

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Gestión

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

Net Zero Energy Building como una estrategia arquitectónica ante el cambio climático en los futuros edificios residenciales de Quito

Martha Elizabeth Ordóñez Bueno

Tutor: William Sacher Freslon

Quito, 2023

Trabajo almacenado en el Repositorio Institucional UASB-DIGITAL con licencia Creative Commons 4.0 Internacional

	Reconocimiento de créditos de la obra No comercial Sin obras derivadas	
-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

Para usar esta obra, deben respetarse los términos de esta licencia

Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Martha Elizabeth Ordóñez Bueno, autora del trabajo intitulado “Net Zero Energy Building como una estrategia arquitectónica ante el Cambio Climático en los futuros edificios residenciales de Quito”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que, en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

27 de octubre de 2023

Firma: _____

Resumen

Un Net Zero Energy building (NZEB) es un edificio diseñado para explotar fuentes de energía renovable en el sitio, cuya suma de toda la energía importada debe ser menor o igual a la suma de toda la energía que se exporta desde el sitio; siendo una estrategia hacia edificios climáticamente neutros al suministrar excedentes de producción de energía renovable a la red de energía urbana y reducir emisiones de GEI asociados a la energía. Quito goza de una latitud geográfica privilegiada, el clima ecuatorial y andino no tiene temperaturas extremas; pero si una alta oscilación diurna, siendo necesario un mayor trabajo a nivel de la envolvente y fenestración de los edificios. Se realizó un estudio del arte y un análisis comparativo de rendimiento energético entre edificios residenciales de construcción convencional y NZEB. Se seleccionaron cuatro tipos de vivienda predominantes en la ciudad de Quito y se aplicó a cada tipo dos sistemas constructivos, un sistema constructivo habitual y un sistema constructivo para NZEB, en total ocho prototipos de edificios residenciales para las simulaciones energéticas. La simulación fue realizada con el programa EnergyPlus, y la entrada de datos se realizó a través de la interfaz gráfica de SketchUp con los plugins SG Save y Open Studio. Los primeros resultados muestran un rendimiento energético superior de los NZEBs sobre la construcción convencional y logra un ahorro de energía por concepto de eficiencia energética pasiva de alrededor de un 35 %. En cuanto a la dotación de energías renovables sobre cubiertas se aprecia que en tres de los cuatro prototipos simulados se alcanza a cubrir la demanda de energía teniendo un excedente promedio cercano al 50 %. Los hallazgos encontrados en la simulación muestran que la relación con la trama urbana, la orientación, el equilibrio entre las ventanas sobre las fachadas norte y sur, el material y espesor de los muros, el sellado de los techos, entre otros factores, influyen significativamente en el rendimiento energético. Tener un NZEB si es posible en un clima andino y ecuatorial como Quito.

Palabras clave: simulación energética de edificios, eficiencia energética pasiva, edificios residenciales en climas andinos y ecuatoriales, mitigación y adaptación al cambio climático en edificios.

A el creador del universo,
Adam, David, Bolívar, Rosa y mis hermanos.
A la memoria de mi ángel guardián, mi amada abuelita Anita.

Agradecimientos

Acciones como ayudar y cooperar elevan el altruismo en la sociedad. Poder sentir gratitud hacia quienes nos fortalecen en determinado momento de la vida es un privilegio. Por medio de la presente quiero reconocer el apoyo de aquellas instituciones y personas que aportaron en la presente investigación y titulación.

Inicio agradeciendo a todas aquellas instituciones públicas, privadas, con o sin fines de lucro, tanto nacionales como extranjeras, entre otras, que mantienen la información disponible al servicio de toda la comunidad, en formato digital y vía online, lo cual agilizó y facilitó grandemente el desarrollo de la presente investigación. A la Universidad Simón Bolívar – Sede Ecuador y su cuerpo docente administrativo, por inspirar y transmitir, la pasión y el compromiso, por la ciencia y la investigación. Al Congreso Internacional sobre Calidad del Aire Interior, Ventilación y Conservación de Energía en Edificios (IAQVEC), por estimar una parte de esta investigación en su edición 2019.

