un equilibrio entre descarbonizar el suministro de energía y reducir el consumo de energía final (EU, 2021). Para poder alcanzar los objetivos de descarbonización y reducción de los efectos del cambio climático es necesario buscar todos los medios posibles para poderlo conseguir, empezando preferiblemente por los más eficaces. Esto abarca desde rehabilitar edificios para hacerlos energéticamente más eficientes y prolongar su vida útil, hasta diseñar nuevos edificios que sean capaces de producir su propia energía, en particular para las tipologías como oficinas y escuelas cuyo régimen de uso más se acompasa con el ciclo solar.

El "Green Deal" tiene como meta que Europa sea el primer continente neutro desde el punto de vista climático, y ya está reduciendo sus emisiones de forma paulatina (Imagen 12).

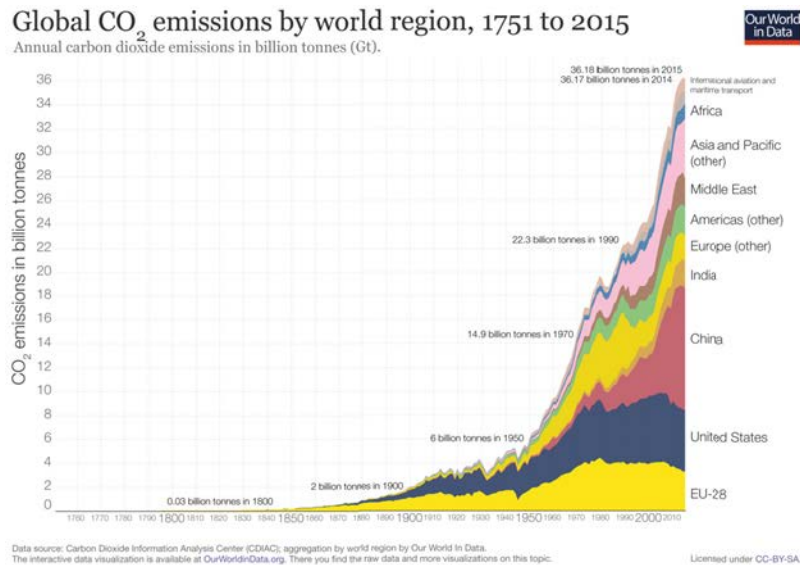


Imagen 12. Emisiones de CO₂ mundiales por regiones del mundo.

Fuente: <https://ourworldindata.org/>

En la UE, este reto se aborda, entre otros, en la Directiva sobre la eficiencia energética de los edificios (EPBD) de la Comisión Europea, que regula que todos los edificios nuevos de los países de la UE son edificios de consumo de energía casi nulo (NZEB) desde 2020 (EC, 2021). El Paquete de Energía Limpia presenta comunidades de energía renovable (EU, 2021) y promueve a los “prosumidores” de energía renovable (productores y consumidores de energía), permitiendo que los hogares, las comunidades y las empresas se conviertan en productores de energía limpia. Estas comunidades ahora también están integradas en las regulaciones nacionales de los Estados miembros (Ines et al., 2020; Overview, 2021). Por lo tanto, junto con la difusión de las energías renovables, está aumentando la producción de energía descentralizada. Este modelo ofrece, entre otros beneficios, ahorros de costos, ganancias de eficiencia y mayor capacidad energética (Kumar & Cao, 2021).

Cabe tener cuenta que en el transcurso de unos años el estándar NZEB se ha transpuesto a la normativa de edificación de todos los estados miembro europeos siendo la senda marcada por la directiva EU 2018/844, que se concreta en que “Los edificios de nueva construcción deben ser edificios de consumo de energía casi cero a partir del 31 de diciembre de 2020 y los edificios públicos deben serlo a partir del 31 de diciembre de 2018. “Un edificio de energía casi nula (EECN en castellano o NZEB en inglés) se define como un edificio con un rendimiento energético muy alto que cubre en la mayor medida posible la demanda del edificio mediante fuentes de energía renovables, producidas in situ o en sus proximidades” (EP, 2010). Sin embargo, cada país de la UE tiene su propia definición de NZEB, que tiene en cuenta el entorno operativo y el clima locales. Esto hace que las prácticas de realización de las NZEB varíen entre los países de la UE (D’Agostino et al., 2021).

Su variabilidad resulta aún mayor si tenemos en cuenta la definición del Departamento de Energía de EE.UU., según la cual los NZEB son “edificios energéticamente eficientes en los que la energía anual suministrada es inferior o igual a la energía renovable generada in situ y exportada” (US, 2015). Aunque estas definiciones pueden parecer muy similares a primera vista, un análisis más profundo revela que incluyen diferente terminología y condiciones límite.

2.4 Europa hacia los edificios de energía positiva

Aunque los Edificios de Energía Casi Nula (NZEB) son la nueva normalidad en la UE, tanto la política como la investigación siguen buscando los siguientes pasos potenciales de mejora. En este contexto, los Edificios de Energía Positiva (PEB) se presentan como una evolución natural de los NZEB el nuevo objetivo para el 2030, año en que la emisión de gases de efecto invernadero debería reducirse un 40% respecto a 1990 (Imagen 13).

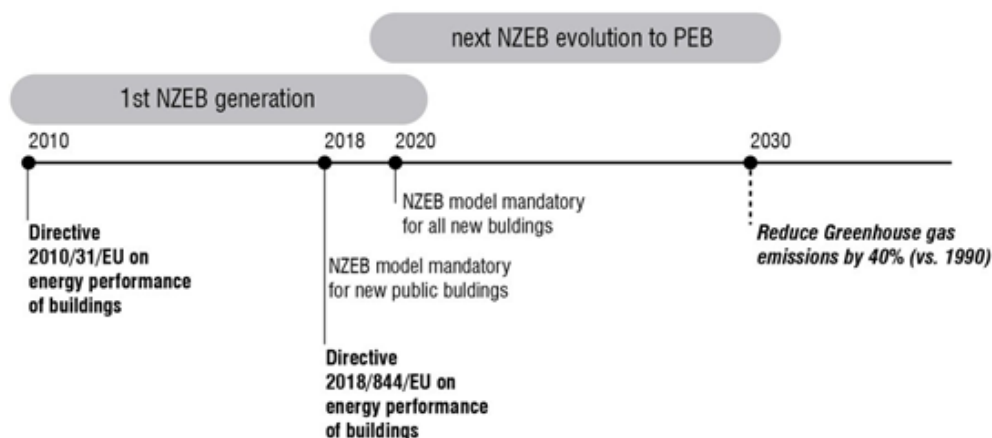


Imagen 13. Hitos relevantes en la evolución del concepto NZEB hacia el concepto PEB.

Fuente: Xabier Barrutieta.

Prueba de ello es que los PEB ya se están investigando ampliamente (Kumar & Cao, 2021; Ala-Juusela & Rehman, 2020; Barrutieta et al.; 2022), y ya están surgiendo diversos ejemplos interesantes con datos reales en fase operativa. Las estrategias para conseguir los PEBs están aún en discusión, pero es seguro que se basarán en los modelos NZEB que están actualmente en uso (Cole & Fedoruk, 2005). En su mayoría utilizan tecnologías similares a las de los NZEB, pero con una mayor cantidad de tecnologías de producción de energía renovable integradas en el mismo edificio, con el fin de que produzcan más energía de la que consumen anualmente (Imagen 14 y 15).



Imagen 14. El Ayuntamiento de Friburgo, Alemania, se presentó en 2018 como el primer edificio público del mundo capaz de producir más energía de la que consume. Autor: Ingenhoven architects / HGEsch
Fuente: <https://www.floornature.es/ingenhoven-architects-freiburg-town-hall-freiburgo-14259/>



Imagen 15. El concepto PEB también aplica a edificios existentes, como esta renovación y ampliación de un edificio en Alleestrasse Romanshorn, Zurich, que destaca por su diseño que incorpora elementos captadores fotovoltaicos tanto en la fachada como en la cubierta. Fue el proyecto ganador del Premio Norman Foster Solar Awards 2013. Arquitectos autores: Viridén-Partner AG.

Fuente: <https://www.viriden-partner.ch/plus-nullenergiehaeuser>

El excedente de energía producida in situ puede servir a otros edificios que tengan regímenes de consumo diferentes, y para ello resulta importante aplicar desde el diseño urbano el concepto de las Células Urbanas. El equilibrio de las necesidades energéticas a una escala más allá del propio edificio será clave para conseguir la independencia energética de todo el parque de edificios (Magrini et al., 2020). Este planteamiento también tiene otras implicaciones, como favorecer la estrategia de empoderamiento de

los consumidores que permite el acceso asequible a las energías renovables. En definitiva, el concepto PEB va más allá del NZEB en cuanto a la generación de energía renovable in situ, en aspectos como la reducción de emisiones de carbono y gases de efecto invernadero, y en marcar el objetivo de la autosuficiencia energética (Kumar and S. Cao, 2021).

Estado del arte de los PEB

A pesar de la creciente popularidad de los PEB, en la actualidad no cuenta con una definición universal. Algunos autores consideran el PEB como un NZEB más eficiente, de modo que produce más energía de la que consume (Magrini et al., 2020). Un balance energético positivo significa que el excedente anual de energía eléctrica inyectada a la red es mayor que la energía eléctrica anual importada de la red (Bojić et al., 2011). Una definición genérica establece que un edificio tiene un plus de energía cuando produce más energía a partir de fuentes de energía renovables, a lo largo de un año, de la que necesita para calefacción, refrigeración, ventilación, agua caliente sanitaria (ACS) y sistemas auxiliares (Kumar & Cao, 2020).

Para evaluar el estado del arte del tema e identificar la definición del concepto de PEB, así como las metodologías de evaluación del rendimiento, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica. Se utilizó el motor de búsqueda Science Direct para identificar los artículos más relevantes y los estudios de casos documentados en este campo. En abril de 2024, se pueden encontrar 36 publicaciones con el término “positive energy building” en su título o entre las palabras clave. El término “plus energy building” suma 18 publicaciones. Algunos trabajos distinguen el término “positive energy building” del de “plus energy building”, entendiendo el primero como un edificio con balance energético positivo y el segundo como un concepto más holístico que incluye también otros aspectos como el confort interior (Hawila et al., 2022). Sin embargo, la mayoría de los estudios encontrados no hacen distinción entre ambos.

El balance energético para un PEB se calcula principalmente como el resultado entre el consumo y la generación de energía, pero también puede ser el balance de importación/ exportación de energía de la red. Las métricas de balance más populares son la energía final y la energía primaria, utilizándose más el balance de energía primaria (Hawila et al., 2022). Sin embargo, la definición puede incluir también el balance de emisiones de carbono. Por ejemplo, algunas bases de datos de certificaciones como Observatoire BBC (Effinergie) utilizan las métricas de balance de energía primaria y emisiones de carbono. El balance energético puede contabilizarse durante un año de funcionamiento del edificio (Marino et al., 2019) o durante toda la vida útil del edificio, como en la definición de Powerhouse (2021)

El estándar PEB en Europa

Este trabajo de investigación se centra en la escala de los edificios, por lo que se han estudiado cuatro estándares de edificios de energía positiva, que se muestran en la Tabla 1. Además de la definición de EXCESS (Ala-Juusela & Rehman, 2020), se comparan otras tres definiciones y normas. La BEPOS E+C (MTE, 2019) es una definición legal francesa de edificio energéticamente positivo y con bajas emisiones de carbono. Los PEB

corresponden al nivel "Energía 4". Efficiency House Plus es una definición oficial del Ministerio Federal de Construcción alemán (GFMI, 2018). Por último, Powerhouse (2021) es una norma noruega.

	EXCESS definition	BEPOS+ effinergie 2017 (E4 C1/C2)	Efficiency House Plus	Powerhouse standard
Country	EU	France	Germany	Norway
Authors	The EXCESS team and partners	The government and the Executive Council for Construction	Federal Ministry of Building,	Companies coalition including Skanska, Snøhetta, Entra and other ¹
Key principles²	Energy performance X Environmental performance X Economic evaluation X Social Perspective X Technology Perspective X	X X X	X *	X X
Time span of evaluation	yearly on-site energy ratio (OER)	Annual balance during the building's life cycle, 50 years for all buildings		Annual balance over the lifetime (60 year operational phase)
Type of buildings	Any (new/retrofit)	New/ under construction in a metropolitan area in compliance with France's 2012 energy efficiency standards	Residential, educational mostly, that comply with the Energy Saving Ordinance. Refurbished buildings initiative currently testing	Office, educational mostly, new and retrofit
Boundary of the system	the focus is on the single building on site renewable energy	Local area	Plot boundary (boundary of the property as in land registration)	Not specified, on or near building
Performance level	energy efficient building that produces more energy than it uses via renewable sources, with high self-consumption rate and high energy flexibility, over a time span of one year	Negative level of overall energy use, contribution to the production of RE for the local area and low carbon and GHG emissions during the life cycle, including construction) Bbio (energy needs), Cep (energy consumption) and BEPOS rating (the energy consumed by all sources associated with the building)	a building has both a negative annual primary energy demand ($\sum Q_p < 0$ kWh/m ² a) and a negative annual final energy demand ($\sum Q_e < 0$ kWh/m ² a)	
Research, data collection	EXCESS project	Observatory collects data of the operations, feedback and best practices for the drafting of future legislation.	"Future Building" Research Initiative (ZEB4U), also offers consulting services. Building monitoring programme	
Legal context	EU energy regulatory framework (EPBD; 2010/31/EU, EED; 2012/27/EU, Clean Energy Package, New rules for the internal market in electricity, Green Deal)	2015 National Carbon Strategy Low- Carbon Strategy RT 2012 RE 2020	The Energy Saving Ordinance (EnEV), the Act on the Promotion of Renewable Energies in the Heat Sector (EEWärmeG) ³	
Specifications	A high quality indoor environment, comfort and well-being of the occupants, also integration of the technologies like electric vehicles	Requirements both on the performance of its envelope, its equipment, and on the construction quality and ecomobility potential (assessment of the energy consumption generated by the movements of building users).	The ratio of self-used renewable energy generated on site should be as high as possible	
Participation		Self-assessment, or assessment by a certification body providing guidance during the early stages of the project.	The standardised calculations can be carried out using a free online tool	At least two of the affiliated companies are involved during construction and to monitor the project after completion
Certification label		The E+C- certification label that is only awarded by one of 5 certification bodies approved by the government Bepos + Effinergie 2017	Efficiency House Plus standard energy performance certificate	Powerhouse standard
Software tools		Several software tools are approved for energy performance evaluation	The standardised calculations for an Efficiency House Plus can be carried out using a free online tool	

Tabla 1. Comparativa de los cuatro estándares PEB estudiados indicando sus principales características.

La definición elaborada por el Consorcio EXCESS abarca la mayoría de las características mencionadas en otras definiciones, y por eso se considera la más adecuada para tomarla como referencia en esta investigación. Según EXCESS, un edificio de energía positiva (PEB) es un edificio energéticamente eficiente que produce más energía de la que utiliza a través de fuentes renovables, con una alta tasa de autoconsumo y una alta flexibilidad energética, en un periodo de tiempo de un año (Ala-Juusela & Rehman, 2020). Un ambiente interior de alta calidad es un elemento esencial en el PEB, ya que mantiene el confort y el bienestar de los ocupantes del edificio. El PEB también puede integrar tecnologías como vehículos eléctricos con la motivación de maximizar el consumo in situ y compartir el excedente de energía renovable.

La definición y el concepto de EXCESS es válida para todos los edificios nuevos y reformados, mientras que otras normas solo se aplican a edificios nuevos en zonas urbanas (BEPOS+ effinergie 2017), o edificios residenciales y educativos (Efficiency House Plus). La norma Powerhouse se aplica principalmente a edificios de oficinas y educativos, y uno de los casos de estudio más completos es el Powerhouse Brattørkaia en Trondheim (Imagen 16 y 17).

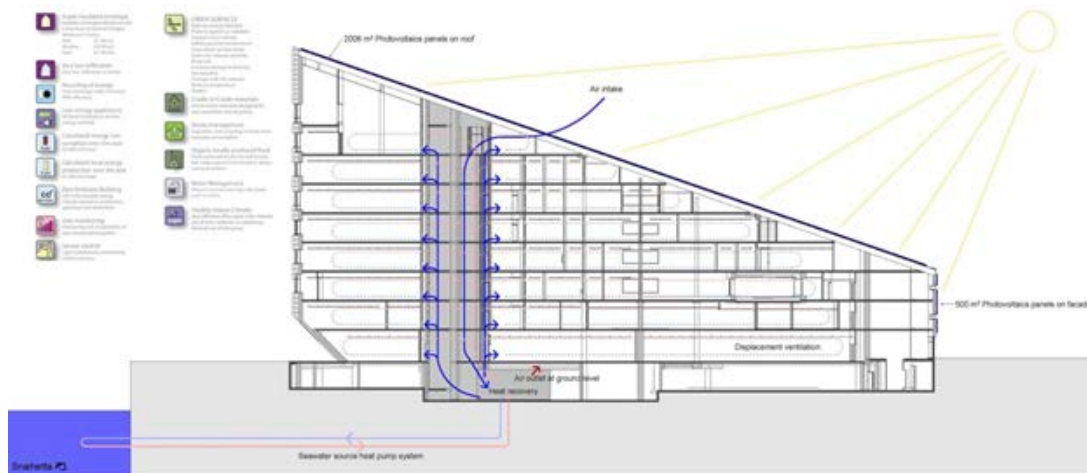


Imagen 16. Sección longitudinal mostrando el esquema energético y de sostenibilidad de Powerhouse Brattørkaia.

Fuente: <https://www.archdaily.com/924325/powerhouse-brattorkaia-snohetta>

El balance energético se contabiliza tomando en consideración el consumo de energía y la generación de energía renovable. Efficiency House Plus también tiene en cuenta la demanda anual de energía final. Sin embargo, la norma Powerhouse exige que el edificio cubra la energía total incorporada utilizada para la producción y el transporte de los materiales de construcción, así como la energía para renovar y demoler el edificio. En términos de valor añadido del edificio certificado, las cuatro normas tienen en cuenta el rendimiento medioambiental. BEPOS+ effinergie 2017 y EXCESS también prestan atención a la evaluación económica.