Mi más grande y sincero agradecimiento a mi tutor y profesor William por todo su acompañamiento, su infinito apoyo, confianza, gran paciencia, así como, las múltiples retroalimentaciones antes y durante la elaboración de la presente investigación, gracias infinitas por orientarme hacia la investigación académica y científica. Un agradecimiento especial a mi colega y extutor Karl, quien supo compartir sus conocimientos y experiencias para desarrollar investigaciones académicas, demostrándome que no hay límites solo hay que hacerlo. A Carlos, Mireyita y Melissa, quienes con su excelente labor en la Universidad y apoyo extra oficina, han podido ayudar a estudiantes como yo, a que ingresen y culminen exitosamente sus estudios.

A mi familia, en especial a mi esposo David, mi hijo Adam, mis padres, Desiré y mis hermanos, por ser mi fortaleza, empuje, fuente de inspiración y constancia. A mis amigos: Ketty, Guillermo y Mario, y mis colegas: Mónica y Frank, quienes con su presencia en determinados tiempos coadyuvaron en esta titulación. Un agradecimiento también a Gioconda, Edgar y Camilo.

Finalmente, y no menos importante quiero agradecer a los lectores, por destinar parte de su valioso tiempo para explorar este documento, fruto de mi esfuerzo y desvelo, espero les sea útil y de su agrado.

Tabla de contenidos

Figuras y tablas.....	13
Introducción.....	15
Capítulo primero Arquitectura, Emisiones de GEI y NZEB	27
1. Contribuciones de la arquitectura a la eficiencia energética y a la mitigación del cambio climático.....	28
1.1. Arquitectura vernácula	28
1.2. Arquitectura moderna	29
2. Nuevas iniciativas arquitectónicas: hacia la NZEB.....	31
3. Iniciativa NZEB: Arquitectura en tiempos de CCA	33
4. La iniciativa NZEB en el Ecuador.....	41
4.1. NZEB en Quito.....	43
Capítulo segundo Marco teórico	47
1. Energía.....	47
1.1. Uso de energía en los edificios	48
1.2. Factores que influyen el uso de energía en los edificios	48
2. Eficiencia energética.....	50
2.1. Eficiencia energética en los edificios	50
3. NZEB.....	53
3.1. Estándar Passive House como base del concepto de casa pasiva.....	62
3.2. Otras consideraciones pasivas	69
3.3. Eficiencia Energética Activa	73
3.4. Tecnología Smart y de Generación de Energía Renovable	74
4. Estrategias Pasivas y Activas en el caso específico de la ciudad de Quito	75
4.1. EUI bajo estimado para Quito	77
Capítulo tercero Metodología y Simulaciones	81
1. Metodología.....	81
1.1. Datos de Quito	82
1.2. Caracterización de la vivienda.....	83
1.3. Selección de los prototipos	87
1.4. Selección de los programas para simulaciones	91

2.	Simulaciones energéticas.....	94
2.1.	Objetivos de la simulación	94
2.2.	Prototipos EdR.....	95
2.3.	Prototipos NZ	96
2.4.	Energías renovables	96
	Capítulo cuarto Resultados y discusión.....	99
1.	Resultados.....	99
2.	Discusión de los resultados	102
2.1.	Modelos EdR.....	102
2.2.	Modelos NZ.....	103
	Conclusiones y Recomendaciones	111
	Obras citadas.....	115
	Anexos	129
	Anexo 1: Histórico de emisiones de GEI a nivel mundial, periodo 1960-2022.....	129
	Anexo 2: Emisiones de GEI en Quito - Año base 2015	130
	Anexo 3: Consideraciones del medio externo para la eficiencia energética pasiva	131
	Anexo 4: Grupos y subgrupos de la clasificación climática Köppen actualizada	132
	Anexo 5: Carta psicrométrica de Baruch Givoni	133
	Anexo 6: Hacia edificios climáticamente neutros de por vida	134
	Anexo 7: Recursos Energéticos Primarios, Tipos y su Conversión.	135
	Anexo 8: Principios y requerimientos del Estándar Passive House	136
	Anexo 9: Esquema de geometría en plantas arquitectónicas con mayor y menor compacidad.....	137
	Anexo 10: Carta psicrométrica de Giovoni para casos estudiados en Quito.....	138