Imagen 17. Powerhouse Brattørkaia es el edificio de energía positiva más septentrional del mundo, que se sitúa en Trondheim, Noruega. El concepto Powerhouse se basa en un edificio de energía positiva que en el transcurso de un período de 60 años genere más energía renovable que la cantidad total de energía que se necesitaría para mantener las operaciones diarias y la energía invertida en construir el edificio, producir los materiales y demoler el edificio.

Fuente: Synlig.no/Snøhetta.

2.5 Los edificios de energía positiva y la fotovoltaica integrada.

“Es importante que los módulos fotovoltaicos sean más versátiles, tanto estructural como estéticamente. Si podemos lograr esto, los módulos fotovoltaicos se convertirán en un material nuevo, totalmente integrado y versátil para diseñar y construir, no solo un complemento engorroso para la eficiencia energética.”

Ben van Berkel, UNStudio

Las superficies en la envolvente de los edificios que se pueden utilizar para energía foto-voltaica pueden contribuir significativamente a la consecución de edificios energéticamente autosuficientes. Para ello, la arquitectura de los edificios de energía positiva debe incorporar de forma eficaz los sistemas fotovoltaicos, tanto en cubiertas como en fachadas.

Las fachadas pueden desempeñar un papel cada vez más importante, especialmente en edificios más altos y donde los tejados también se demandan tanto para instalaciones como para cubiertas verdes. La energía fotovoltaica integrada en edificios o BIPV (Building Integrated Photovoltaics) dota de una función adicional a un elemento constructivo ya existente. Varias investigaciones han revisado el estado del arte de la tecnología BIPV (Biyik et al., 2018; Xiang & Matusiak).

El elemento solar puede asumir las funciones de los componentes del tejado y de la fachada, permitiendo así ahorrar recursos para la producción de materiales de construcción convencionales. Esto se puede optimizar aún más integrándolo en

conceptos energéticos de edificios con suministro de calor basado en electricidad y la movilidad eléctrica (Imagen 18).



Imagen 18. Visualizador de producción y consumo energético, incluida la demanda de los coches eléctricos, del edificio Powerhouse Brattørkaia en Trondheim.

Fuente: Powerhouse Brattørkaia.

Sin embargo, a pesar del creciente número de estudios sobre PEB y soluciones para diferentes zonas climáticas (Firlag, 2019; Franchini et al., 2019; Rehman et al., 2019), la revisión de la literatura ha demostrado que todavía faltan estudios que comparen las soluciones de PEB en general y los BIPV en particular, basándose en el mismo clima y evaluando estudios de casos con datos reales monitorizados.

Diversos proyectos europeos como el BIPVboost (2020) están centrándose en desarrollar la industria de los paneles fotovoltaicos hacia elementos constructivos generadores de energía con una mayor voluntad de integración en el diseño. A nivel gubernamental cabe destacar también iniciativas como Leitfaden Bauwerkintegrierte Photovoltaik (MUKE) en Baden-Württemberg (Imagen 19), o la web suiza Solarchitecture (SUPSI) que dispone de una base de datos de productos BIPV ya desarrollados y que se han aplicado en edificios que se documentan de manera detallada.

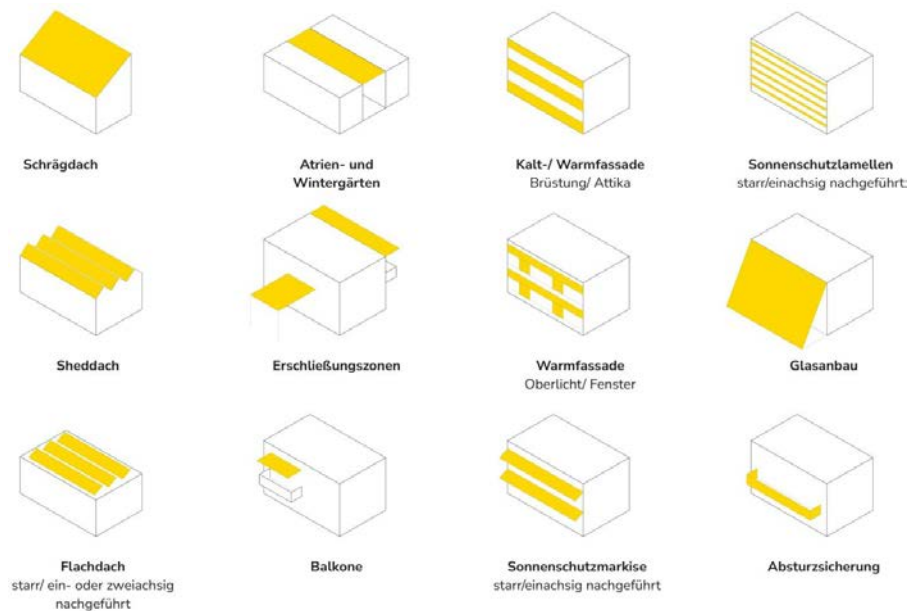


Imagen 19. Gráfico mostrando la diversidad de opciones para integración de fotovoltaica en cubierta y fachada incluido en la Guía para el diseño integrado de captación solar fotovoltaica promovido por el Land de Baden-Württemberg, Alemania.

Fuente: <https://bipv-bw.de/b-architektur-mit-photovoltaik/>

3 METODOLOGÍA

Una de las más firmes voluntades es que este trabajo sirva para conectar la realidad práctica de la arquitectura de nuestros días con el rigor del análisis del mundo académico.

Dicho de otra manera, la tesis se orienta a la transferencia de conocimiento desde el mundo real al académico y viceversa, y se pretende que las conclusiones de estas investigaciones puedan ser de utilidad para entender la arquitectura ya construida, y a la vez, que sirva como referencia a la hora de proyectar y rehabilitar nueva arquitectura. Por ello, la metodología utilizada se basa en el estudio y análisis comparado de casos de estudio reales de edificios construidos y con mediciones en fase de uso.

Se plantean las tareas de medir, comparar y estandarizar los datos obtenidos de casos de estudio de edificios de oficinas en climas oceánicos. Las oficinas representan una tipología muy prometedora para lograr los objetivos de los edificios de energía positiva (PEB), dado su patrón de uso y consumo de energía es predominantemente diurno, y se puede sincronizar con el ciclo de producción de energía a través del sol.

Por todo ello, este trabajo tiene como objetivo desarrollar una herramienta a modo de marco de toma de decisiones aplicada al diseño de edificios de energía positiva, que

per- mita valorar el impacto de las decisiones de diseño en la capacidad de integración solar fotovoltaica, y su grado de efectividad para la consecución del objetivo de la autosuficiencia energética del edificio.

3.1 Medir

La primera tarea que ha permitido un acercamiento a la realidad de los edificios de alta eficiencia energética ha consistido en el análisis del comportamiento energético real de un edificio diseñado y construido por el autor, el Edificio Zero (Hernani, 2011-14). Este edificio fue de los primeros edificios diseñados con la filosofía de la Directiva 2010/31/UE en el País Vasco aplicando los objetivos de los NZEB (Nearly Zero Energy Buildings). En este edificio se plantearon unos estándares muy altos en cuanto a sostenibilidad, eficiencia energética, optimización de recursos materiales. El mayor reto fue, no obstante, el objetivo de lograr construir un complejo de 4 edificios y 50.000m² construidos con la ausencia de consumo de energías fósiles y con la máxima cantidad de generación de energía renovable in situ. Fue el primer conjunto de edificios certificado tanto en BREEAM Excellent como LEED Oro en España. El edificio Zero destaca por ser el edificio principal y el que tiene un diseño bioclimático y solar más optimizado (Imagen 20).



Imagen 20. El proyecto Orona Ideo, donde se integra el edificio Zero, está diseñado teniendo en cuenta la singularidad complementaria de cada uno de los cuatro edificios para la captación de energía renovable y comparten una instalación energética de tipo District Heating/Cooling.

Fuente: Xabier Barrutieta.

Una vez construido y puesto en funcionamiento en 2014 todo el proyecto se monitorizó para comprobar la afinidad entre los modelos de cálculo utilizados para las simulaciones energéticas y los datos de consumo y generación de energía obtenidos durante la fase de operación real del edificio (Barrutieta et al, 2021). La fase de monitorización se realizó a través de un seguimiento de los contadores de energía tanto en el propio edificio como en el District Heating/Cooling del conjunto durante un año.

El consumo de energía térmica de los edificios se midió a través de 83 contadores de energía, y la energía eléctrica se midió a través otros 70 contadores distribuidos en el conjunto de los edificios. Con ello fue posible obtener los consumos por cada uno de los sistemas que comprenden la energía necesaria para la operación del edificio: calefacción, refrigeración, ventilación, ACS, iluminación y control de humedad. Por otro lado, también se obtuvo la magnitud del resto de la energía consumida en el edificio por la actividad a través de las facturas reales. Finalmente pudo compararse la realidad frente a las simulaciones energéticas realizadas en fase de proyecto.

Para la plasmación y mejor comprensión de los datos se utilizaron los diagramas de flujo de Sankey, que ofrecen una mejor visualización de los datos, ya que la anchura de las flechas es proporcional a la cantidad de flujo, en este caso, de la energía.

3.2 Comparar

Una vez conocido el funcionamiento y la forma de recopilar y trabajar los datos reales de consumo y producción de energía de este tipo de edificios NZEB, se ha buscado contrastar y evaluar estos resultados con otros proyectos arquitectónicos similares realizados principalmente en Europa, y así construir una base de conocimiento más amplia a través de la comparación.

Varios investigadores han destacado la dificultad de comparar Edificios NZEB de cualquier tipo en todo el mundo a pesar de considerar una amplia selección de edificios (Hyde et al., 2005). Esto se debe principalmente a conceptos y metodologías incongruentes de carbono cero que obstaculizar la evaluación comparativa (Kurnitski et al., 2013; Pan & Li, 2016). Uno de los estudios más extensos sobre edificios NZEB (Musall et al., 2016) recopiló 280 edificios en todo el mundo con el objetivo de mostrar las tendencias y los métodos seguidos para lograr un balance energético cero. Sin embargo, la heterogeneidad de factores relacionados con la ubicación, el clima y la tipología hacen muy complicado obtener resultados y patrones concluyentes que puedan servir de aplicación directa a nuevos proyectos. Por ese motivo esta investigación se centra en una tipología y un ámbito climático concreto.

En cuanto a edificios de oficinas, algunos autores sostienen que hay pocos ejemplos debidamente documentados de edificios NZEB (Flodberg, 2012), mientras que otros se centran únicamente en las emisiones de carbono producidas en edificios de esta tipología (Jones et al., 2015). Uno de los pocos estudios académicos que reportan datos reales es un edificio de oficinas en Tianjin, China (Zhou et al., 2016).

Lo más interesante de estos casos de estudio reside en las conclusiones: el primer edificio de los anteriormente citados mostró que el consumo de energía era mucho mayor que la energía generada por el sistema solar fotovoltaico a causa de las diferencias entre las etapas de operación y diseño, por el comportamiento real de los usuarios en el edificio frente al previsto inicialmente, y por la menor energía generada por los paneles fotovoltaicos. En el edificio de oficinas UBA en Berlín se multiplicó casi por tres la

diferencia entre la electricidad esperada y medida para el consumo de calefacción y ACS, pero también registró un mayor rendimiento del sistema de energía fotovoltaica.

El estudio y análisis comparado de casos de estudio reales requiere de una importante labor de homogenización de los datos, con el fin de trasladar los datos cuantitativos de energía a tablas con unidades de medición comunes y comparables con el resto de los casos de estudio. Asimismo, se desmenuza desde un punto de vista cualitativo cada uno de los proyectos para analizar qué soluciones se aplican en ellos en cuanto a diseño sostenible y también se identifican las fuentes de generación de energías renovables aplicadas in situ.

La selección de los casos de estudio de edificios NZEB y PEB de oficinas se ha realizado teniendo en cuenta el contexto climático y la disponibilidad de datos para su estudio. Se ha tratado de contar con una amplia diversidad arquitectónica en cuanto a forma, alturas y superficies para poder así contrastar el impacto del diseño arquitectónico en el funcionamiento real del edificio Barrutieta, (2022).

Es preciso mencionar que la calidad arquitectónica de los edificios seleccionados ha sido también un factor que ha tenido peso a la hora de optar por uno u otro caso de estudio. Esta problemática respecto al interés arquitectónico de los casos de estudio fue también abordada en la investigación realizada en al Tesina de Doctorado (Barrutieta et al., 2023).

Por tanto, no cabe considerar el interés de un edificio solamente por sus parámetros de rendimiento energético, sino también por su interés como diseño arquitectónico y urbano, equilibrado y atractivo. Esta puede ser una decisión sujeta a un criterio subjetivo, pero desde la arquitectura no debemos ser ajenos a este aspecto, ya que para hacer buenos edificios es necesario aprender de las referencias de calidad.

3.3 Estandarizar

La eficacia del diseño de edificios con energía positiva (PEB) depende en gran medida de un enfoque equilibrado entre el diseño del edificio y su rendimiento energético. El proceso arquitectónico necesita pautas para abordar el impacto de las decisiones tempranas de diseño en la consecución de los objetivos para un edificio de energía positiva.

Los datos recopilados de los casos de estudio se han agrupado en cuatro campos:

- Factores climáticos y de localización.
- Consumo de energía.
- Generación fotovoltaica in situ.
- Diseño geométrico y volumétrico del edificio.

El objetivo ha sido identificar indicadores KPI que sinteticen las interdependencias entre cuatro campos que se han identificado y que se consideran relevantes para el proceso de diseño de un edificio de oficinas PEB.

Con ello se persigue desvelar la correlación entre los campos de diseño geométrico, localización y los aspectos energéticos de consumo y generación de energía solar y trasladarlo a unos indicadores.

Posteriormente, estos indicadores se han ordenado secuencialmente para conformar una herramienta como marco para la toma de decisiones aplicado a un proyecto PEB en las fases iniciales de diseño arquitectónico.

4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Esta tesis ha ido tomando cuerpo como conjunto en respuesta a una sucesión de preguntas que han ido surgiendo a través de la continua observación crítica de la realidad y de afrontar los desafíos de la profesión con una visión a largo plazo. Estas preguntas han evolucionado en una serie de hipótesis concretas conforme ha ido avanzando la investigación.

4.1 Hipótesis

La primera gran supuesto a confirmar surge durante el proceso de diseño del conjunto de edificio del campus Orona en Hernani, donde se planteó que:

- Es posible diseñar un conjunto de edificios de 50.000 m² de forma que funcionen sin el uso de fuentes de energía fósil con las tecnologías disponibles en el mercado.

La hipótesis se basa plantear en la posibilidad no solo de no emplear energías fósiles para su desempeño energético, sino de eliminar por completo las emisiones carbono dióxido. El proceso de diseño conllevó la investigación exhaustiva de los sistemas de generación de energía renovable aplicables al caso concreto, y realizar estudios de viabilidad técnica y económica para diversos escenarios de mix de energía y en cuanto a su dimensionamiento y gestión. La confirmación cuantitativa de esta hipótesis con datos reales, y la evaluación de los factores principales que pueden influir en ello fueron el comienzo de la investigación con datos reales (Barrutieta et al., 2021).

Paralelamente se vio la necesidad de que el diseño arquitectónico integrara estas tecnologías de captación de energías renovables de forma armónica e integrada. Finalmente, el diseño de los edificios debía ser capaz de transmitir la sensibilidad y la singularidad de este proyecto pionero.

Una pregunta fundamental parte del hecho de que este proyecto certificado en LEED Oro y BREEAM Excellent cumple en muy alto grado con las expectativas de un edificio medioambientalmente sostenible y modélico. El concepto de NZEB o edificio de energía casi nula estaba en el origen de su concepción. Tras años de experiencia, cabe preguntarse si puede ser un modelo para futuros edificios, y si cumple con cierta medida con los objetivos que ahora se plantean a futuro, y en particular con el estándar PEB. Por tanto:

¿Es el Edificio Zero un PEB?

La siguiente fase de la investigación que da paso a otra serie de hipótesis, es una evolución que parte de la experiencia del edificio Zero y trata de ampliar el foco de la investigación incorporando al estudio un conjunto de varios edificios NZEB y PEB, con el objetivo de estudiar el cumplimiento real de los objetivos fijados. Además, el propio estándar NZEB ha ido evolucionando y adaptándose a cada país miembro en Europa, y por tanto la investigación también debe abordar la transición de los primeros NZEB hacia un nuevo estándar: los edificios de energía positiva, los PEB. Se plantean las siguientes hipótesis:

- Los edificios de oficinas son tipologías adecuadas para lograr el objetivo de autosuficiencia energética porque su patrón de uso se acompaña con el ciclo solar.
- Los datos de funcionamiento real de los edificios ofrecen una información mucho más precisa de la realidad que las simulaciones.
- Existen estrategias de diseño pasivo, y tecnologías para la producción energía renovable que son más habituales entre los casos de estudio analizados.

De las investigaciones se evidencia que el diseño arquitectónico inicial condiciona las posibilidades reales de obtener un edificio PEB, ya que el objetivo de alcanzar la autosuficiencia energética implica, por ejemplo, unos umbrales mínimos de superficie de captación fotovoltaica en cubierta y en fachada que entraña un necesario vínculo con la forma del edificio (Barrutieta et al., 2023). Por tanto, se plantea esta hipótesis:

- El diseño preliminar de un edificio es transcendental para que alcanzar los objetivos del estándar PEB.

Es previsible que implementar los estándares PEB en el diseño de los edificios implica adoptar soluciones que suponen cambios notables en la configuración de la envolvente y la forma de los edificios, además de implementar tecnologías nuevas para conseguir los estándares PEB. Por tanto, se plantea como hipótesis final que:

- El diseño de los edificios con objetivos PEB va a conllevar un cambio en el diseño arquitectónico que evolucionará en un lenguaje nuevo. Esta evolución será tanto a nivel formal, para poder optimizar la captación de energía a través de la envolvente de los edificios, como a nivel estético, por la integración de los nuevos sistemas captadores de energía solar tanto en cubiertas como en fachadas.

4.2 Objetivos

El fin de la tesis es obtener un conocimiento aplicable para poder diseñar edificios PEB energéticamente autosuficientes. Para lograrlo, se plantean una serie de objetivos que permiten trazar puentes de unión entre los campos más técnicos de este tipo de edificios y su respuesta desde la arquitectura en las fases tempranas de diseño:

- Evaluar de manera rápida las posibilidades de un diseño de un edificio de oficinas de alcanzar el objetivo PEB.
- Identificar parámetros fáciles de obtener de los casos de estudio, y de medir en fase de proyecto, para elaborar indicadores que relacionan los factores de localización, producción y consumo energético, y las propiedades de la forma del edificio.
- Obtener una serie de KPIs específicos propios del diseño de los PEB.
- Elaborar un marco de toma de decisiones a través de estos KPIs aplicado a las fases iniciales del diseño de los edificios de energía positiva.

5 RESUMEN Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

5.1 Edificio Zero: un NZEB de primera generación

En los últimos años son cada vez más los edificios NZEB que se han construido por el mundo, en multitud de climas, entornos culturales y sociales diversos. Especialmente a partir de la segunda década del siglo XXI, se han realizado edificios que han querido ir más allá de la regulación normativa del momento implementando el concepto NZEB y desarrollando sus posibilidades de forma integral.

El término de “Primera generación de NZEB” se acuña para denominar a los edificios construidos en la etapa correspondiente desde 2010 a 2018, es decir, desde la publicación de la primera Directiva Europea de referencia en este campo hasta la primera fecha propuesta para la consecución de este objetivo gradual de NZEB.

El edificio Zero en Orona Ideo

La primera fase de la investigación trata de estudiar del comportamiento real de un proyecto arquitectónico avanzado e innovador, diseñado y llevado a cabo por el autor (Barrutieta et al., 2021). Este proyecto supuso apostar por un modelo de edificios NZEB de primera generación basado en la filosofía de la Directiva Europea EPBD de 2010, y que además fue certificado en LEED Oro y BREEAM Excellent

El edificio Zero se sitúa el campus Orona Ideo, que es el proyecto tractor de la ampliación del Parque Tecnológico de Gipuzkoa en Hernani. El conjunto de edificios

destaca por ser un espacio de fusión entre diferentes actividades sinérgicas: la empresa, los centros tecnológicos y las universidades. Para más detalles sobre la filosofía del proyecto se pueden consultar estas comunicaciones en congresos realizadas durante la fase de proyecto (Barrutieta & Goikoetxea, 2012; Barrutieta, 2013).

Orona Ideo es un referente en cuanto a la puesta en práctica de la filosofía de los NZEB (Nearly Zero Energy Building) ya que aborda el diseño conjunto de varios edificios, infraestructuras y espacios urbanos para crear un Campus integrad. El objetivo buscar la máxima eficiencia energética en los edificios, abastecerse de energías renovables y generar estas energías dentro de su propio entorno.

En su diseño se han potenciado al máximo las estrategias pasivas de diseño arquitectónico como las cubiertas y fachadas verdes, el uso de las aguas pluviales, la generación local de energía renovable y la integración de las superficies captadoras de energía solar en la envolvente de los edificios.

El edificio Zero (Imagen 21) alberga la sede corporativa de la empresa y su centro de investigación. Su diseño se inspira en el círculo, una constante en la imagen de marca de la empresa, y su imagen simbólica busca transmitir elegancia, fortaleza y elevación a través de un gesto formal abstracto: un cilindro hueco de 90m de diámetro y 16 metros de altura, inclinado 15°s sobre la horizontal.



Imagen 21. Vista aérea del Edificio Zero mostrando su cubierta inclinada 15° y las placas solares fotovoltaicas integradas.

Fuente: Paisajes Españoles.

El encaje del programa de usos del edificio está estrechamente ligado con los conceptos bioclimáticos tenidos en cuenta en su diseño arquitectónico y en particular a la orientación de este. El edificio Zero es está dedicado principalmente a oficinas y, por tanto, tiene grandes cargas internas producidas por sus ocupantes y por la densidad de equipamiento electrónico que disipa calor. Los espacios de trabajo se sitúan próximos a la fachada exterior del edificio, que es principalmente orientación norte, con el objetivo de permitir una generosa entrada de luz natural a la zona de las oficinas y minimizar las ganancias por radiación solar, que en este lugar resultan poco confortables porque producen deslumbramientos y aumentan la demanda de refrigeración

En la fachada interior del cilindro se sitúa galería en forma de anillo que distribuye los flujos de las personas y mira sobre el vacío central de edificio. Este es un espacio de carácter más social donde se producen las principales circulaciones dentro del edificio y la captación solar es bienvenida. La radiación incidente en esta fachada sur es más directa durante el invierno y hace que este espacio se comporte como un gran captador térmico que comunica todas las plantas y llega hasta la zona superior del edificio.

La fachada exterior curva está compuesta por píxeles triangulares que caracterizan la imagen del edificio. A través de la aplicación de un patrón bioclimático paramétrico se ha estudiado la radiación incidente en las diversas fachadas del edificio, con la singularidad de que, al no disponer de fachadas planas, se generan unos gradientes de situación ante los cuales el diseño de la envolvente debe adaptarse en cada punto.

Su forma cilíndrica se orienta al sur disponiendo su cubierta como una fachada captadora de energía que genera el edificio con su inclinación de 15° . Esto permite que la radiación penetre al espacio central peatonal del patio y reduce las zonas de trabajo expuestas a la radiación directa que se sitúan en la fachada exterior (Imagen 22). En el plano de la cubierta se consigue una buena integración de las placas fotovoltaicas en cuanto a su ángulo de incidencia y además se configura la vista principal de la fachada sur del edificio a través de estos elementos.

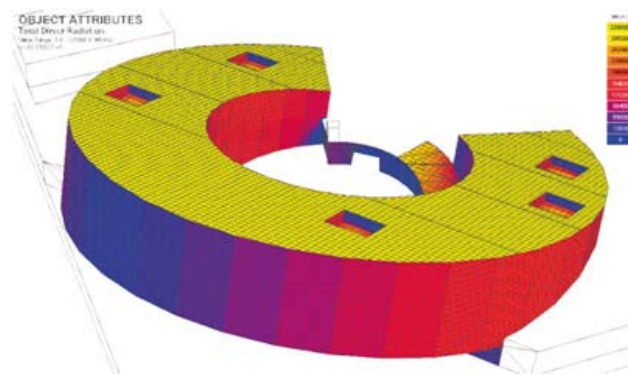


Imagen 22. Estudio de radiación solar anual acumulada sobre el edificio Zero. Se observa en color amarillo la alta insolación de la cubierta.

Fuente: Xabier Barrutieta

A través del ejercicio de superposición de estas variantes sobre el desarrollo de la fachada, y teniendo en cuenta la transmitancia global y un umbral de referencia para las pérdidas térmicas, se genera un diseño global donde no hay ningún patrón repetitivo para las fachadas exterior e interior, cada una con una ratio diferente de huecos y opacos (Imagen 23). En el cómputo global se dispone de aproximadamente un 40% de triángulos transparentes, 40% de opacos y 20% de translúcidos. Los módulos opacos disponen de un aislamiento térmico adicional que permite mejorar la transmitancia térmica del conjunto del sistema, que llega a un valor U de 1,2 W/m²K. Para más detalle sobre el proceso de diseño paramétrico de la fachada del edificio y su concepción energética se pueden consultar varias publicaciones en euskara (Barrutieta, 2017; Etxebeste, 2015).

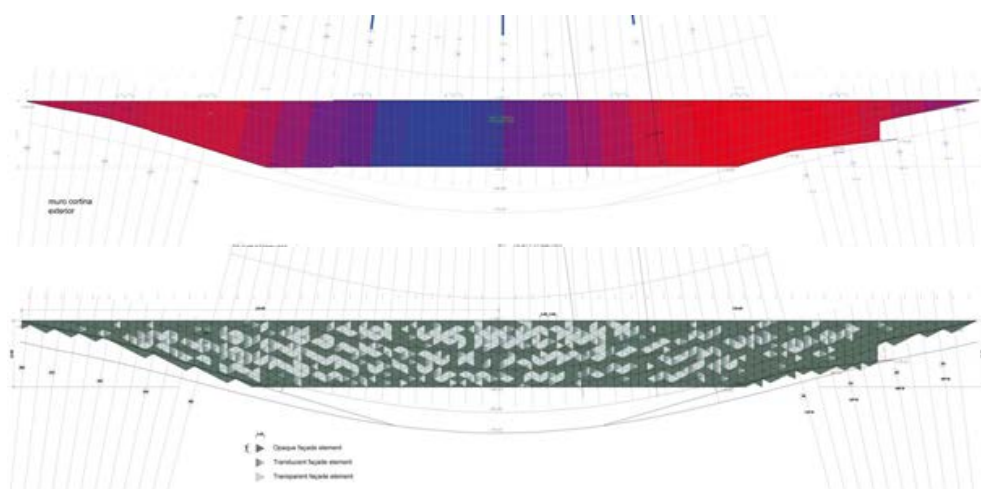


Imagen 23. Alzados desarrollados de la fachada cilíndrica mostrando la radiación solar acumulada y el diseño pixelado de la fachada respondiendo a las diferentes situaciones del edificio con píxeles opacos, translúcidos y transparentes.

Fuente: Xabier Barrutieta.

En Orona Ideo el concepto energético se asienta sobre la premisa de aprovechar al máximo la instalación de District Heating-Cooling del conjunto, que se alimenta de varias fuentes de energía 100% renovables situadas en la propia parcela (Imagen 24) y que tienen la siguiente potencia instalada:

Calefacción:

- Calderas de biomasa 2x 600 kW
- Bombas de calor geotermia: 194 kW
- Instalación solar térmica: 90 kW

Refrigeración:

- Bombas de frío geotermia: 154 kW
- Máquina de frío por absorción: 176 kW



Imagen 24. Esquema de fuentes energéticas de origen renovable del complejo de edificios de Orona Ideo.
Fuente: Xabier Barrutieta.

El dimensionamiento de los sistemas renovables se ha realizado con el objetivo de que el número de horas en las que estas energías sean efectivas sea máximo; dando prioridad a la geotermia, después la solar térmica y finalmente la biomasa. Para optimizar los recursos disponibles se ha estudiado el flujo de energía de forma lineal desde los sistemas de generación hasta su desempeño y uso final, identificando sinergias y diseñando elementos de almacenamiento y distribución (Imagen 25).

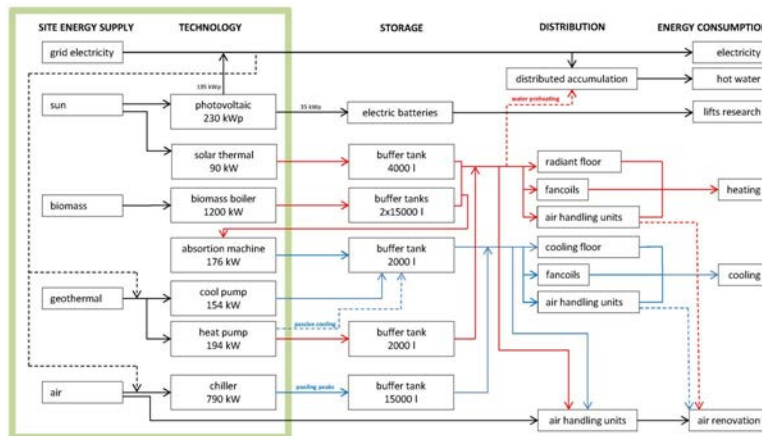


Imagen 25. Esquema de los flujos de energía en Orona Ideo.
Fuente: Xabier Barrutieta.

El propósito del proyecto ha sido crear un campus sin uso de energías fósiles, sin emisiones de CO2 y con una alta generación de energía renovable in situ.

5.2 Análisis de datos reales de funcionamiento

Una vez diseñado, construido y puesto en funcionamiento se ha seguido estudiando el comportamiento del edificio a través de su monitorización obteniendo datos reales del mismo. El objetivo ha sido obtener conocimiento sobre el grado de éxito de las estrategias aplicadas y estudiar posibles mejoras de cara a diseñar futuros edificios. Se trata de datos reales de un Edificio de Energía Casi Nula o NZEB de primera generación, lo que lo hace especialmente interesante. Por este motivo, los resultados han sido objeto de artículos y comunicaciones en varios congresos nacionales e internacionales (G. T. R. S.L., 2016; Hernández, 2017; G. T. R. S.L., 2017).

Los diagramas de flujos Sankey han resultado muy útiles para mostrar de manera visual los flujos de entrada y salida de energía tanto a nivel de edificio como en el conjunto del distrito. A través de ellos se ha podido hacer visibles de manera muy visual los datos analizados (Imágenes 26, 27 y 28). En el artículo dedicado al análisis del Edificio Zero se elabora el análisis detallado (GFMI, 2018).



Imagen 26. Fuentes de energía para calor y su consumo porcentual en los diferentes edificios.
Fuente: Xabier Barrutieta.

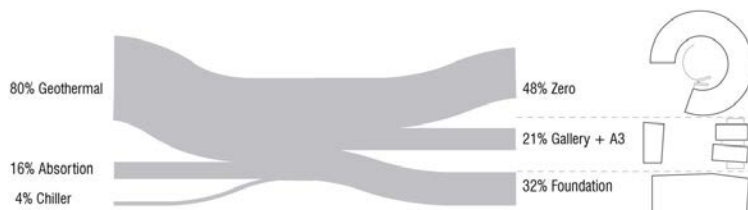


Imagen 27. Fuentes de energía para frío y su consumo porcentual en los diferentes edificios.
Fuente: Xabier Barrutieta.

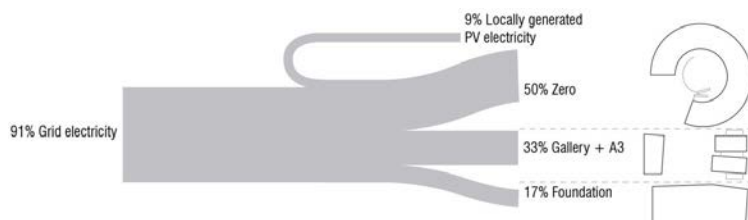


Imagen 28. Fuentes de energía eléctrica y su consumo porcentual en los edificios.
Fuente: Xabier Barrutieta.

A continuación, se describen los principales resultados de la investigación.

- Resulta necesario preparar el edificio con suficientes puntos de medición para poder obtener y ordenar la recepción de datos. Los certificados de sostenibilidad LEED y BREEAM han obligado en este caso a contabilizar consumos y separarlos por sistemas. Con pocos puntos de medición la agregación de consumos hace imposible realizar un seguimiento análogo al nivel de precisión de las simulaciones realizadas en proyecto. La puesta en marcha y verificación de estos contadores son un punto crítico que cuesta tiempo depurar.
- Se ha observado diferencias entre datos simulados en proyecto y las mediciones reales en la fase de uso. Esto se debe a que algunos factores resultan complicados de modelizar por su geometría, como las ganancias solares en la galería sur acristalada. Otros desvíos se deben a que los patrones de uso reales no corresponden con los simulados en proyecto, en cuanto a intensidad de uso y ocupación de algunos espacios.
- Falta una metodología general para poder realizar una evaluación estandarizada a partir de datos reales medidos. Aunque el proyecto cuenta con numerosos contadores de energía, resulta complicado asimilar sus lecturas a la misma estructura utilizada para las simulaciones.
- La energía operativa es la que necesita el edificio para su funcionamiento, y es sobre la que se calcula el objetivo de autosuficiencia. Sin embargo, resulta engañoso dejar de referirse a la energía total consumida, es decir, aquella que se paga a través de las facturas. Para cumplir los objetivos propuestos, los edificios deben diseñarse para cubrir su demanda de energía total durante la fase de uso.
- La energía final es la medible a través de las facturas reales y sobre la que el diseño arquitectónico impacta directamente. La energía primaria se ve afectada por los coeficientes de paso que varían por países y por años. Esto hace difícil la comparativa entre edificios y desdibuja los matices de mejora que se pueden obtener a través de variaciones en el diseño.
- Es posible llegar a un nivel alto de autosuficiencia energética en cuanto a la energía operativa del edificio. El edificio Zero consigue un 74,3% de autoabastecimiento de energía eléctrica en su propia huella ocupada, que considera la energía necesaria para: calefacción, climatización, ventilación, agua caliente, iluminación y control de humedad.
- El edificio Zero cuenta con un 92% menos de emisiones de CO₂ que un edificio de referencia de la misma tipología y en un clima similar.
- Al no hacer uso de la energía fósil en la propia parcela, las únicas emisiones de CO₂ corresponden a las emisiones embebidas en la energía eléctrica obtenida de la red que se cuantifican según datos del suministrador. Para obtener una neutralidad en carbono, la propuesta es reemplazar al suministrador de la red y utilizar 100% energía eléctrica verde certificada. En España, el 50% de toda la energía verde se produce a través de la eólica.

5.3 Selección de casos de estudio

El trabajo se apoya en el conocimiento adquirido en la primera investigación respecto al tratamiento de datos e indicadores propios de NZEB y PEB, y busca contrastar estos resultados con otros proyectos arquitectónicos similares realizados principalmente en Europa.

Se opta por tomar las oficinas como referencia porque son una tipología interesante para alcanzar los objetivos PEB debido a su patrón de uso típicamente diurno que se acompaña con el recorrido solar. Esto permite el consumo instantáneo de la energía generada y favorece el autoconsumo sin almacenamiento. La flexibilidad tipológica de las oficinas también ofrece oportunidades para una mayor experimentación formal.

Durante la investigación se ha podido constatar que hoy en día existe gran dificultad para obtener datos energéticos reales y de estructurados de forma consistente para varios proyectos. Resulta necesario avanzar en la línea de crear bases de datos comunes donde compartir datos reales de los edificios con criterios homogéneos. Además, los estándares y criterios para definir la neutralidad o positividad energética son variables según el estado. La casuística de cada país, y la diversidad de criterios y definiciones complica la investigación.

Esta fase requiere de datos fiables, y por eso se centra en la selección de casos de edificios NZEB y PEB ya construidos y que disponen de datos publicados en literatura especializada. Además, se ha hecho un trabajo importante de homogeneización de los datos procedentes de diferentes fuentes para después poderlas comparar.

Para la selección de los edificios se han tenido en cuenta estos aspectos:

- Balance energético anual positivo.
- Solo se consideraron edificios de nueva construcción.
- Tipología de oficina o administrativos.
- Disponibilidad de datos de energía con medición real.
- Rango de superficie construida entre 800 y 20,000 m².
- Edificios en climas oceánicos Cfb/Dfb.
- Sin utilización de combustibles fósiles, y con emisiones bajas de carbono.