Figuras y tablas

Figura 1. Foto de la primera casa pasiva en Darmstadt, Kranichstein, Alemania.....	31
Figura 2. Primera ZEB, The Self-sufficient solar house en Freiburg, Autumn, 1992....	32
Figura 3. Resultados 1 de la Encuesta del Estudio: Hacia los Edificios Solares de Energía Cero	38
Figura 4. Resultados 2 de la Encuesta del Estudio: Hacia los Edificios Solares de Energía Cero	40
Figura 5. Relación ZEB-redes de energía en un NZEB	57
Figura 6. Opciones de cálculo para el balance/saldo neto cero	59
Figura 7. Cinco principios del estándar energético alemán “Passive House”	62
Figura 8. Alternativas vistas en planta de la geometría de edificio	68
Figura 9: Algunas orientaciones y disposiciones de manzanas y edificios	70
Figura 10. Protección horizontal en fachadas y ventanas.....	71
Figura 11. Protección vertical en fachadas y ventanas, volado en ventana horizontal vertical	72
Figura 12. Actividades económicas en Quito	86
Figura 13. Verificación del EUI bajo máximo admisible.....	103
Figura 14. Balance de calor NZEB.....	104
Figura 15. Aporte de Eficiencia energética pasiva	105
Figura 16. Cogeneración energía renovable en el sitio vs demanda total de energía de NZ	106
Tabla 1. Requisitos NZEB en algunos países europeos	34
Tabla 2. EUI bajo para lograr un ZEB - valores objetivos	37
Tabla 3. Principales Factores que Influencian el Uso de Energía	49
Tabla 4. Clasificación de NZEBs según Wells, Rismanchi, y Aye.....	55
Tabla 5. Principales softwares de simulación energética	61
Tabla 6. Ángulos de inclinación para sistemas solares fotovoltaicos (PV).....	74
Tabla 7. Zonas climáticas en el Ecuador y su equivalente ASHRAE 90.1	75
Tabla 8. EUI bajo para lograr un NZEB en Quito.....	78
Tabla 9. Metodología para la estimación de un NZEB en Quito	82

Tabla 10. Tipos de vivienda particular en Quito	84
Tabla 11. Materiales predominantes y tenencia de las viviendas particulares en Quito	85
Tabla 12. Tipología seleccionada para la simulación de prototipos de vivienda convencional.....	88
Tabla 13. Características técnicas de los 8 prototipos a simular	89
Tabla 14. Resultados Totales de las simulaciones EdR y NZ	100

Introducción

Nuestra Tierra tiene cuarenta y cinco millones de siglos de antigüedad. Pero este siglo es especial, es el primero en el que una especie, la nuestra, ostenta tanto poder y es tan dominante que tiene el futuro del planeta en sus manos.
(Rees 2018)

El dominio de la energía y sus múltiples fuentes han acelerado el desarrollo en nuestro tiempo (Blok y Nieuwlaar 2021, 1–2) y han forjado numerosos beneficios para toda la humanidad, pero también han creado múltiples amenazas, entre ellas una global y silenciosa, pero raramente inmediatamente tangible, el cambio climático de origen antropogénico (CCA) (Rees 2018, 30–34). Penosamente, existe una tendencia en el ser humano en centrarse en problemas que percibe como una amenaza directa e inmediata y en menor escala los que no percibe como una amenaza para sí o su descendencia (Meadows et al. 1972, 19–21).

No obstante, ya se han documentado y se prevén situaciones complejas a causa del CCA en un futuro próximo, tales como riesgos para: la salud, seguridad alimentaria, suministro de agua, seguridad humana y crecimiento económico, así como: incremento del nivel del mar, impactos en la biodiversidad y ecosistemas, acidificación y descenso del nivel de oxígeno del agua en el mar (IPCC 2021; AEMET y OECC 2018; Bates et al. 2008; IPCC 2018; Molina, Sakukhán, y Carabias 2017, 71–46; Maslin 2014; ONU-HABITAT 2011; Hoegh-Guldberg et al. 2018; Stern 2014), pérdidas de vidas humanas, una amplificación de la desigualdad y pobreza (IPCC 2018; Busso y Messina 2020, 3), alteración de los patrones de lluvias y fenómenos naturales con mayor recurrencia y fuerza con la que se producen (Nayak y Takemi 2020; Thirumalai et al. 2017; Gao, Booi, y Xu 2019; Sadekov et al. 2013).