En aplicación de estos criterios han seleccionado los siguientes casos de estudio:

5.3.1 Powerhouse Brattørkaia

Es un edificio de oficinas ubicado en Trondheim diseñado por Snøhetta (Imagen 29 y 30), y es el actual buque insignia de Edificio de Energía Positiva desarrollado por Powerhouse, una alianza de socios del sector privado en Noruega. Mediante una micro red local, el edificio suministra energía renovable excedente a edificios vecinos, autobuses eléctricos, coches y barcos. Además, es un caso interesante para estudiar el sistema de recolección y almacenamiento de energía solar. Los paneles solares están ubicados en el techo y en las fachadas. Se encontraron los datos de producción fotovoltaica medidos y la demanda calculada por Skanska (Jenssen, 2019).



Imagen 29. Powerhouse Brattørkaia, Trondheim.
Fuente: Ivar Kvaal/Snøhetta.



Imagen 30. Powerhouse Brattørkaia, Trondheim.
Fuente: Synlig.no/Snøhetta.

5.3.2 Ayuntamiento de Friburgo

El Nuevo Ayuntamiento de Friburgo (Imagen 31 y 32) diseñado por Ingenhoven Architects fue en 2019 el edificio de energía positiva más grande construido en Europa. El suministro de energía se basa en un concepto de bajo consumo energético. La energía in situ se genera mediante una gran planta fotovoltaica integrada en la envolvente del edificio combinada con colectores combinados fotovoltaico-térmicos ubicados en el nivel de la cubierta. El distintivo diseño curvo presenta una fachada que consta de paneles altamente aislados equipados con un total de 880 módulos solares personalizados alineados hacia el sol (Jaeger et al., 2019). El Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) valida este proyecto por sus características holísticas de sostenibilidad e integridad. Se ha dispuesto de los datos energéticos medidos en 2018. El primer año de seguimiento mostró que el objetivo de energía adicional casi se había alcanzado (Réhault, 2019).



Imagen 31. Fachada del Ayuntamiento de Friburgo.
Fuente: HGEsch Photography.

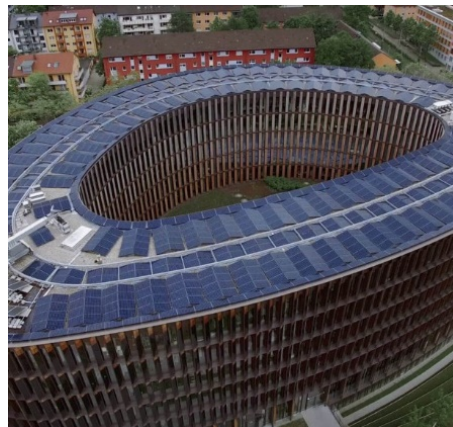


Imagen 32. Cubierta del Ayuntamiento de Friburgo.
Fuente: Fraunhofer ISE.

5.3.3 Centro Tecnológico de Aspern IQ

Este edificio es un proyecto de demostración en la zona de desarrollo urbano de Aspern Seestadt Wiens (Imagen 33 y 34), que se destaca por ser uno de los primeros edificios comerciales de Austria en tener un superávit energético. Esto se logra gracias a la combinación de normas de construcción de casas pasivas, tecnologías de construcción altamente eficientes y el uso de fuentes de energía renovables. El edificio implementa medidas como una fachada superior que produce energía a través de paneles solares, aporta sombreadamiento e incorpora un revestimiento de la fachada con vegetación. También utiliza un sistema de ventilación controlada basado en la temperatura exterior y la calidad del aire interior. Además, se aprovecha el calor residual de las salas de servidores para acondicionar el espacio. El Centro tecnológico Aspern IQ ha participado en proyectos como el MonitorPlus y Cravezero, lo que permite disponer de datos medidos reales sobre su funcionamiento (Weiss, 2013; Lechner et al., 2023).



Imagen 33. Vista frontal de la fachada. Centro Tecnológico de Aspern IQ.

Fuente: Kuball bzw. Bohmann /Wirtschaftsagentur Wien



Imagen 34. Vista lateral de la fachada. Centro Tecnológico de Aspern IQ.

Fuente: Vienna Business Agency.

5.3.4 Windkraft Simonsfeld AG

El nuevo edificio de oficinas para la sede central de Windkraft Simonsfeld AG en Ernstbrunn, Austria (Imagen 35 y 36) es un PEB terminado en 2014. El proyecto obtuvo la medalla de oro en la certificación Klimaaktiv, en la que alcanzó 965 de 1000 puntos (Bintinger). El diseño del edificio incluyó siete pasos para explorar opciones innovadoras para edificios de energía plus. Por ejemplo, la fachada está optimizada para obtener ganancias solares pasivas y una excelente iluminación natural en invierno y altas ganancias de energía térmica y fotovoltaica en verano ("fachada 100% energética"). El Instituto Austriaco de Construcción y Ecología, socio colaborador del proyecto, proporciona los datos medidos (Lechner et al., 2023; Mayer et al., 2015).



Imagen 35. Cubierta de Windkraft Simonsfeld AG.

Fuente: Windkraft Simonsfeld



Imagen 36. Fachada de Windkraft Simonsfeld AG.

Fuente: Renate Schrattecker-Fischer

5.3.5 ArcheNEO

ArcheNEO es un parque de oficinas de alta eficiencia energética situado en Kitzbühel Oberndorf, Austria (Imagen 37 y 38). Produce más energía de la que necesita, con un concepto energético integrado que ahorra energía, combina energías renovables con la movilidad eléctrica y utiliza baterías como almacenamiento de electricidad. El objetivo era conseguir un edificio sin necesidad de energía externa y sin emisiones de CO₂. ArcheNEO sirve como proyecto de demostración con la intención de ser replicado y exportado (Wendling & Kern, 2015).



Imagen 37. Fachada de ArcheNEO.
Fuente: www.facebook.com/ArcheNeo/



Imagen 38. Cubierta de ArcheNEO.
Fuente: [www.holz100canada.com/articles/holz100-project-fea-
ture-the-archeneo](http://www.holz100canada.com/articles/holz100-project-feature-the-archeneo)

5.3.6 Green Office Meudon

Este edificio de oficinas es la primera experiencia del concepto "Green Office" desarrollado por la empresa Bouygues Immobilier. El edificio está situado en Meudon la forêt, Francia (Imagen 39 y 40) y alberga un centro informático que funciona las 24 horas del día. Las dimensiones del edificio se calcularon para facilitar la reducción de las necesidades energéticas (más de la mitad de las plantas no superan los 13,5 m de profundidad). La ventilación natural sustituye al aire acondicionado en verano y el edificio está equipado con una unidad de cogeneración y 4100m² de paneles fotovoltaicos. La aplicación informática SI@GO midió la producción y el consumo de energía de Green Office® Meudon tras un año de funcionamiento, por lo que se dispone de datos reales para el análisis (Weiss et al., 2014).



Imagen 39. Fachada de Green Office Meudon.
Fuente: Bruno Demelin - Graphix Images - Atelier 115.



Imagen 40. Fachada de Green Office Meudon.
Fuente: © Bruno Demelin - Graphix Images - Atelier 115.

5.3.7 Green Office Rueil

Green Office Rueil está dividido en dos edificios separados (Imagen 41 y 42). El edificio Oeste se caracteriza por una fachada Norte lineal y una fachada Sur curva que favorece la ganancia solar. Las fachadas de las orientaciones Este y Oeste se han reducido al mínimo para garantizar el confort en verano. Los datos del edificio Oeste se calcularon de acuerdo con el Reglamento francés RT2012 y pueden consultarse en la página web del Observatorio BEPOS (Cartier, 2021).



Imagen 41. Cubierta de Green Office Rueil.
Fuente: Bouygues Immobilier



Imagen 42. Fachada de Green Office Rueil.
Fuente: Bouygues Immobilier

Arkinova activity generator

Arkinova Activity Generator en Anglet (Imagen 43 y 44) es un edificio para l'Agglomération Côte-Basque-Adour con un programa mixto de oficinas, espacios de coworking y FabLab. Es un hub tecnológico dedicado a la eco-construcción, que reúne a jóvenes start-ups, empresas de I+D, arquitectos e ingenieros. Los materiales utilizados tienen una baja huella energética y de carbono, lo que permite que la estructura sea energéticamente positiva. Las estrategias de diseño pasivo priman sobre los medios técnicos. Así, la ventilación natural garantiza el confort estival; la envolvente tiene un aislamiento eficaz y optimiza las ganancias solares y luminosas (Perevozchikov et al., 2018; Agence Guiraud-Manenc, 2021).



Imagen 43. Arkinova activity generator.

Fuente: Vincent Monthiers.



Imagen 36. Arkinova activity generator.

Fuente: construction21.org Foto: Agence Guiraud-Manenc.

5.3.8 Pépinière d'entreprises en Montlieu la Garde.

Pépinière d'entreprises en Montlieu la Garde (Imagen 45 y 46) es actualmente uno de los dos edificios en la base de datos del Observatorio BBC que está certificado con el nuevo Bepos + Effinergie 2017. Este edificio es un vivero de empresas de la madera situado en la localidad de Montlieu la Garde. Su estructura es de madera maciza. Los datos se calcularon según RT 2012 - E+C y pueden consultarse en la base de datos del Observatoire BBC (2021).



Imagen 45. Cubierta de Pépinière d'entreprises.
Fuente: SODA Architectes ©STUDIO CUVILLIER



Imagen 46. Fachada de Pépinière d'entreprises.
Fuente: SODA Architectes ©STUDIO CUVILLIER

5.3.9 Elithis tower

La torre Elithis está situada en Dijon, Francia (Imagen 47 y 48) se diseñó para ser un PEB y, aunque no alcanzó el balance energético positivo, sigue siendo un ejemplo de buen balance energético y rendimiento económico y el primer edificio de oficinas de energía cero de Francia. Está equipado con más de 1.600 sensores para examinar y analizar todos los consumos. Tras un año de ocupación, se elaboró el primer informe energético. Los valores de consumo aumentaron debido a algunos factores. Se llegó a la conclusión de que la energía cero sólo podría alcanzarse mediante los usuarios y su comportamiento en el interior (Weiss et al., 2014; Le Moniteur, 2010; Perruchot, 2021).



Imagen 47. Fachada de Elithis tower.
Fuente: Alchemica/wikipedia



Imagen 48. Cubierta de Elithis tower.
Fuente: Alchemica/wikipedia

5.3.10 Pixel building

El edificio Pixel (Imagen 49 y 50) es el primer edificio de oficinas sin emisiones de dióxido de carbono y capaz de generar su propia energía y agua. Por ello, el proyecto Pixel se ha centrado más en el equilibrio de carbono que en la energía. Ocupó el primer puesto en el certificado concedido por el Green Building Council de Australia. En la fachada se ha instalado un sistema de jardineras perimetrales, lamas de sombreado fijas y paneles solares de sombreado, junto con tecnología de ventanas inteligentes para la refrigeración nocturna. La luz natural y la ventilación natural contribuyen a minimizar las necesidades energéticas del edificio (Esmore et al., 2011; Garde & Donn, 2014).



Imagen 49. Fachada de Pixel building.

Fuente: Ben Hosking



Imagen 50. Cubierta de Pixel building.

Fuente: Ben Hosking

5.3.11 Edificio ZERO

El Edificio Zero, situado en Hernani, Gipuzkoa, es un edificio corporativo de oficinas que forma parte del Campus Ideo, que conforma un conjunto de cuatro edificios codiseñados por el autor de esta investigación (Imagen 51 y 52). El edificio Zero ha sido certificado en LEED Oro y BREEAM Excellent, y ha obtenido el primer punto de Innovación BREEAM otorgado en España. Su estructura es singular y permite generar un voladizo de 1500m² en su parte frontal. El diseño paramétrico de la fachada permite adecuar la opacidad y las visuales de la fachada a su exposición solar. El edificio se diseñó bajo la filosofía NZEB y tiene una baja demanda energética, pero lo más destacable es que tiene su consumo de energía procede de fuentes 100% renovables y que genera una parte importante de la energía renovable en la propia parcela. La energía eléctrica se produce a través de los paneles solares fotovoltaicos BIPV integrados en su cubierta inclinada 15°, que está diseñada para maximizar la ganancia solar de los paneles fotovoltaicos. Se analizan los datos reales de monitorización de la energía en un artículo (Barrutieta, 2021). La energía medida corresponde al consumo real de energía durante todo un año de funcionamiento.



Imagen 51. Fachada del edificio Zero.
Fuente: Agustín Sagasti.



Imagen 52. Cubierta del edificio Zero.
Fuente: Agustín Sagasti.

5.3.12 UBA 2019

El edificio UBA 2019 fue diseñado y construido en Berlín como el primer edificio de energía neta cero del Gobierno Federal alemán (Imagen 53 y 54). El edificio solo requiere energía eléctrica, carece de combustión in situ de combustibles, y compensa la demanda energética mediante la conversión local de energía procedente de recursos energéticos renovables in situ. El rendimiento energético se controla continuamente en función de la demanda de energía de cada uso, la generación in situ de energía procedente de fuentes renovables y las condiciones interiores. Durante el primer año de funcionamiento, se observaron grandes diferencias entre las mediciones y la simulación en algunos usos de la energía, aunque la demanda global de energía eléctrica fue similar a la prevista. Las razones de esta diferencia de rendimiento son el comportamiento de los ocupantes y los patrones de uso del edificio. Además, la producción de electricidad medida a partir de energía fotovoltaica fue superior a la prevista, por lo que el edificio no se clasifica como de energía "cero", sino como de energía "plus" (Ascione et al., 2016).



Imagen 53. Fachada de UBA 2019.
Fuente: UBA.



Imagen 54. Cubierta de UBA 2019.
Fuente: BuGG.

5.3.13 Tablas resumen de datos energéticos y geométricos

A continuación, en las Tablas 2 y 3 se muestran los datos de energía y geometría correspondientes a cada uno de los casos de estudio presentados:

Project	Data type ¹	RE generation sources ²				Primary energy generation	Primary energy heating	Primary energy cooling	Primary energy electricity	Total primary energy consumption
		PV	ST	HP	CHP					
1. Powerhouse Brattørkaia	R+S	•		S		33.70	4.40	0.00	22.70	27.90
2. Freiburg New City Hall	R	•	•	G	x	63.50	17.10	0.90	46.30	64.30
3. Aspern IQ	R+S	•		G		50.40	21.60	7.36	-	50.82
4. Windkraft Simonsfeld AG	R+S	•	•	G		127.00	4.20	0.00	91.20	111.00
5. ArcheNEO	R	•		G		34.88	-	-	-	32.15
6. Green Office Meudon	R	•			•	101.00	33.80	1.60	37.40	88.56
7. Green Office Rueil (Ouest)	R+S	•		G		57.00	11.50	7.40	27.40	46.30
8. Arkinova Activity Generator	R+S	•		A		34.28	-	-	-	26.20
9. Pépinière d'entreprises	S	•		A	•	125.40	38.50	4.60	23.60	66.70
10. Elithis tower	R	•			•	40.67	11.00	10.00	35.50	65.00
11. Pixel building	R	•			x	84.00	8.40	75.20	39.40	123.00
12. The Zero Building	R	•	•	G	•	15.62	3.80	3.87	12.65	20.31
13. UBA	R	•	•	G		150.60	21.85	10.26	69.50	96.70

1- R- real, S- simulated (obtained from above mentioned websites)
2- PV- photovoltaic, ST- solar thermal, HP- heat pump (G- ground, A-air, S- seawater source), CHP- cogeneration heating plant (•- on biomass, x- on gas)

Tabla 2. Datos energéticos de los edificios estudiados.

Case study	GHI ¹	PV system ²	Data type	Installed PV area	Installed PV roof area	Installed PV façade area	Peak power	PV generation	PV generation/ m ²	Self-sufficiency
	kWh/ m ² .yr.	Roof/ façade	Real /sim	PV m ²	m ²	m ²	kWp	kWh/yr	kWh/ m ² .yr.	Egen/Econ, in %
1. Powerhouse Brattørkaia	747	Ri+ F	R+S	2867	1886	981	576.88	481 000	33.00	120.7
2. Freiburg New City Hall	1093	R +F	R	2164	185	1848	682.00	1 385 000	63.50	98.8
3. Aspern IQ	1122	R+F	R+S	1061	1300 total	-	144.80	369 230	50.40	99.2
4. Windkraft Simonsfeld AG	1122	R+F	R+S	382	242	137	47.00	110 092	127.00	114.4
5. ArcheNEO	1146	R+F	S	1300	1300	-	204.78	226 750	34.88	108.5
6. Green Office Meudon	1068	Ri +F	R	4200	2100	2100	601.50	-	101.00	114.0
7. Green Office RUEIL (Ouest)	1068	R	R+S	1904	1715	0	362.94	-	57.00	110.5
8. Arkinova Activity Generator	1265	R	R+S	600	190	0	59.00	-	34.28	130.8
9. Pépinière d'entreprises	1265	R	S	161	161	0	29.10	75 742	125.40	170.8
10. Elithis tower	1178	Ri	R	560	456	0	82.00	181 100	39.65	62.6
11. Pixel building	1583	R	R+S	38,4	38,4	0	6.30	19 965	23.88	68.3
12. The Zero Building	1171	Ri	R	1291	1291	0	230.00	273 380	15.62	76.9
13. UBA	985	R	R	391	391	0	66.30	177 351	150.55	155.7

1- Global horizontal irradiation (GHI): Long-term yearly average of yearly totals expressed in kWh/m².yr, obtained from the Energy Plus weather database for the capitals of regions
2- R- roof, Ri- roof integrated F- façade
3- R- real, S- simulated

Tabla 3. Datos relativo a la producción de energía fotovoltaica y superficie de los edificios estudiados.

5.4 Principales sistemas y estrategias de diseño de los PEB

El estudio comparado de los 13 proyectos seleccionados ha permitido identificar los sistemas y estrategias sostenibles más frecuentes en los edificios NZEB y PEB, así como detectar las fuentes de energías renovables más utilizadas.