Entre las causas del CCA se cita al crecimiento exponencial de la población, la demanda per cápita de energía y recursos, y por supuesto, las formas que privilegia la humanidad para generar energía (Molina, Sakukhán, y Carabias 2017, 60); al 2021, en el mundo habitaban 7,84 mil millones de personas (Banco Mundial 2022a). El CCA constituye un desafío estructural para la humanidad por lo que significa potencialmente una superación de los límites mismos del planeta (Meadows et al. 1972), y cuestiona el

crecimiento ilimitado como proyecto civilizatorio, pues se requieren tres planetas y medio para cubrir la demanda actual en recursos (Steffen et al. 2015, 1–7; Rockström et al. 2009, 23). Desde ya varias décadas se ha planteado la necesidad de cambiar de trayectoria, por ejemplo, con el informe Brundtland y la propuesta de un “desarrollo sostenible”, es decir aquello que pueda “asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias” (ONU Asamblea General 1987, 23).

En cuanto a las acciones para mitigar el CCA, numerosas iniciativas multilaterales y a nivel global como el Acuerdo de París, Acuerdo de Marrakech y los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (17ODS) concuerdan en fijarse como objetivo disminuir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) en las próximas décadas (ONU Asamblea General 2015a; 2015b, 16, 27). El Panel intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) estima como umbral idóneo, limitar el calentamiento global entre 1.5 °C o por debajo de los 2 °C con respecto al periodo preindustrial para evitar riesgos e impactos sobre los sistemas naturales y humanos (IPCC 2018) a causa del incremento de emisiones de GEI y la propia retroalimentación del cambio climático¹ positiva.

Sin embargo, al 2016 la temperatura global supero 1 °C con respecto al periodo preindustrial, y los fenómenos y desastres naturales se incrementaron en ese año en relación a lo habitual, no solo en el número de eventos sino en la fuerza con la que se producen, generados por la retroalimentación positiva propia del CCA (Naciones Unidas 2020; Sadekov et al. 2013; Thirumalai et al. 2017; Nayak y Takemi 2020). Al 2019, el calentamiento global se situó en 1.1 °C con respecto al período preindustrial (Naciones Unidas 2020, párr. 3) y las emisiones mundiales de GEI ascendieron a 48.089.617,00 kilotoneladas de dióxido de carbono equivalente (ktCO_{2eq}), en tanto, las emisiones de dióxido de carbono en toneladas métricas per cápita fueron de 4.6 tCO₂ (Banco Mundial 2023). Producto de las restricciones de libre circulación, dadas a raíz de la pandemia covid-19, al 2020, se paralizaron amplios sectores de la economía global, por ello, en ese año las emisiones disminuyeron un 5,2 % con respecto al año anterior, más la “vuelta a la normalidad” incrementaría las emisiones con un aporte estimado para el 2022 de 37.5 gigatoneladas de dióxido de carbono (GtCO₂) (Anexo 1) (Friedlingstein et al. 2022).

¹ Son cambios en el sistema climático, que pueden facilitar (positivo) o dificultar (negativo) cambios ulteriores.

El consenso mundial para combatir el CCA plantea un desarrollo sostenible libre de emisiones de GEI mediante emisiones *cero netas* o net zero (NZ) hacia 2050 (UNEP 2022; UNEP y IEA 2017), no obstante el reciente informe de Friedlingstein et al (2022, 4814), sobre emisiones globales 2022 estima que, “alcanzar cero emisiones de CO₂ para 2050 implica una disminución lineal total de las emisiones antropogénicas de CO₂ de aproximadamente 0,4 GtC (1,4 GtCO₂) cada año, comparable a la disminución durante 2020, destacando la escala de la acción necesaria”. Uno de los sectores que más emite GEI es el sector energía, Al 2020, el sector energía fue responsable de casi tres cuartas partes de las emisiones de GEI (Cozzi et al. 2021, 15), y solo la electricidad genero el 41 % de estas emisiones GEI (IEA 2021, 57).

Ciudades, edificios y emisiones de GEI a nivel global

Aunque el área construida mundial solo ocupa el 7,6 % del total de la superficie terrestre (Europa Press 2016, párr. 1), las ciudades consumen entre un 60 y 80 % de la energía mundial y causan alrededor del 70 % de emisiones de GEI globales (ONU-HABITAT 2016, 16). “Las principales fuentes de emisión de GEI de las zonas urbanas están relacionadas con el consumo de combustibles fósiles, que incluyen *el suministro de energía para la producción eléctrica [...] uso de la energía en locales [...] residenciales para la electricidad, la calefacción, la refrigeración y para cocinar [...]*” (ONU-HABITAT 2011, 9; énfasis añadido). Por tanto, el sector *energía y las ciudades* se ubican en el *centro del problema*, pero también son parte vital de *la solución al CCA*.

El entorno construido de las ciudades se compone principalmente por edificios. A nivel mundial, al 2016, la superficie total construida fue de 235 mil millones de metros cuadrados (UNEP y IEA 2017, 9) y se prevé que este valor se duplique al 2060 (UNEP y IEA 2017, 15; IFC 2019, 7, 11, 24). Al 2019, los edificios contribuyeron con el 35 % del consumo total de energía a nivel global y emitieron el 38 % de las emisiones mundiales de GEI (UNEP 2020, 10). Adicional, al 2021 de las 193 partes (países) adheridas al Acuerdo de París, 158 países empezaron a mencionar a los edificios en el número de contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC), más solo 79 países tienen códigos de energía para edificios, es decir dos quintos de los países que son parte del Acuerdo están iniciando su alineación hacia un parque edificatorio descarbonizado (UNEP 2022, 4). Es urgente que todos los países del mundo inicien su transición hacia edificios con cero emisiones netas.

Penosamente a nivel mundial, la intensidad energética de los edificios,² no ha cambiado en los últimos años y se mantiene en 150kWh/m² desde el 2019, se requiere que mejore cada año un 5 % para alcanzar alrededor de los 95 kWh/m² propuesto por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) hacia el 2030 (UNEP 2022, 6–7).

Adicional, el *rápido* crecimiento poblacional urbano, socava la capacidad técnica y operativa de las ciudades del mundo, generando también déficit habitacional, que culmina en expansiones urbanas irregulares que superan el mismo déficit (ONU-HABITAT 2016, 63; UNEP y UN-Habitat 2021, 22–23). Al 2021, la población urbana mundial fue del 64,36 % con respecto al total poblacional global (Banco Mundial 2022b) y al 2050 se estima que supere el 70 % y que, ese crecimiento se dé en países de economías emergentes de medianos y bajos ingresos, emergiendo las ciudades medianas y zonas periurbanas (UNEP y UN-Habitat 2021, 22-3). Por todo ello, preocupa mundialmente el crecimiento tanto urbano como del parque edificatorio, sin una debida asistencia técnica hacia cero netos de emisiones de GEI.

Vivienda urbana y emisiones de GEI global

En la mayoría de ciudades del mundo la vivienda ocupa más del 70 % del uso de suelo urbano (ONU-HABITAT 2016, 62), con una frecuencia promedio de uso de 15 horas diarias (AIMC Marcas 2016, párr. 2), las personas permanecen más de la mitad de un día en espacios interiores (C. Wu et al. 2015, 7). Al 2019 y nivel mundial, en cuanto al consumo de energía y emisiones globales, los edificios residenciales contribuyeron con el 22 % del consumo de energía a nivel global y emitieron el 17 % de GEI (UNEP 2020, 10), porcentajes que si se contrastan con el porcentaje total de todos los edificios a nivel global equivalen al 62 % y 45 % del total de ellos respectivamente.

Los datos analizados destacan una cercana similitud porcentual que resulta proporcional entre porcentajes tanto de consumo de energía de la vivienda con respecto al total de edificios (62 %) como del uso de suelo urbano de la vivienda (70 %). Dentro del grupo de edificios, la vivienda es significativa y representativa tanto en número, como porcentaje de consumo de energía, superficie utilizada en la ciudad y emisiones que, sumada la gran importancia que tiene por la función que brinda al ser humano ciudadano, al ser su morada resulta muy relevante de ser objeto de estudio. Por tanto, esta

² Relación entre el total del consumo final de energía anual de los edificios por metro cuadrado.

investigación se enfocará en el análisis de edificios residenciales para limitar emisiones de GEI relacionados al consumo de energía, como una meta objetiva clave para la mitigación del cambio climático, dentro de las ciudades.