La Tabla 4 muestra en su eje de ordenadas los diversos sistemas de soluciones sostenibles que incorporan los edificios estudiados, mientras que en el eje de abscisas contabiliza cuántos de los edificios lo incorporan en su diseño (Barrutieta, 2022). Se realiza además una distinción entre los edificios que según las fuentes bibliográficas se denominan NZEB o PEB para observar cambios y tendencias. Aunque en general se

puede considerar los PEB son una evolución más ambiciosa de los NZEB. Los principales resultados de este estudio comparado son:

- Todos los edificios de referencia analizados toman en consideración como soluciones sostenibles pasivas la geometría, la orientación y la envolvente, y todos excepto uno utiliza sistemas activos de control.
- Todos los edificios de referencia analizados toman en consideración como solución de energía renovable la energía fotovoltaica.
- Todos los edificios que incorporan fotovoltaica en fachada son PEB.
- Todos los edificios que incorporan la movilidad con bajas emisiones de carbono son PEB.
- Algunos edificios analizados todavía dependen de fuentes de cogeneración con combustibles fósiles (CHP fossil en la tabla 4), y pocos son 100% libres de emisiones.
- Todos cuentan con conexión a la red eléctrica. La conexión a la red eléctrica permite una generación distribuida más flexible y un vertido de la energía excedente a la red. La ausencia de conexión a la red se justifica solamente para los casos en los que la traída de la red resulta inviable, cosa que no sucede en ninguno de los casos estudiados.

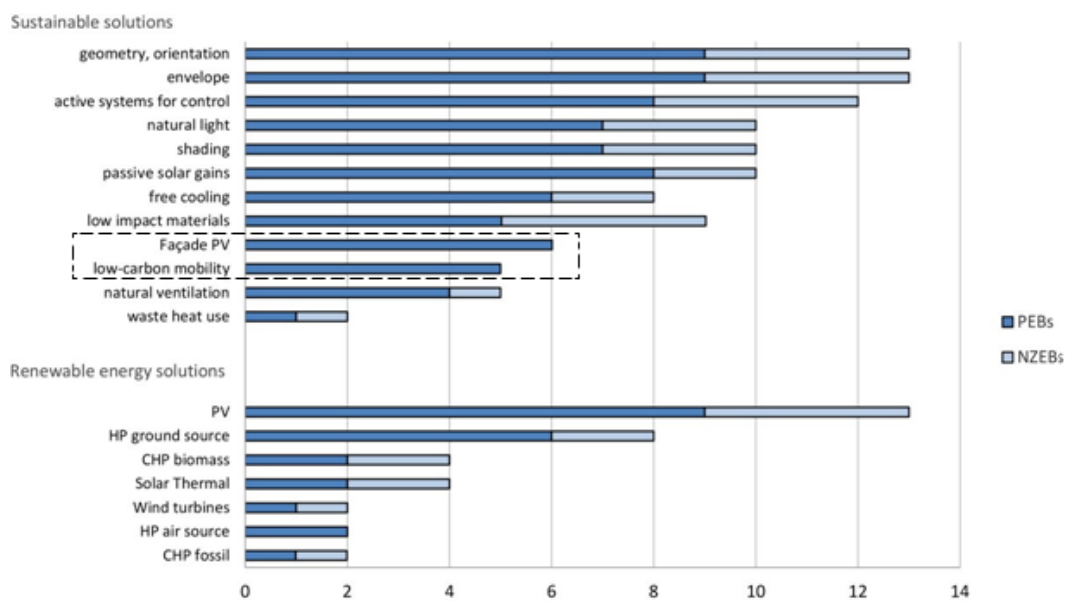


Tabla 4. Soluciones sostenibles y tipos de energías renovables implementadas en los casos estudio analizados.

5.5 Autosuficiencia energética a través de sistemas fotovoltaicos

Todos los edificios estudiados integran sistemas solares fotovoltaicos. Se trata de una tecnología conocida, probada y relativamente sencilla. Pero, además, es una tecnología de futuro que está en continua evolución, y que ahora afronta, entre otros, el reto de mimetizarse e integrarse con la arquitectura para ampliar su campo de aplicación a través de los BIPV (Building Integrated Photovoltaics). Al ser una fuente de energía eléctrica y no térmica, ofrece un amplio abanico en cuanto a las formas y sistemas a través de los cuales se puede consumir esa energía producida en el edificio.



Imagen 55. Edificio Laboratorio ZEB con sistema de captación solar fotovoltaica en fachada y cubierta, una colaboración entre NTNU y Sintef, en Trondheim, Noruega.

Fuente: <https://www.veidekke.com/projects/zeb-flexible-lab/>

Los casos de estudio investigados son edificios de oficinas en climas oceánicos, con el objetivo evaluar una relación óptima entre el área fotovoltaica tanto en la cubierta como en la fachada, el área neta del suelo del edificio y los índices de autosuficiencia energética alcanzados.

Para este caso particular se pueden apuntar varias conclusiones:

- Los edificios de oficinas corresponden a una tipología de edificios que, debido a que su ciclo de uso se aproxima mucho al ciclo solar, aprovecha muy bien los sistemas fotovoltaicos sin necesidad de almacenamiento eléctrico.
- En edificios de tipología de oficinas, y debido, entre otros, a su demanda de energía y la ratio entre forma y envolvente que los edificios, se constata que los sistemas de captación integrados aplicados en fachadas resultan necesarios para

cumplir los objetivos de autosuficiencia energética a partir de una determinada altura.

- La captación solar sobre la piel de los edificios conlleva una necesaria convivencia con elementos constructivos de otra índole más allá de los previstos en cubierta. La tecnología está en plena evolución desde los BAPV a los BIPV. Por tanto, se prevé un aumento de los componentes y sistemas constructivos que aúnen tanto los objetivos constructivos como de la captación solar. No obstante, quedan no pocos aspectos por resolver, como la seguridad en aplicación de estos sistemas, así como la normativa de aplicación específica, que deberá evolucionar para cubrir los vacíos existentes de manera rápida.

La energía fotovoltaica como tecnología visible en el propio diseño influirá cada vez más en la percepción del lenguaje arquitectónico contemporáneo de nuestro entorno construido. Como resultado, poco a poco se está transformando de un mero componente de generación de energía a un elemento de la cultura arquitectónica y su compromiso con la transición del modelo energético.

5.6 Relaciones entre indicadores energéticos y de diseño arquitectónico.

La eficacia del diseño de edificios con energía positiva (PEB) depende en gran medida de un enfoque equilibrado entre el diseño del edificio y su rendimiento energético.

En una primera investigación (Barrutieta, 2022) se han analizado algunos parámetros de los edificios casos de estudio seleccionados, como los relacionados con la superficie útil climatizada y la capacidad de captación de energía. La relación entre parámetros se ha ilustrado mediante tablas, que muestran que:

La mayoría de los sistemas fotovoltaicos de los edificios tienen una superficie equivalente al 10-20% de la superficie neta total del edificio (Tabla 5).

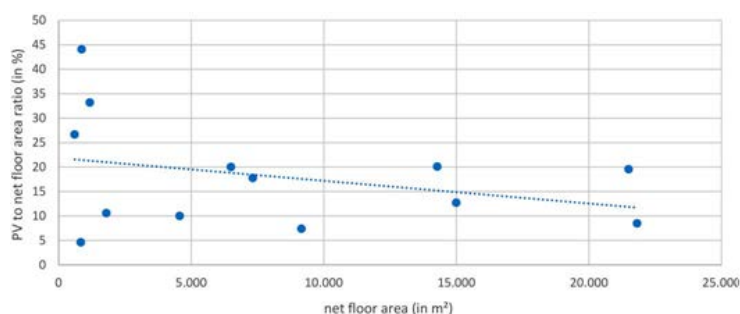


Tabla 5. Relación entre el % de la superficie de paneles fotovoltaicos respecto a la superficie construida, y la superficie total construida.

- Los edificios estudiados que tienen una relación fotovoltaica/área del 13 al 20 % son autosuficientes del 100 al 150 % (Tabla 6).

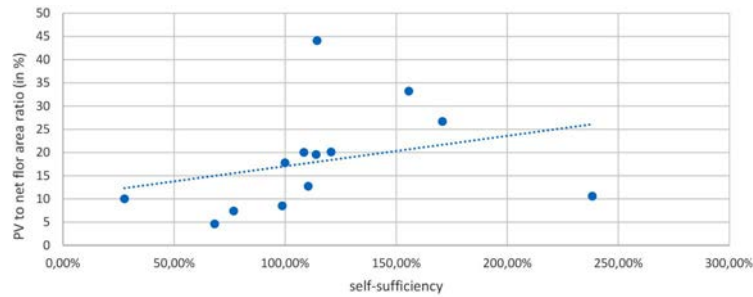


Tabla 6. Relación entre el % de la superficie de paneles fotovoltaicos respecto a la superficie construida, y el grado de autosuficiencia energética del edificio.

- Los edificios que alcanzan una autosuficiencia energética cuentan con una ratio del 20% o más de superficie de captación fotovoltaica en relación con su superficie útil (Tabla 6).
- Los edificios ubicados en sitios con mayor GHI tienden a tener índices de área fotovoltaica más bajos (Tabla 7).

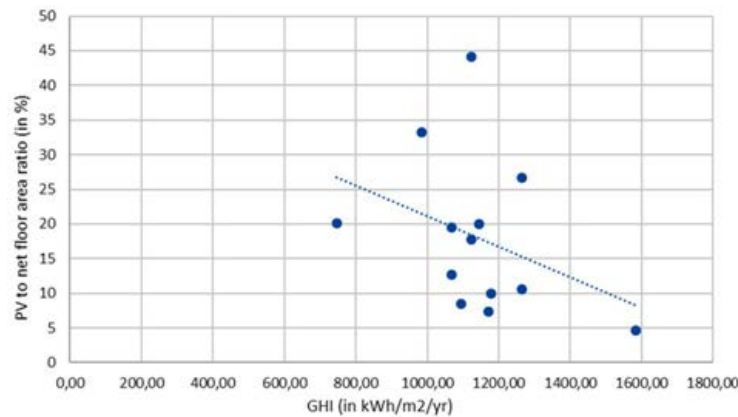


Tabla 7. Relación entre el % de la superficie de paneles fotovoltaicos respecto a la superficie construida, y la radiación global horizontal de la localización del edificio.

- La instalación fotovoltaica en las fachadas resulta decisiva para alcanzar un balance energético positivo. La relación entre el sistema fotovoltaico instalado en la fachada y el sistema fotovoltaico en el tejado es del 50 al 57 % para los edificios estudiados.

5.7 Propuesta y selección de KPIs

Vistos estos resultados de la primera investigación, se considera que puede ser crítico introducir en el análisis una serie de parámetros que tengan en cuenta factores relacionados con el propio diseño formal del edificio, ya que podría favorecer o perjudicar

notablemente la consecución de estos objetivos de autosuficiencia energética desde un estado temprano del diseño.

Por tanto, para poder avanzar con esta hipótesis, y ya que no ha sido posible obtenerlos de ninguna otra fuente y de forma homogénea y comparable, se ha realizado un modelo tridimensional volumétrico de cada uno de los edificios (Tabla 8).












3D model ¹	Case study data and location Year, location, coordinates, latitude (DD), climate zone, PEB/NZEB, awards/ certifications, data sources	Geometrical data					
		Net floor area m ²	Building footprint m ²	Roof area m ²	Façade area m ²	Envelope area ² m ²	Volume m ³
	1. Powerhouse Brattørkaia 2019, Trondheim, Norway 63°25'49.8", lat. 63.43; * PEB, office [57]	14 280	2 433	2 174	6 860	9 033	55 790
	2. Freiburg's New City Hall 2017, Freiburg, Germany 47°59'45", lat. 47.998; Cfb PEB, administrative Climate Positive 2019 [58], [59]	21 819	4 491	3 159	9 980	13 140	76 609
	3. Aspern IQ 2012, Aspern, Austria 48°13'2.4", lat. 48.22; Cfb PEB, technology centre TOB, klimaaktiv GOLD [60], [61]	7 326	2 535	2 299	4 387	6 685	29 903
	4. Windkraft Simonsfeld AG 2014, Ernstbrunn, Austria 48°31'33.6", lat. 48.53; Cfb PEB, office klimaaktiv GOLD [62], [63], [61]	867	562	1 034	1 866	2 899	4 883
	5. ArcheNEO 2017, Kitzbühel, Austria 47°30'0.00", lat. 47.45; Dfb PEB, office	6 500	2 126	2 126	3 151	5 277	16 204
	8. Arkinova Activity Generator 2016, Anglet, France 43°28'53.05, 43.48; Cfb PEB, office Beos Effinergie 2013, HQE, BREEAM Pass [68], [69]	1 800	1 236	1 298	1 461	2 759	8 808
	9. Pépinière d'entreprises (Business Incubator) 2018, Montlieu la Garde, France 45°14'45", 45.25; Cfb PEB, public office BEPOS+ effinergie 2017-E4C1 [70]	604	635	649	629	1 279	2 216
	10. Elithis tower 2009, Dijon, France 47°19'0.01", 47.32; Cfb NZEB, office [65], [71], [72], [73]	4 567	419	499	3 119	3 617	15 368
	11. Pixel building 2010, Melbourne, Australia -37°48'50", 37.84 (S); Cfb NZEB, office LEED Platinum [74], [65], [75]	837	275	275	913	1 188	3 095
	12. The Zero Building 2013, San Sebastian, Spain 43°17'30.52", 43.31; Cfb NZEB, office LEED Gold, BREEAM Excellent [76]	9 160	3 185	5 044	5 799	12 939	53 366
	13. UBA 2013, Berlin, Germany 52°31'27", 52.52; Dfb NZEB, administrative [77]	1 178	663	813	838	1 650	5 072

Tabla 8. Listado de los 13 edificios casos de estudio con su imagen volumétrica y los principales datos geométricos.

De estos modelos se han obtenido mediciones de superficies de envolvente, tanto de fachadas como de la cubierta (Tabla 9).

Case study	Basic Ratios							Power per m ² net floor area	Egen/GHI
	Compacity V/A	HEI	Roof/ façade	Self-sufficiency	PV m ² r/ PV m ² faç	PV r-con	PV r-env		
	m ³ /m ²	m ² /m ²	m ² / m ² , in %	Egen/Econ, in %	m ² / m ²	m ² / m ² , in %	m ² / m ² , in %		
1. Powerhouse Brattørkaia	6.18	5.87	31.7	120.7	1.92	20	32	40.4	4.4
2. Freiburg's New City Hall	5.83	4.86	31.7	98.8	0.17	10	17	31.3	5.8
3. Aspern IQ	4.47	2.89	52.4	100.0	-	14	16	19.8	4.5
4. Windkraft Simonsfeld AG	1.68	1.54	55.4	114.4	1.77	44	13	54.2	11.3
5. ArcheNEO	3.07	3.06	67.5	108.5	-	20	25	31.5	3.0
6. Green Office Meudon	5.35	5.37	34.6	114.0	1.00	20	27	28.0	9.5
7. Green Office Rueil (Ouest)	6.07	5.26	28.5	110.5	x	13	16	24.2	5.3
8. Arkinova Activity Generator	3.19	1.46	88.9	130.8	x	33	22	32.8	2.7
9. Pépinière d'entreprises	1.73	0.95	103.2	170.8	x	27	13	48.2	9.9
10. Elithis tower	4.25	10.91	16.0	62.6	x	12	16	18.0	3.5
11. Pixel building	2.61	3.04	30.1	68.3	x	5	3	7.5	1.5
12. The Zero Building	4.12	2.88	87.0	76.9	x	7	10	25.1	1.3
13. UBA	3.07	1.78	97.0	155.7	x	33	24	56.3	15.3

- no data available for PV area
x the building has no PV on the façade, therefore the ration cannot be calculated

Tabla 9. Ratios básicas que relacionan los aspectos formales, de localización y energéticos aplicados a los casos de estudio.

Una vez incorporados estos datos al análisis, en la fase siguiente se ha investigado sobre los posibles parámetros que pueden sintetizar las interdependencias entre los cuatro campos que son relevantes para el proceso de diseño de PEB:

- Factores climáticos y de localización.
- Consumo de energía.
- Generación fotovoltaica in situ.
- Diseño geométrico y volumétrico del edificio.

De entre ellos se han seleccionado varios por su relevancia y capacidad de síntesis, a fin de condensar la investigación en una serie de indicadores de referencia o KPIs que pueden ser de utilidad en la toma de decisiones dentro del proceso de diseño.

El proceso de la selección de indicadores se ha desarrollado en varias fases, que para mayor claridad se han nombrado de la A a la G (Tabla 10):

- En las fases de A a D se incorporan los datos climáticos, de diseño formal y los de generación y consumos energético, obteniendo unas ratios básicas por cada uno de los cuatro campos mencionados anteriormente.
- En la fase E se combinan las ratios básicas para obtener nuevos parámetros que interrelacionan los cuatro campos. Para ellos se utilizan multitud de gráficos de doble entrada donde se identifican las tendencias, los límites, las agrupaciones de datos y las medias aritméticas (R).
- En la fase F se realiza un análisis en profundidad de cada uno estos gráficos, su nivel de información y relevancia, y de entre ellos se seleccionan 10 KPIs teniendo en cuenta su interés y peso relativo en el proceso de toma de decisiones de un anteproyecto arquitectónico. El proceso de identificación y selección de los KPIs se desarrolla en uno de los artículos (Barrutieta, 2023).
- Finalmente, la investigación se sintetiza en el marco de toma de decisiones en la fase G que propone una secuencia de indicadores para la fase de diseño de anteproyectos de edificios PEB, que se detalla en el siguiente apartado.

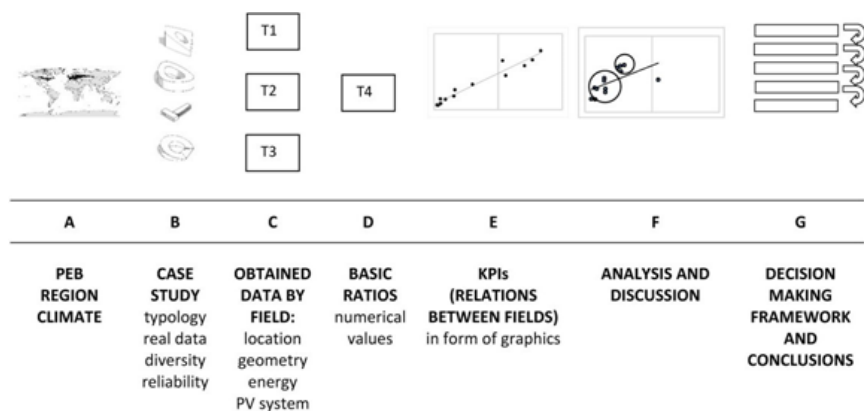


Tabla 10. Proceso de definición de los KPIs en base de la combinación datos de los casos de estudio analizados, y su síntesis en un marco de toma de decisiones tempranas para proyectos PEB

5.8 Marco de aplicación práctica al diseño inicial de un PEB

El objetivo de la investigación es crear un marco de toma de decisiones que se puede aplicar secuencialmente en la fase de anteproyecto de un PEB proporcionando límites, umbrales y cifras útiles que guían hacia decisiones arquitectónicas efectivas para la integración del sistema fotovoltaico en el proceso inicial de diseño de PEB.