Emisiones, ciudades y edificios en el Ecuador y en el DMQ

Al 2019, Ecuador representó 0,16 % de las emisiones totales de GEI a nivel global con una contribución de 72.530 ktCO₂eq. y sus emisiones per cápita de GEI ascendieron a 2,3 tCO₂ (Banco Mundial 2023). Al 2018, el sector energía del país emitió 39.720 ktCO₂eq., de esto el 8,45 % corresponde al sector residencial (EC IIGE 2018, 44). A escala nacional, al 2020 se consumió 83 millones de barriles equivalentes de petróleo (BEP) de energía de los cuales el sector residencial consumió 13 millones BEP y desglosados corresponden al 38,4 % de electricidad, 51,8 % de gas licuado, 0,1 % de gas natural y 9,7 % de leña (EC IIGE 2021, 30).

A nivel local, Quito registro al 2020 un consumo de energía eléctrica de 3802,76 GWh correspondiente al 14,64 % con respecto al consumo eléctrico nacional (CENACE 2020, 39), y las emisiones de GEI al 2015 fueron 7,59 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalentes (tCO₂eq), de este valor el sector residencial–comercial contribuyó con un 17,77 % (Anexo 2) (EC Secretaría de Ambiente 2015, 49). Quito es representativo como lugar de estudio, tanto para el Ecuador al ser la capital del país, como para la región andina central, pues se ubica en el trópico a 2800 msnm sobre la Cordillera de los Andes, sin mayores cambios de estacionalidad, ni rangos de temperatura extrema, pero si una alta oscilación diurna, que se puede trabajar desde la arquitectura.

Otros retos de la electrificación hacia cero netos en Ecuador

Garantizar la seguridad continua de la electricidad es vital para el funcionamiento de las ciudades en escenarios de cero netos, con la electrificación de las redes urbanas de energía. En Ecuador la carga sobre las redes de energía urbana (REU) se incrementó en un 42,2 % durante la última década correspondiente al periodo 2008-2018 (EC IIGE 2018, 26). La política nacional para reducir emisiones de GEI asociadas al uso de energía fósil doméstica, a través la electrificación de sistemas de cocción y calentamiento de agua, duplicará las cargas sobre las REU lo cual exigirá la construcción de nuevas centrales eléctricas (Ríos, Guamán, y Vargas 2018).

Aunque la generación de electricidad por hidroeléctricas supera el 88 %, en la actualidad constituye un problema ambiental (Benchimol y Peres 2015; Ribera Arismendi 2018), tanto por su concepción y tamaño de gran escala (Anderson et al. 2018), en torno a las márgenes de los cauces de los ríos, como erosiones con efectos negativos diversos al medio ambiente y posibles escenarios de inundaciones en las comunidades aledañas (Jumbo Olaya y Morales Loor 2021) y con ello un problema latente de inseguridad energética. Además, si se le suma posibles escenarios de CCA donde falte agua para el funcionamiento de hidroeléctricas (Buytaert et al. 2006; Vliet et al. 2016), se tendrían inconveniente para generar energía eléctrica. En adición, el uso de termoeléctricas como las instaladas en el país también generan inconvenientes al ambiente natural, como cambios de temperaturas en ríos (Raptis, van Vliet, y Pfister 2016).

Otro aspecto a considerar en este punto son las cargas adicionales que recibirán paulatinamente las REU en escenarios cero netos, con el cambio propio de la tecnología de equipos cuya entrada de energía fuera mediante dotación de fuentes de energía fósil, sumado a las cargas de otros sectores por ejemplo el sector transporte con la electrificación de los sistemas de transporte público y vehículos privados.

Por tanto, promover otras formas de energía limpia, con generación en el sitio o cercana, como edificios que produzcan su propia energía y exporten excedentes de producción a las REU sería también una buena medida de seguridad energética hacia los cero netos de carbono (Icaza, Borge-Diez, y Pulla Galindo 2022).

La iniciativa NZEB

Todo lo antes expuesto, evidencia la importancia y responsabilidad del sector inmobiliario de edificios no solo en la resiliencia y seguridad urbana y humana, sino también en la protección climática, siendo una oportunidad entre varias disciplinas donde los arquitectos e ingenieros tienen un impacto positivo y directo en el proceso de cambio. Mas ¿Cómo generar un desarrollo sostenible en la vivienda futura de la ciudad?