Para ello, se han elaborado 10 KPIs (Key Performance Indicators) que se ordenan secuencialmente, y, por tanto, se pretende que sirvan de guion para la toma de decisiones. En cada una de las tablas, los casos de estudio se identifican por los números del listado de las tablas anteriormente mostradas.

- 1- El proceso de diseño arquitectónico habitual comienza estudiando la situación de la parcela y decidiendo sobre la superficie construida y la ocupación en planta del edificio. El parámetro que relaciona los dos factores a escala de edificación es el índice de altura HEI, que se define como relación entre FAR (Floor Area Ratio (edificabilidad)= $m^2_{construidos}/m^2_{parcela}$) y COV (Coverage factor (ocupación)= $m^2_{ocupados}/m^2_{parcela}$) (Mortimer & a+t, 2015). Para los fines de esta investigación, se ha buscado un índice sin vínculo con ningún área de parcela específica, porque el objetivo es estudiar la densidad relativa del edificio para un área de ocupación determinada sin limitar su forma y altura. Al dividir ambos índices desaparece el factor $m^2_{parcela}$. Para los siguientes gráficos se ha tomado un valor numérico para HEI, tal y como se indica en la tabla precedente. Según la investigación realizada, las ubicaciones de los PEB estudiados siguen una línea de tendencia media. Los PEB autosuficientes analizados presentan un factor de HEI amplio que va de 1 a 6. (Tabla 11)

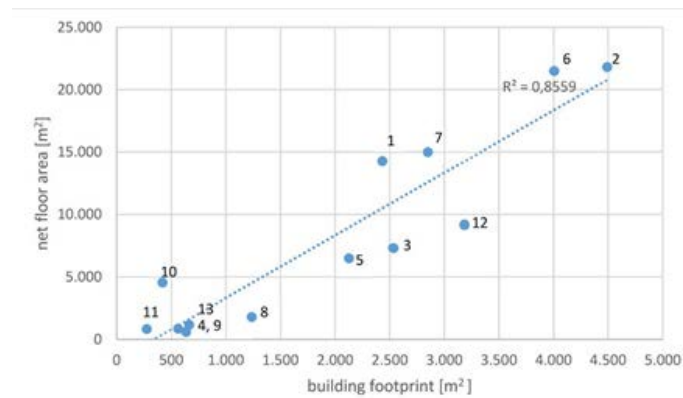


Tabla 11. Gráfico que muestra el factor HEI, como relación entre FAR/COV.

- 2- Definir la forma preliminar del edificio implica tomar decisiones de diseño arquitectónico relativas al volumen y la envolvente del edificio, y el factor Compacidad/HEI define esta relación. Cuanto más alto sea el edificio, más superficie envolvente tendrá. Este gráfico muestra diferentes tipos de edificios según su diseño geométrico, ayudando a identificar estrategias para lograr diseños de PEB. Un valor HEI bajo (hasta 3) se refiere a edificios típicamente ramificados de poca altura que pueden tener un área de techo relativamente alta con poca compacidad. Por el contrario, se puede identificar otro grupo de casos de estudio con mayor compacidad y valores de HEI más elevados (hasta 6), siendo estos edificios compactos de media altura. (Tabla 12)

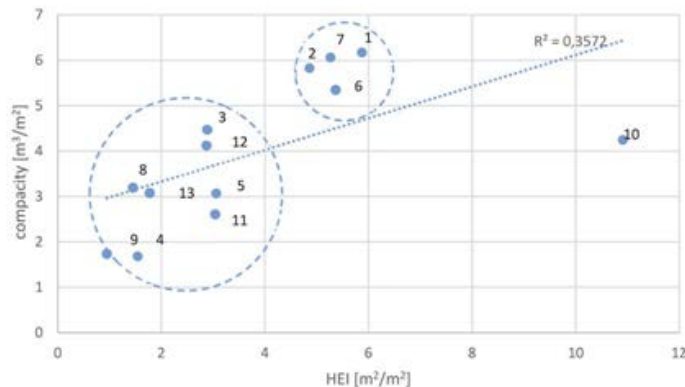


Tabla 12. Gráfico que muestra la relación entre la compactación y el factor HEI.

- 3- Un objetivo clave para los PEB es lograr la autosuficiencia energética (Ess%). Llegados a este punto, resulta interesante contrastar el factor HEI con el Ess% de los edificios del caso de estudio para encontrar las posibles limitaciones derivadas del diseño geométrico. Los índices de autosuficiencia son más altos en los estudios de casos de bajo índice de altura (HEI). Desde el punto de vista del diseño, cuanto mayor sea el factor HEI, más difícil puede ser lograr un alto porcentaje de autosuficiencia energética debido a la falta de superficie de techo disponible. Vale la pena señalar que tres de los cuatro edificios analizados con mayor HEI que alcanzan objetivos de autosuficiencia integran paneles fotovoltaicos en fachada (puntos en rojo). Por lo tanto, se puede concluir que cuanto mayor sea la HEI, más difícil será alcanzar los objetivos de autosuficiencia energética por las condiciones de la forma del edificio. Por tanto, más allá de una ratio HEI de 5, la fachada debe tenerse en cuenta como captador solar en el diseño del edificio (Tabla 13).

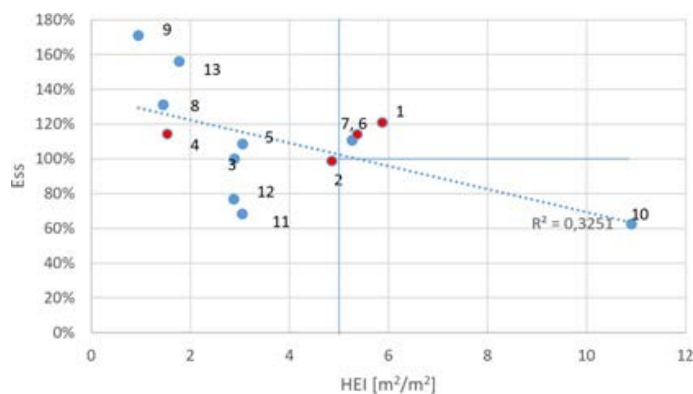


Tabla 13. Relación entre el porcentaje de autosuficiencia energética del edificio y el factor HEI.

- 4- Según los estudios de caso, sólo los edificios con una relación cubierta-fachada superior al 28% alcanzaron el 100% de autosuficiencia. La correlación de estos dos factores es directamente proporcional, es decir, cuanto mayor sea la relación

cubierta-fachada, mayor será el porcentaje de autosuficiencia que se puede alcanzar (Tabla 14).

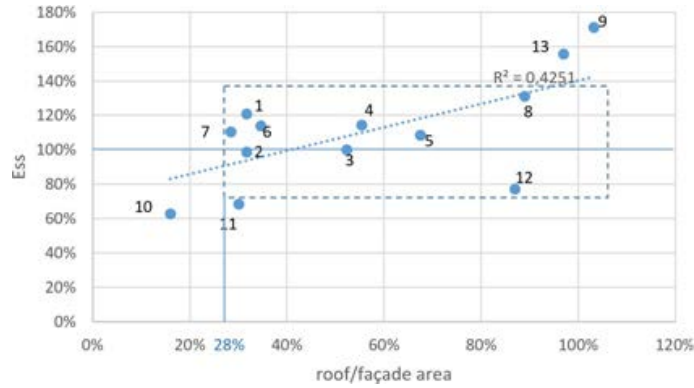


Tabla 14. Relación entre el porcentaje de autosuficiencia energética del edificio y el cociente área cubierta/fa- chada.

- 5- Para definir el área para los sistemas fotovoltaicos y su integración en la envolvente del di- seño del edificio, tanto para el tejado como para la fachada, es relevante la relación Roof-Faç (ratio de superficie de techo entre superficie de fachada) vs PVr/PVf (área fotovoltaica en cubierta entre área fotovoltaica en fachada), que define la capacidad de integración fotovoltaica en la envolvente del edificio. En el gráfico de análisis se incluyen solamente aquellos edificios que disponen integración fotovoltaica en fachada. Se observa la tendencia de que en el caso de los PEB la superficie de la cubierta es entre el 30% y el 60% de la superficie de las fachadas, mientras que la ratio para la captación fotovoltaica entre cubierta y fachada se sitúa en un rango entre 1:1 y 2:1. (Tabla 15).

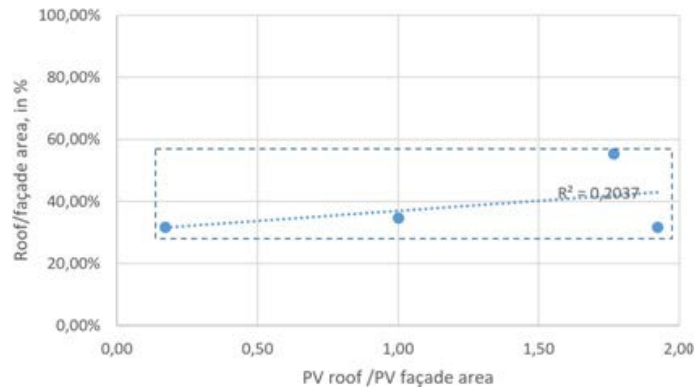


Tabla 15. Relación entre el ratio superficie techo/fachada y el ratio superficie de fotovoltaica en cubierta/fachada

- 6- La superficie fotovoltaica referenciada a la superficie neta del edificio, PVr-con, respecto al índice de altura HEI resulta en un KPI interesante a comprobar en el diseño de los PEB (Tabla 16). En el gráfico de análisis se pueden diferenciar principalmente dos situaciones:

- Para HEI 2 hasta PVR-con 25% o superior. Son edificios de poca altura con mucha captación en cubierta. Son los que tienen más % de ESS autosuficiencia, pero a su vez, son los que tienen poca superficie construida. Por tanto, es una estrategia eficaz para edificios de hasta 1.800m² de superficie útil.
- Para HEI 6 hasta PVR-con 15% o superior. Se trata de edificios de mediana altura con más superficie proporcional de fachada y menos de cubierta. En este caso, se debe considerar la integración fotovoltaica en fachada para conseguir los objetivos PEB. Los edificios estudiados incluidos en este rango tienen una superficie útil de hasta 20.000m². Se debe tomar en consideración la estrategia de diseño aplicada en varios casos de estudio, que incluye planos de fachada-cubierta inclinados optimizados para la aumentar la captación de energía solar. Un factor HEI cercano a 6 también puede permitir un índice de integración del área fotovoltaica (PVR-con) del 20%, como es el caso de Powerhouse Brattørkaia. El diseño del edificio se moldeó modelando planos de tejados y fachadas convencionales e inclinándolos para lograr un ángulo óptimo para la irradiación solar. El edificio Zero es otro ejemplo de esta estrategia de diseño.
- Para HEI superiores a 6 no ha resultado posible obtener casos de estudio que cumplan con el objetivo de autosuficiencia energética.

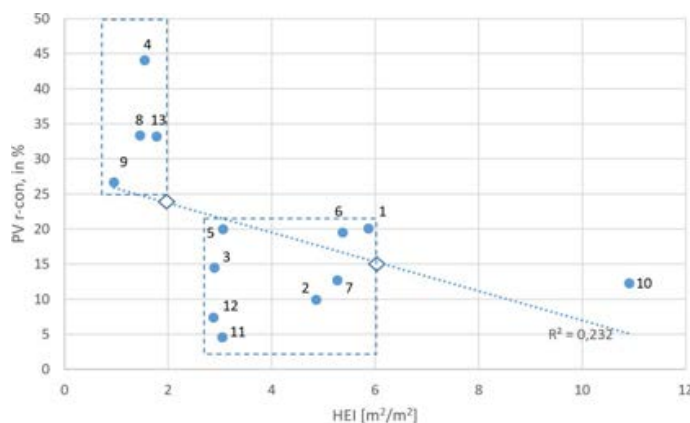


Tabla 16. Relación entre el porcentaje de superficie fotovoltaica respecto a la construida, y el factor de altura HEI.

- 7- La superficie fotovoltaica referida al área envolvente del edificio, PVR-env y el índice de compacidad están relacionados en este gráfico que brinda información sobre la optimización de la envolvente del edificio (Tabla 17). Los edificios más compactos tienen una superficie relativa de envolvente más pequeña, por lo que se necesita una mayor optimización de la envolvente para lograr la autosuficiencia energética. Cinco de los edificios del estudio de caso utilizan más del 20% de su envolvente para BIPV, uno alcanza el 27% y otro casi el 32%. Estos ejemplos incluyen paneles fotovoltaicos en su fachada. Una cifra adecuada para el diseño de un edificio PEB será cercana a la definida por la línea de tendencia por estos dos puntos:
- Para una Compacidad 2= PVR-env 13%
 - Para una Compacidad 6= PVR-env 22%

En el gráfico se puede identificar un posible límite inferior que indica una relación PVr-env del 13%, que incorpora 11 de 13 estudios de caso.

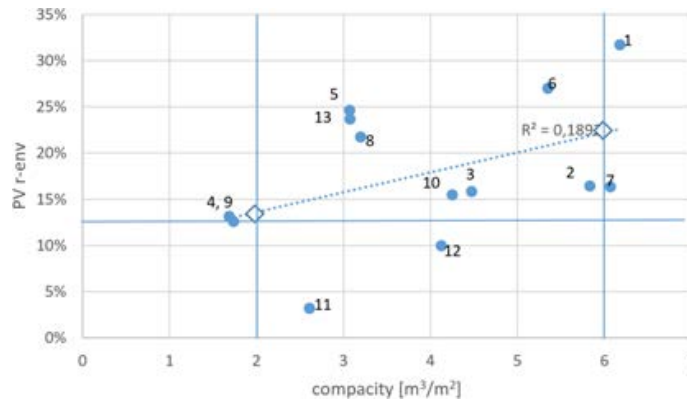


Tabla 17. Relación entre la superficie fotovoltaica de la envolvente y la compacidad del edificio.

8- La capacidad de la envolvente para lograr la autosuficiencia energética se mide a través de este KPI que relaciona la ratio de superficie fotovoltaica de la envolvente con el porcentaje de autosuficiencia energética del edificio, PVr-env/Ess% (Tabla 18), que completa el argumento del KPI anterior. Como se observa en la gráfica, ninguno de los edificios analizados alcanza el 100% de autosuficiencia con una ratio PVr-env inferior al 13%, el cual podemos identificarlo como un umbral inferior de referencia para el diseño eficaz de un edificio de energía positiva. La mayoría de los casos de estudio analizados presentan valores superiores al 15%. Vale la pena mencionar que uno de los casos de estudio logra un diseño de edificio con un área fotovoltaica que llega al 33% de la envolvente total.

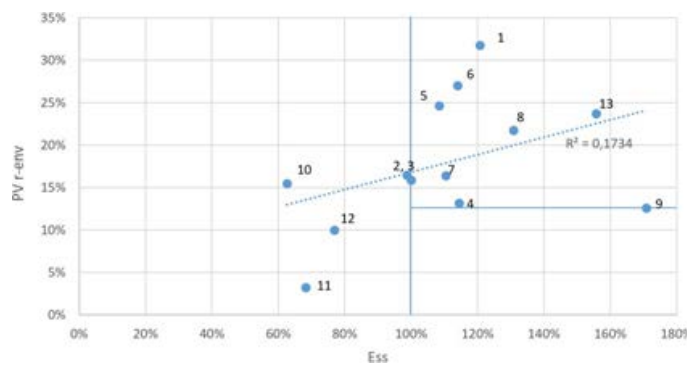


Tabla 18. Relación entre el ratio de superficie fotovoltaica de la envolvente con el porcentaje de autosuficiencia energética del edificio

9- De los casos de estudio PEB analizados en la investigación se puede observar que la potencia instalada del sistema fotovoltaico con relación a la superficie del

edificio resulta ser en torno a 30 kWp por cada 1.000m² construidos, o 30 Wp/m², incluyendo tanto los paneles de cubierta como los de fachada. Esta tendencia resulta muy homogénea para todos los casos de estudio, tal y como indica la línea de tendencia del KPI, con un $R^2=0.935$ (Tabla 19). El edificio que más destaca de la media es Powerhouse Brattørkaia con 40,4 Wp/m².

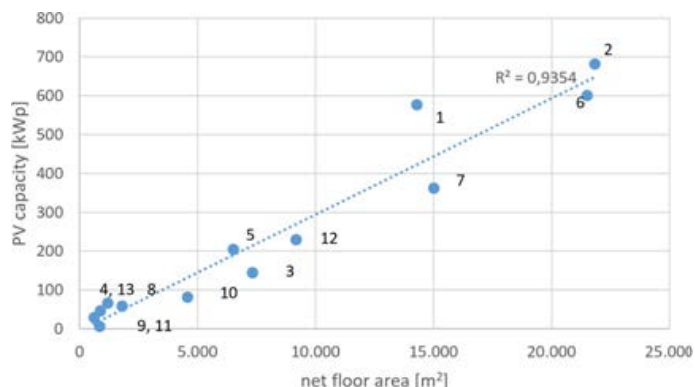


Tabla 19. Relación entre la potencia instalada del sistema fotovoltaico en relación con la superficie del edificio

10-Este proceso de toma de decisiones concluye comprobando la relación generación de energía esperada vs. irradiación global horizontal con el KPI Egen/GHI (Tabla 20). Los estudios de caso de PEB tomados para esta investigación muestran una variedad de soluciones de diseño, como se muestra en este gráfico. La generación de energía a partir de paneles fotovoltaicos por superficie neta (Egen) puede alcanzar en algunos casos hasta 150 kWh/m²y, pero para un valor de irradiación entre 1000 y 1300 kWh/m²a que corresponde a las zonas climáticas Cfb y Dfb, una buena cifra estaría por encima de 70 kWh/m²y.