A escala mundial existe una coalición para combatir el CCA desde un escenario de parques edificatorios climáticamente neutros con metas trazadas en dos tiempos (2030 y 2050) y dos vías (edificios de carbono operativo cero netos y edificios de carbono incorporado cero netos) que convergen hacia una sola meta: “edificios de carbono cero netos de por vida” (UNEP 2020). Hacia 2030 se espera que los edificios reduzcan un 45 % de las emisiones con respecto al 2010 y, hacia 2050 el 100 % de emisiones, ósea,

emisiones cero netas de carbono en los edificios (incluido las emisiones de carbono operativo y carbono incorporado³) (2020). Es decir, la visión es que, tanto los edificios nuevos, la infraestructura y las renovaciones deberán tener cero neto emisiones de carbono operativo e incorporado hacia 2050. Para lograr la meta y coadyuvar la transición energética que exige un entorno de cero netos de carbono, se ha derivado dos subgrupos de edificios que convergen al 2030: 1. Carbono operativo cero netos y, 2. Carbono incorporado cero netos. El primero es un edificio con alta eficiencia energética, que solventa sus necesidades restantes de energía mediante fuentes de energía renovable en el sitio o fuera de sitio; el segundo además de tener las características del primero debe contemplar las emisiones de GEI desde la concepción del edificio, a través del carbono incorporado cero netos, se espera que al 2030 este tipo de edificio logre reducciones no menores al 40 % de carbono incorporado y al 2050 todos los edificios (nuevos y renovados) sean cero carbono de por vida.

A nivel de América Latina, al 2020 la coalición para combatir el CCA elaboró una hoja de ruta para edificios latinos, donde se detallan las acciones recomendadas (8 categorías) para llegar a edificios de cero neto emisiones, eficientes y resilientes al 2050; en edificios nuevos destaca el fortalecimiento y priorización de la construcción pasiva y asequible dentro de los códigos de energía existente y que estos sean obligatorios; es decir, adoptar diseños arquitectónicos pasivos que reduzcan la necesidad de sistemas de climatización ((GlobalABC, IEA, y UNEP 2020).

En cuanto a la experticia con edificios de energía cero netos en Latinoamérica, 12 países latinos incluido Ecuador, desarrollan experiencia en nZEB⁴ y NZEB, a nivel de edificios particulares construidos, prototipos desarrollados por entidades gubernamentales, política, investigaciones y estudios académicos preliminares (Austin, Chung-Camargo, y Mora 2021).

En cuanto a las limitaciones de su implementación, a nivel mundial destacan el alto costo de inversión en la fase inicial (Becchio et al. 2015), pero en oposición fue lo que facilitó el desarrollo de edificios de energía cero netos en zonas centroeuropeas

³ En Edificios, son emisiones de carbono equivalente, asociadas con los procesos de producción de los materiales (extracción, transporte, fabricación, el transporte de los materiales a la obra) y los procesos de construcción a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio, que incluye ampliación, mantenimiento, remodelación y rehabilitación, así como la praxis constructiva efectuada en cada uno.

⁴ Edificio de energía cercana a cero o Nearly Zero Energy Building, cuya meta es reducir el consumo de energía y emisiones, pero no llega a cubrir su demanda de energía con autogeneración. Es usual en países de climas severos, donde las condiciones climáticas obligan a depender de los sistemas de climatización en determinadas épocas del año, por ejemplo, para paliar las olas de calor o los fríos extremos.

(Musall et al. 2010). En edificios de gran altura, persiste la dificultad de lograr valores óptimos de desempeño energético (Won, No, y Alhadidi 2019) así como alcanzar a cubrir con energías renovables la demanda de energía (Cangelli y Fais 2012). A nivel del Ecuador, según el “Green Building Council” no se manejan edificios con NZE por el precio bajo de los recursos naturales utilizados para la generación de energía y debido a los subsidios otorgados por el estado a éstos (Montalvo Beltrán 2016, 36, 128), además el sistema eléctrico en Quito no permitía un intercambio entre la energía producida en sitio y la tomada de la red pública (2016, 36). Otra dificultad es la falta de materiales e insumos de construcción para NZEB, así como la ausencia de información de las propiedades térmicas de los materiales en los catálogos existentes de construcción (Ordoñez, Mora, y Gaudry 2019).