Es interesante notar que se pueden identificar dos grupos principales de edificaciones, uno debajo de esta cifra y otro con una generación de energía superior a esta cifra, incluyendo edificios con techos horizontales extensos. Su alta generación de energía fotovoltaica está relacionada con una alta potencia instalada por m² y altos ratios PVR-env. Obsérvese también que el edificio situado en la situación más favorable respecto a la irradiación solar se encuentra mucho más allá de la generación esperada y, en tercer lugar, que un edificio ubicado en un lugar con una GHI muy escasa puede alcanzar la generación de energía recomendada.

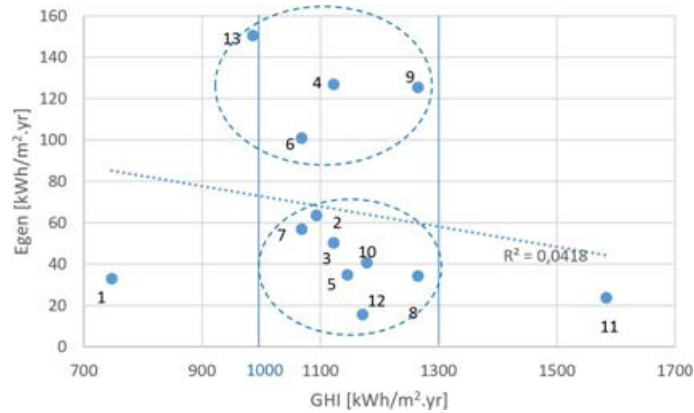


Tabla 20. Relación entre la generación de energía esperada y la irradiación global horizontal.

En conclusión, la eficacia del diseño de PEB depende en gran medida de las primeras decisiones con respecto al diseño de la envolvente, la orientación y los factores de ubicación. Varios factores que son relevantes en cuanto al diseño formal del edificio como la altura, el área de la envolvente y la compacidad tienden hacia diferentes estrategias de maximización, y por eso es necesario buscar el mejor equilibrio entre ellos.

Con la ayuda de la base de datos generada a través de casos de reales de edificios de oficinas en climas oceánicos se han seleccionado 10 KPIs novedosos y específicamente diseñados para su aplicación en el diseño de edificios de energía positiva que definen límites, umbrales y cifras útiles que guían hacia decisiones arquitectónicas efectivas para la integración del sistema fotovoltaico en el proceso inicial de diseño de PEB (Tabla 21).

Outline of the decision-making framework

KPI	PEB design range/ value	Comments
HEI	1 - 6 (most of the case studies)	If HEI ≥ 5 → BIPV is needed
Compacity to HEI relation	Low HEI to low compacity and vice versa	
Roof/façade area ratio	>28% to achieve 100% Ess	Roof/faç is directly proportional to Ess If roof/faç is 30-60% → PV façade needed
PV r-con	For HEI 1= PVr-con 25 or higher For HEI 6= PVr-con 15 or higher	
PV r-env	≥15%, up to 33% ≥30%	>13 for compacity = 2 >15 for compacity = 6
Wp/m²	+ 30	Including both roof and façade
Egen	+70 kWh/m².y	PEB office

Tabla 21. Síntesis de los umbrales propuestos por la herramienta de toma de decisiones para el diseño de los PEB.

La base de datos permite además incorporar más datos a través de nuevos casos de estudio y, por tanto, está abierta a posibles evoluciones de la investigación, incluso para su aplicación en otras tipologías edificatorias.

5.9 Próximas líneas de investigación

Los KPIs propuestos son una herramienta de diseño práctica a nivel de anteproyecto y su objetivo es que sean fáciles de aplicar, de forma que incluso pueden ser un requisito para el diseño de edificios o conjuntos de energía positiva, e incluirse como parámetros de diseño edificatorio o urbano en los documentos de planificación.

Para ello, se podría incorporar la base de datos desarrollada en herramientas digitales BIM que permitan alimentar de forma fluida dentro de una misma plataforma la aplicación de los KPIs identificados y los umbrales analizados. Existen actores que investigan en la incorporación de herramientas digitales para apoyar el despliegue de la tecnología fotovoltaica a costo reducido (Saretta et al., 2022), así como en el desarrollo comercial softwares de simulación 3D para arquitectura solar como BIMsolar (2024) de EnerBIM, que hacen hincapié en la parte de toma de decisiones de diseño solar aplicado a las fases tempranas del proyecto.

El factor de la escala de intervención es un aspecto importante a tener en cuenta. Los KPIs identificados para su aplicación en edificios podrían evolucionarse hacia una escala de distrito apoyándose en investigaciones previamente realizadas sobre la sostenibilidad la escala de las células urbanas (Barrutieta, 2010). Cabe señalar que un amplio número de programas europeos pro- mueven la implementación de PEB y distritos de energía positiva (PED). Por citar algunos, el Programa de Distritos y Barrios de Energía Positiva (PED Program) establecido en 2018 (PED, 2023) y el Anexo 83 de la IEA EBC (Hedman et al., 2021).

El desarrollo natural de la investigación sería tomar esta investigación y los KPIs identificados como base para otras tipologías con patrones de diseño energético similar, como la de los edificios docentes y terciarios, y aquellos con una ocupación y/o demanda energética principalmente diurna. Finalmente, se deberían abordar soluciones para otras tipologías, donde el patrón de los consumos de energía, los condicionantes de diseño de la envolvente y la capacidad de captación solar fotovoltaica tendrán diferentes claves. En otras tipologías los patrones de generación y consumo de energía serán diferentes a los estudiados aquí y, por tanto, deberían también tenerse en cuenta otros factores y tecnologías complementarias como el almacenamiento de energía y el intercambio bidireccional de energía con la red.

6 CONCLUSIONES

Esta tesis aborda el diseño arquitectónico de los PEB y su objetivo de lograr la autosuficiencia energética maximizando el uso de la captación solar fotovoltaica en toda su envolvente.

Para ello se ha centrado en el caso tipológico de los edificios de oficinas en el clima oceánico proponiendo una herramienta para la toma temprana de decisiones de diseño que permite verificar la consecución de los objetivos de autosuficiencia en la etapa de

anteproyecto. La visión particular de la investigación tiene su propio resultado en la herramienta de evaluación temprana aplicada a los diseños PEB. Las conclusiones generales se sintetizan en tres ámbitos que se abordan en la tesis, y que responden también a su título:

6.1 Autosuficiencia energética

Los edificios están evolucionando hacia convertirse en entidades autónomas generadoras de su propia energía y de su entorno próximo, lo que implica una reevaluación de las prioridades en cuanto a la integración de sistemas renovables y la organización espacial de los propios edificios.

No fósil

Nos encontramos inmersos en una era donde el cambio climático y la necesidad imperante de minimizar la emisión de gases de efecto invernadero globalmente marcan el ritmo de nuestras acciones. Es clave el abandono de las energías de origen fósil durante la vida de los edificios y una transición energética hacia fuentes de energía renovables. Tras realizar la investigación, se observa que a día de hoy la dificultad reside en cómo diseñar esta transición a escala de los propios edificios para hacer realidad esta transformación (Imagen 57).



Imagen 57. El proyecto Orona Ideo es una muestra de que es posible realizar proyectos sin hacer uso de combustibles fósiles.

Foto: Agustín Sagasti.

Datos

En este proceso es clave la capacidad de medir el rendimiento energético de los edificios, de analizar los datos obtenidos, de sugerir mejoras sustanciales y de fomentar un aprendizaje constante derivado de estas prácticas. No obstante, se ha constatado

que resulta complicado obtener datos consistentes para analizar los casos de estudio de forma comparativa.

Urbano

Es preciso estudiar el funcionamiento energético de los edificios de forma individual, pero además es preciso buscar sinergias desde el punto de vista técnico y funcional en un conjunto más amplio a modo de célula urbana. Una escala reducida conlleva limitaciones en las soluciones a plantear, que se pueden superar ampliando el foco del edificio al bloque, la manzana, el distrito o el barrio.

Tipologías

El objetivo de obtener edificios energéticamente autosuficientes resulta más fácilmente alcanzable en las tipologías que tienen un régimen de uso en sincronía con el recorrido solar diurno como los edificios de oficinas, y que por lo tanto pueden aprovechar gran parte de la energía generada a través del sol sin necesidad de un almacenamiento. Estos edificios de oficinas ofrecen menos restricciones tipológicas para el diseño arquitectónico de la envolvente y sus promotores son generalmente más proactivos a la hora de optar por diseño más innovadores.

6.2 Integración solar fotovoltaica

¿Por qué cubrir grandes extensiones de tierra que son aptas para la agricultura y la ganadería con granjas solares, mientras que tenemos una ingente superficie de cubiertas de edificios ociosas, precisamente encima de los principales puntos de consumo de esa energía?

Solar

La energía fotovoltaica proporciona un suministro energético cómodo y duradero, generando electricidad a partir del sol, de forma silenciosa, sin emisiones y prácticamente sin mantenimiento.

Integración en edificios

La solar fotovoltaica es la fuente de energía renovable que se incluye en todos los casos de estudio analizados. La energía fotovoltaica integrada en edificios ha encontrado su aplicación ideal, porque se genera allí donde se necesita electricidad y donde se pueden aprovechar las superficies y las instalaciones eléctricas existentes. Estas soluciones deberían integrarse prioritariamente en las cubiertas y las fachadas de los edificios, y en particular en todos los de nueva construcción y en aquellos con gran superficie de envolvente y con pocas dificultades de integración. El nivel de aplicación de las tecnologías fotovoltaicas actuales (Imagen 58) todavía están muy por detrás de

su potencial real, aunque los fabricantes ya pueden ofrecer diversas tecnologías y productos (Bernhard et al., 2010). Las razones de su lento desarrollo se encuentran principalmente en aspectos arquitectónicos, constructivos y cuestiones de legislación en materia de construcción.



Imagen 58. Los paneles solares fotovoltaicos están desarrollando multitud de posibilidades estéticas para su integración como elementos constructivos en la envolvente arquitectónica. Frentes de balcones de un edificio en Altstetten.

Fuente: Arquitectos Kämpfen Zinke + Partner AG.

Evolución en el diseño arquitectónico

Estas soluciones tienen un impacto directo en el diseño arquitectónico. Por eso, resulta necesario abordar el estudio de la volumetría con esta óptica durante la fase de diseño del edificio optimizando las superficies con más potencial solar del edificio según el clima y la tipología.

Los paneles fotovoltaicos integrados en edificios son una tecnología en evolución que va a producir a nueva generación de edificios caracterizados por fachadas y balcones que capturan energía, marquesinas fotovoltaicas extensas y techos inclinados que miran hacia el sol. Esta evolución ya en marcha implica una inminente mutación del lenguaje arquitectónico (Imagen 59 y 60).



Imagen 59. Novartis Pavillion, Basilea. Arquitectos: Michele De Lucchi y AMDL Circle.
Fuente: © iart



Imagen 60. Imagen aérea del Umweltarena Spreitenbach, Suiza.
Fuente: René Schmid Architekten en colaboración con Umweltarena Schweiz.

6.3 Diseño de los edificios de energía positiva

Nuevo estándar

En este contexto, ha surgido en Europa el concepto de los edificios de energía positiva (PEB), cuyo fin es alcanzar una huella de carbono nula, proponiéndose como meta la autogeneración completa de su consumo energético mediante fuentes renovables implementadas localmente.

Arquitectura y energía

Los PEB son parte de la solución para el futuro adyacente, y la arquitectura y la energía deben entenderse juntas para dar forma a nuevas arquitecturas con personalidad y alma propia. Dada la complejidad de combinar estos requisitos, a la hora de diseñar un edificio de energía positiva se ha visto la necesidad de enfocar adecuadamente en una fase temprana del proyecto el diseño de la envolvente, su orientación, los sistemas de producción y consumo de energía renovable, y la ubicación de los sistemas fotovoltaicos integrados.

Una herramienta de diseño

La herramienta de toma de decisiones propuesta tiene como objetivo servir de guion en las etapas previas iniciales del proyecto. Se han propuesto 10 KPIs novedosos y específicamente diseñados para su aplicación en el diseño de edificios de energía positiva.

Diseño con alma

El diseño tiene el potencial de cambiar el sentido de las cosas y, por tanto, debemos ser conscientes de su gran valor como acción comunicativa y transformadora (Imagen 61). Un diseño arquitectónico honesto y coherente debe transmitir los valores de su tiempo.



Imagen 61. La moda ha puesto en valor una nueva estética que pone de manifiesto el origen reciclado de los productos, a través de la cual el consumidor se hace partícipe de los valores medioambientales. Del mismo modo, en el paradigma actual, la evolución del diseño de los edificios con el objetivo de llegar a ser energéticamente autosuficientes va a transformar el diseño arquitectónico y creará un nuevo lenguaje contemporáneo.

Fuente: Nike

A lo largo de la historia, los nuevos retos han conducido a cambios y evoluciones en el diseño de edificios, transformando elementos del lenguaje y la paleta del diseño arquitectónico, y así será también en el caso de los futuros edificios de energía positiva.

7 BIBLIOGRAFÍA

Agence Guiraud-Manenc, "Arkinova Activity Generator", noviembre, 2017. <https://www.construction21.org/maroc/case-studies/fr/arkinova-activity-generator.html> (acceso octubre 19, 2021).

D'Agostino, D., Tzeiranaki, S. T., Zangheri, P. & Bertoldi, P., "Assessing Nearly Zero Energy Buildings (NZEBS) development in Europe", *Energy Strategy Reviews*, vol. 36. 2021, doi: 10.1016/j.esr.2021.100680.

Ala-Juusela, M. & Rehman, H. ur, "PEB as enabler for consumer centred clean energy transition-shared definition and concept; EXCESS Deliverable 1.1.," 2020. [Online]. Available: [https://positive-energy-buildings.eu/resource?t=Report on the definition of a Positive Energy Building \(PEB\)](https://positive-energy-buildings.eu/resource?t=Report%20on%20the%20definition%20of%20a%20Positive%20Energy%20Building%20(PEB)).

Ascione, F., Bianco, N., Böttcher, O., Kaltenbrunner, R. & Vanoli, G. P., "Net zero-energy buildings in Germany: Design, model calibration and lessons learned from a case-study in Berlin", *Energy Build.*, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.10.019.

Barrutieta, X., "Catálogo Arquia," 2010, [Online]. Accesible: <https://fundacion.arquia.com/es-es/realizaciones/783>.

Barrutieta, X., "Evaluación de la sostenibilidad en la escala del microubanismo. Las Células Urbanas.," comunicación en el congreso SBmad10, Madrid, pp. 1–10, 2010.

Barrutieta, X., "Orona Ideo - innovation city," en *Comunicaciones y 1a Bienal de Edificación y Urbanismo sostenible*, 2013, pp. 355–369, [Online]. Accesible: isbn-13: 978-84-695-8430-9.

Barrutieta, X., "Zero eraikinaren fatxadaren diseinu parametrikoa" Aldiri, vol. III, no. 31, pp. 26–28, 2017, [Online]. Accesible: https://www.aldiri.eus/wp-content/uploads/2017/11/31_8barrutieta.pdf.

Barrutieta, X., "Hacia una dosis inteligente de tecnología." Camara de Gipuzkoa, SPRI digitala, Donostia, 2023, [Online]. Accesible: https://www.youtube.com/watch?v=IWty_MI2WbA.

Barrutieta, X., Kolbasnikova, A., Irulegi, O. & R. Hernández, R., "Energy balance and photovoltaic integration in positive energy buildings. Design and performance in built office case studies," *Archit. Sci. Rev.*, vol. 66, no. 1, pp. 26–41, Jan. 2022, doi: 10.1080/00038628.2022.2134091.

Barrutieta, X., "Servicio web para el análisis de edificios en base a criterios climáticos y constructivos aplicado a proyectos de guarderías y parvularios". Tesina de doctorado, pp. 1–57, 2006.

Barrutieta X. & Goikoetxea, E., "Orona IDeO -innovation city," 2012.

Barrutieta, X., Kolbasnikova, A., Irulegi, O. & R. Hernández, R. "Decision-making framework for positive energy building design through key performance indicators relating geometry, localization, energy and PV system integration," *Energy Build.*, vol. 297, julio, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113442.

Barrutieta, X.; Gainza, J., Irulegi, O. & Hernández, R. "The zero building: an exemplary nearly zero energy office building (NZEB) and its potential to become a positive energy building (PEB)," <https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1977607>, 2021, doi: 10.1080/00038628.2021.1977607.

BBC, "Observatoire BBC - Pépinière d'entreprises." <https://www.observatoirebbc.org/construction/6694> (acceso: agosto 31, 2021).

Bernhard Weller, S. U., Hemmerle, C., & Jakubetz, S., "Photovoltaics: Technology, Design, Construction", *Detail*, 2010.

Bintinger, R., "schöne neue gebäude: qualität sichern in der gebäudenutzung. Erfahrungen aus dem pilotprojekt windkraft simonsfeld." IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Wien.

BIM, "BIMsolar – The Solar Architecture & Digital community". <https://www.bimsolar.com/es/bimsolar-3/> (acceso enero 10, 2024).

BIPVBOOST Consortium, "Potential contribution to BIPV systems to nearly Zero Energy Buildings and methodology for project outputs assessment," 2020. [Online]. Available: www.bipvboost.eu.

Biyik, E., et al., "A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems", *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 833–858, 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2017.01.009.

Bojić, M., Nikolić, N., Nikolić, D., Skerlić, J. & Miletić, I., "Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2407–2419, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.01.011.

"CA19126 Positive Energy Districts (PED-EU-NET)." <https://www.cost.eu/actions/CA19126/> (acceso abril 28, 2023).

Cartier, A., "Green Office® Rueil," 2015. <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/green-office-rueil.html> (acceso agosto 31, 2021).

Cole, R. J. & Fedoruk, L., "Shifting from net-zero to net-positive energy buildings," *Build. Res. Inf.*, vol. 43, no. 1, pp. 111–120, Jan. 2015, doi: 10.1080/09613218.2014.950452.

Dabaieh, M. & Johansson, E., "Building Performance and Post Occupancy Evaluation for an off-grid low carbon and solar PV plus-energy powered building. A case from the

Western Desert in Egypt,” *J. Build. Eng.*, vol. 18, pp. 418–428, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.job.2018.04.011.

Etxebeste Aduriz, E., “Zerora Bidean Eraikuntza jasangarria”, *Elhuyar aldizkaria* 318. pp. 29–35, 2015, [Online]. Accesible: <https://zientzia.eus/media/pdf/ELH318-021.pdf>.

European Commission, “The European Green Deal, European Parliament resolution,” 2020. Accessed: Jul. 13, 2021. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020IP0005>.

European Parliament, “The Energy Performance of Buildings Directive”, *Off. J. Eur. Union*, 2010.

European Parliament and Council of the European Union, “Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources,” *Off. J. Eur. Union*, vol. 2001, no. 328, pp. 82–209, 2018, Accessed: Jul. 13, 2021. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>.

Esmore, S., Waldren, D., Brady, D. & Lehnert, B., “Pixel Building,” en *Net zero energy buildings, Detail*, 2011, pp. 134–137.

Filippidou, F. & Jimenez Navarro, J. P., *Achieving the cost-effective energy transformation of Europe’s buildings*. 2019.

Firlag, S., “Cost-optimal plus energy building in a cold climate,” *Energies*, vol. 12, no. 20, octubre 2019, doi: 10.3390/en12203841.

Flodberg, K., Blomsterberg, Å. & Dubois, M. C., “Low-energy office buildings using existing technology: Simulations with low internal heat gains”, *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 2012, doi: 10.1186/2251-6832-3-19.

Franchini, G., Brumana, G. & Perdichizzi, A., “Monitored performance of the first energy+ autonomous building in Dubai,” *Energy Build.*, vol. 205, p. 109545, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.109545.

Garde, F., & Donn, M., “Solution sets and Net Zero Energy Buildings: A review of 30 Net ZEBs case studies worldwide”, mayo, 2014. [Online]. Accesible: <http://www.enob.info/en/net-zero-energy-buildings/map/>.

German Federal Ministry of the Interior, Building and Community (BMI), *What makes an Efficiency House Plus? 6th revise.*, vol. 6. German Federal Ministry of the Interior, Building and Community (BMI), Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development within the Federal Office for Building and Regional Planning (BBR), 2018.

G. T. R. S.L., Ed., *III Congreso EECN Edificios Energía Casi Nula*. Madrid, 2016.

G. T. R. S.L., Ed., IV Congreso de Edificios Energía Casi Nula. Madrid, 2017.

Hedman, Å., et al., "IEA EBC Annex 83 Positive Energy Districts," *Build.* vol. 11, no. 3, p. 130, marzo 2021, doi: 10.3390/BUILDINGS11030130.

Haselsteiner, E., "Robust Architecture. Low Tech Design", *Detail*, 2023.

Hawila, A. W., Perneti, R., Pozza, C. & Belleri, A., "Plus energy building: Operational definition and assessment," *Energy Build.*, vol. 265, p. 112069, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112069.

Hernández, R., *Estrategia para la construcción inteligente y sostenible*. Universidad del País Vasco, Euskal Herriko Unibertsitatea, 2017.

Hyde, R., Rajapaksha, U., Rajapaksha, I., Riain, M. O. & Silva, F., "A Design Framework for Achieving Net Zero Energy Commercial Buildings", *Build. Energy*, marzo 2015, p. 8, 2012.

Inês, C., Guilherme, P. L., Esther, M. G., Swantje, G., Stephen, H., & Lars, H., "Regulatory challenges and opportunities for collective renewable energy prosumers in the EU," *Energy Policy*, vol. 138, p. 111212, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111212.

Jaeger, A., Rothballer, C., J. Imana Sobrino, European, I., & Secretariat, "Award-Winning New City Hall of Freiburg: The World's 1st Public Net-Plus Energy Building," EXCESS, Freiburg im Breisgau, 2019. [Online]. Available: https://positive-energy-buildings.eu/fileadmin/user_upload/Resources/EXCESS_D1.2_Case_Study_City_Hall_Freiburg.pdf.

Jenssen, B., "Powerhouse Brattørkaia - The northernmost plus energy office building in the world," 2019.

Jones, P., Hou, S. S. & Li, X., "Towards zero carbon design in offices: Integrating smart facades, ventilation, and surface heating and cooling," *Renew. Energy*, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.06.027.

Kasper Guldager Jensen, J. S., *Building a Circular Future*, Dinamarca, 2018 [Online]. Accesible: https://gxn.3xn.com/wp-content/uploads/sites/4/2018/09/Building-a-Circular-Future_3rd-Edition_Compressed_V2-1.pdf.

Kumar, G. M. & Cao, S., "State-of-the-Art Review of Positive Energy Building and Community Systems," *Energies*, vol. 14, no. 16, pp. 5046, 2021, doi: 10.3390/en14165046.

Kurnitski, J., Achermann, M., Gräslund, J., Hernandez, O. & Zeiler, W., "nZEB case studies," en *Green Energy and Technology*, no. 9781447156093, Springer Verlag, 2013, pp. 135–176.

Lechner, R., Lipp, B., Lubitz-Prohaska, B., Steiner, T., & Weber, U., "Nachhaltig- Es Bauen In Österreich," 2015. Acceso: marzo 1, 2023. [Online]. Accesible: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/hdz/projekte/monitorplus-monitoring-der-leitprojekte-und-demonstrationsbauten-aus-haus-der-zukunft-plus.php>.

Magrini, A., Lentini G., Cuman, S., Bodrato, A & Marengo, L., "From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example," *Dev. Built Environ.*, vol. 3, p. 100019, agosto. 2020, doi: 10.1016/j.dibe.2020.100019

Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A. & Marengo, L., "From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example," *Dev. Built Environ.*, 2020, doi: 10.1016/j.dibe.2020.100019.

Marino, C., Nucara, A., Panzera, M. F. & Pietrafesa, M., "Towards the nearly zero and the plus energy building: Primary energy balances and economic evaluations", *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 13, p. 100400, oct. 2019, doi: 10.1016/j.tsep.2019.100400.

Mayer, F., Reinberg, G. W. & Waltjen, T., "Plusenergie-Verwaltungs-gebäude Ernstbrunn," 2015, Acceso: agosto 30, 2021. [Online]. Accesible: <http://www.nachhaltig-wirtschaften.at>.

McDonough, V. & Braungart, M. *Cradle to cradle: remaking the way we make things*. Nueva York: North Point Press, 2002.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire and Ministère du Logement et de l'Habitat durable, "Objectives: promoting positive energy buildings - Positive-Energy and Low Carbon Buildings," *Bâtiment à énergie positive et réduction carbone*, 2019. <http://www.batiment-energiecarbone.fr/en/objectives-promoting-positive-energy-buildings-a13.html> (acceso julio 29, 2021).

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg, "Leitfaden Bauwerkintegrierte Photovoltaik.", [Online]. Accesible: <https://bipv-bw.de/>.

Mortimer K. & a+t Research Group, *Why Density? : Debunking the Myth of the Cubic Watermelon = Desmontando El Mito De La Sandía Cúbica*. Vitoria-Gasteiz: a t Architecture, 2015.

Musall E., et al., "Net Zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects," 2016, doi: 10.18086/eurosun.2010.06.16.

Overview, "Overview | School buildings as leading examples of energy efficient renovation | Build Up". <https://www.buildup.eu/es/node/48070> (acceso julio. 26, 2021).

Pan W. & Li, K., "Clusters and exemplars of buildings towards zero carbon," *Build. Environ.*, vol. 104, pp. 92–101, agosto 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.04.027.

Perevozchikov, I., et al., "Demand Response in Blocks of Buildings Deliverable: D2.2-Demonstration Scenarios," 2018. [Online]. Accesible: <https://www.researchgate.net/publication/329143413>.

Perruchot, C., "Pour ses dix ans, la tour Elithis positive," 2019, Acceso: Agosto 30, 2021. [Online]. Available: <https://www.lemoniteur.fr/article/pour-ses-dix-ans-la-tour-elithis-de-dijon-positive.2052169>.

Powerhouse, "What is a Powerhouse?," <https://www.powerhouse.no/en/what-defines-the-power-house-standard/> (acceso julio 12, 2021).

Rehman, H. ur, Reda, F., Paiho, S. & Hasan, A., "Towards positive energy communities at high latitudes", *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, pp. 175–195, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.06.005.

Réhault, N., Engelmann, P., Lmmle, M. & Munzinger, L., "New town hall in Freiburg (D): Concept, performance and energy balance after the first year of monitoring of a large net plus-energy building," en *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 352, no. 1, doi: 10.1088/1755-1315/352/1/012003.

"Retour d'expérience: la tour Elithis est-elle vraiment un 'bâtiment à énergie positive'?", 2010, acceso: agosto 30, 2021. [Online]. Accesible: <https://www.lemoniteur.fr/article/retour-d-experience-la-tour-elithis-est-elle-vraiment-un-batiment-a-energie-positive.1919719>.

Sánchez Moncho, V. "Construcción y Economía circular." CEMAV, Canal UNED, Spain, [Online]. Accesible: <https://canal.uned.es/video/5ec67dae5578f216217afd04>.

Saretta, E., Bonomo, P., Maeder, W., Nguyen, V. K. & Frontini, F., "Digitalization as a driver for supporting PV deployment and cost reduction", *EPJ Photovoltaics*, vol. 13, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1051/epjpv/2021013.

SUPSI, I., "Solarchitecture. Sun a building material." [Online]. Accesible: <https://solar-chitecture.ch/>.

U.S. Department of Energy & T. N. I. of B. Sciences, Eds., *A Common Definition for Zero Energy Buildings*, septiembre. 2015.

Weiss, W., "Subprojekt 3a: Technologiezentrum aspern IQ", 2013. [Online]. Accesible: <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>.

Weiss, T. et al., "Solution sets and Net Zero Energy Buildings: A review of 30 Net ZEBs case studies worldwide," 2014. [Online]. Accesible: <http://www.enob.info/en/net-zero-energy-buildings/map/>.

Wending, H. & Kern, M., "ArcheNEO Aktivbürohauskomplex in Kitzbühel Oberndorf," 2015. [Online]. Accesible: <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>.

Xiang, C. & Matusiak, B. S., "Facade Integrated Photovoltaic, state of the art of Experimental Methodology," en IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, vol. 352, no. 1, doi: 10.1088/1755-1315/352/1/012062.

Zhou, Z., et al., "The operational performance of 'net zero energy building': A study in China," Appl. Energy, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.093.

LOS CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN URBANÍSTICA.

El Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, lleva publicando desde el año 1993 la revista Cuadernos Investigación Urbanística, (Ci[ur]), para dar a conocer trabajos de investigación realizados en el área del Urbanismo, la Ordenación Territorial, el Medio Ambiente, la Planificación Sostenible y el Paisaje. Su objetivo es la difusión de estos trabajos. La lengua preferente utilizada es el español, aunque se admiten artículos en inglés, francés, italiano y portugués.

La publicación presenta un carácter monográfico. Se trata de amplios informes de la investigación realizada que ocupan la totalidad de cada número sobre todo a aquellos investigadores que se inician, y que permite tener accesibles los aspectos más relevantes de los trabajos y conocer con bastante precisión el proceso de elaboración de los mismos. Los artículos constituyen amplios informes de una investigación realizada que tiene como objeto preferente las tesis doctorales leídas relacionadas con las temáticas del Urbanismo, la Ordenación Territorial, el Medio Ambiente, la Planificación Sostenible y el Paisaje en las condiciones que se detallan en el apartado Publicar un trabajo.

La realización material de los Cuadernos de Investigación Urbanística está a cargo del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. El respeto de la propiedad intelectual está garantizado, ya que el registro es siempre en su totalidad propiedad del autor y, en todo caso, con autorización de la entidad pública o privada que ha subvencionado la investigación. Está permitida su reproducción parcial en las condiciones establecidas por la legislación sobre propiedad intelectual citando autor, previa petición de permiso al mismo, y procedencia.

Con objeto de verificar la calidad de los trabajos publicados los originales serán sometidos a un proceso de revisión por pares de expertos pertenecientes al Comité Científico de la Red de Cuadernos de Investigación Urbanística (RCi[ur]). Cualquier universidad que lo solicite y sea admitida por el Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la Universidad Politécnica de Madrid (DUYOT) puede pertenecer a esta red. Su único compromiso es el nombramiento, como mínimo, de un miembro de esa universidad experto en el área de conocimiento del Urbanismo, la Ordenación Territorial, el Medio Ambiente, la Planificación Sostenible y el Paisaje para que forme parte del Comité Científico de la revista y cuya obligación es evaluar los trabajos que se le remitan para verificar su calidad.

A juicio del Consejo de Redacción los resúmenes de tesis o partes de tesis doctorales leídas ante el tribunal correspondiente podrán ser exceptuados de esta revisión por pares. Sin embargo, dicho Consejo tendrá que manifestarse sobre si el resumen o parte de tesis doctoral responde efectivamente a la aportación científica de la misma.

NORMAS DE PUBLICACIÓN

Las condiciones para el envío de originales se pueden consultar en la página web:

Manuscript Submission Guidelines:

<http://polired.upm.es/index.php/ciur>

CONSULTA DE NÚMEROS ANTERIORES/ACCESS TO PREVIOUS WORKS

La colección completa se puede consultar en siguiente página web:

The entire publication is available on the following web page:

<http://polired.upm.es/index.php/ciur>

ÚLTIMOS NÚMEROS PUBLICADOS

157 Victoria Fernández Ánez: Smart City discourses vs. implementation. Consumer Smart City: the case of Milan, 89 páginas, agosto 2024.

156 Anna Laura Jeschke: Potenciales de la vegetación espontánea en zonas verdes urbanas, 90 páginas, agosto 2024.

155 Raquel Rodríguez Alonso: Apuntes metodológicos para una lectura compleja del litoral, 73 páginas, julio 2024.

154 José Manuel Gómez Jiménez: Desigualdad urbana: la segregación residencial en contextos metropolitanos sin ordenación territorial integrada, 98 páginas, junio 2024.

153 Elvimar Piña Henríquez y Celina Millán Aguilar: Propuesta para incrementar el uso de energía fotovoltaica en Ámsterdam, 66 páginas, abril 2024.

152 Sonia Sansone Casaburi: Áreas rurales. Un abordaje desde los modelos sistémicos, 80 páginas, febrero 2024.

151 Álvaro Ardura Urquiaga: Southwark. Gentrificación en la periferia de la ciudad neoliberal, 64 páginas, diciembre 2023.

150 Gonzalo López Garrido: La ciudad participativa. Formas de trabajo colaborativo aplicadas a la planificación urbana. Los casos de las ciudades menguantes americanas: Baltimore, Detroit y Filadelfia, 62 páginas, octubre 2023.

149 Ana Portalés Mañanós: Intervenciones urbanas de regiones devastadas. Zona de Levante, 80 páginas, agosto 2023.

148 Carlos Verdguer Viana-Cárdenas: Visiones de un futuro urbano posible. Escenarios para la ciudad de las tres ecologías, 77 páginas, junio 2023.

147 Nerea Morán Alonso: Evolución histórica de la resiliencia alimentaria en la región madrileña, 80 páginas, abril 2023.



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

MÁSTER UNIVERSITARIO EN PLANEAMIENTO URBANO Y TERRITORIAL

por la Universidad Politécnica de Madrid



Periodo
Septiembre - Julio



Modalidad
Presencial (Madrid)



Créditos
60 ECTS

LA FORMACIÓN PARA RESPONDER A LOS DESAFÍOS DE LA CIUDAD



Reputación y
prestigio de más
de 20 años



Pioneros en
sostenibilidad
social y ambiental



Estudiantes de
más de 30 países



Certificado de
calidad QR AESOP

Especialización

■ PU Planeamiento urbanístico

■ EU Estudios urbanos

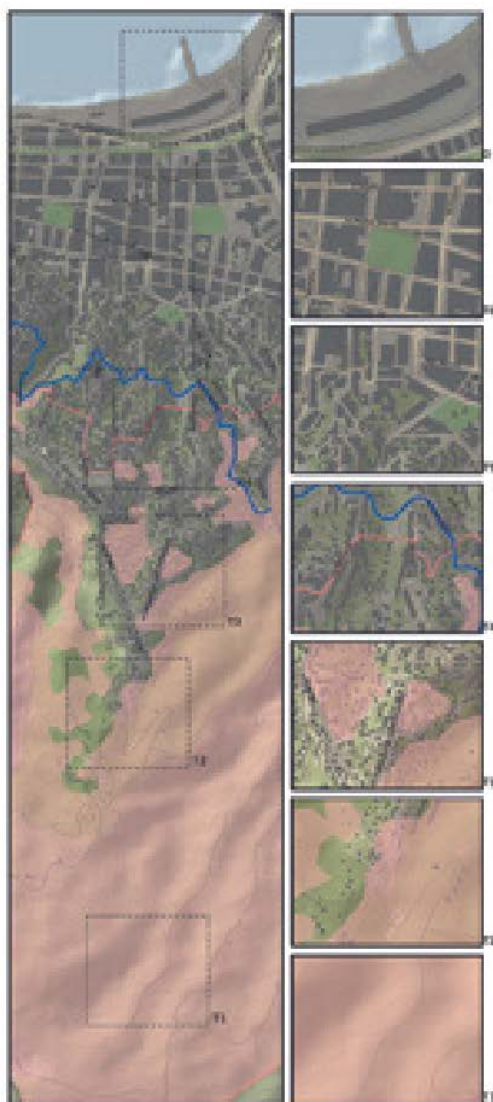


¡Inscríbete ya!



territorios en formación

DUyOT Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio
Escuela Técnica Superior de Arquitectura - Universidad Politécnica de Madrid



territorios en formación
Revista del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio
y de la Asociación de estudiantes de postgrado Ne.Re.As. - ETSAM - UPM
ESTUDIOS URBANOS - PLANEAMIENTO URBANO - DICIEMBRE 2023



Territorios en formación

constituye una plataforma de divulgación de la producción académica relacionada con los programas de postgrado del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la ETSAM-UPM proporcionando una vía para la publicación de los artículos científicos y los trabajos de investigación del alumnado y garantizando su excelencia gracias a la constatación de que los mismos han tenido que superar un tribunal fin de máster o de los programas de doctorado del DUyOT.

Principalmente, el Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio es el que genera esta producción, gracias a la colaboración con la asociación Ne.Re.As. (Net Research Association / Asociación Red Investiga, asociación de investigadores de urbanismo y del territorio de la UPM), que, por acuerdo del Consejo de Departamento del DUyOT, es la encargada de la edición de la revista electrónica.