Por otra parte, los obstáculos surgen a nivel de análisis energético y diseño, como la falta de datos climáticos, y válidos en todo el país, el conocimiento previo que se requiere para el diseño arquitectónico y la simulación energética, la escasa interacción y relación entre programas digitales de diseño arquitectónico y simulación energética (Pérez Pérez y Parra 2017), así como no poder conectar el edificio a una REU 100 % verde (69 % ER al 2013) (Alexandra Alvear Calle, Peña Toro, y Labus 2013).

Mas, a nivel global las emisiones de los edificios por carbono operacional son dos tercios mayor que las emisiones por carbono incorporado (GlobalABC, IEA, y UNEP 2020, 23). A medida que el desarrollo tecnológico avanza alentado por la eficiencia energética y los cero netos de carbono, la fabricación de materiales, técnicas de construcción y todos los insumos que se requieren para la construcción de los edificios, se entiende mejoren consecutivamente su tecnología y eficiencia y a la par reduciendo emisiones de carbono asociadas a la producción industrial de los materiales y la construcción.

Por tanto, trabajar en mitigación de emisiones de carbono en la fase operativa de los edificios se vuelve medular en el presente tiempo para reducir emisiones de GEI, en adición ayudar a las múltiples sobrecargas que se verán sometidas las REU nacionales por el mismo crecimiento poblacional, urbano y económico; y los posibles efectos del CCA. Por consiguiente, los datos expuestos denotan que, el llamado *balance cero netos de energía* en los edificios sería adecuado a nuestra realidad nacional y local.

Por ello el presente estudio, se centra en la estrategia llamada NZEB (Net Zero Energy Building), que ha sido producto de un desarrollo evolutivo, desde las primeras "passive house", edificios cercanos a cero energías, edificios de energía cero, culminando

con edificios de energía cero netos (Musall et al. 2010), mismo que fue más claramente expuesto por primera vez por Sartori, Napolitano, Marszal, Pless, Torcellini y Voss, quienes identificaron los elementos importantes de un NZEB, así como, la relación entre esos elementos y una medida como mecanismo operativo de evaluación NZEB (Sartori et al. 2010) y cuya implementación ha sido analizada en distintos contextos geográficos, climáticos (cálidos, templados, polares, nivales, ecuatoriales y áridos) y ciudadanos (espacio urbano, zonas periurbanas y rurales) (Musall et al. 2010).

Se ha establecido que la estrategia NZEB conduce a cero neto emisiones de carbono operacional al reducir sus necesidades energéticas al mínimo y compensar el restante de sus necesidades energéticas mediante fuentes de energía renovable (Eley 2016). En la actualidad el costo de inversión de un NZEB es mínimo, se estima que fluctúa en un 5 y 10 % al valor de una construcción convencional, las personas prefieren edificios con certificaciones verdes, mismos que se venden tres veces más rápidas que la construcción convencional; adicional, las características de un NZEB reducen la prima de los seguros entorno al 30 % (Zero Energy Project 2023).

Se considera que los NZEBs son una estrategia hacia edificios climáticamente neutros en razón de qué, combinados con el suministro de red casi neutral de carbono, aumentan la proporción de la energía renovable dentro de las redes de energía al exportar excedentes de producción, reduciendo no solo las emisiones de carbono asociadas a la energía (Sartori, Napolitano, y Voss 2012), sino el consumo de recursos en posibles nuevas infraestructuras de energía urbana.

Objetivos y alcance de la investigación

En el presente trabajo se analiza la reducción del problema de las emisiones de GEI ligadas al consumo de energía en la vivienda del parque inmobiliario futuro de la ciudad de Quito mediante la estrategia NZEB; y muy en particular se plantea la siguiente interrogante para guiar la investigación: ¿Cuál es el potencial de la estrategia NZEB para controlar y disminuir las emisiones de GEI del sector residencial en la ciudad de Quito?

Por tanto, el objetivo general de la presente investigación es: Evaluar la pertinencia de la implementación de la estrategia NZEB en el parque inmobiliario residencial futuro de la ciudad de Quito. Los objetivos específicos de la investigación son los siguientes: 1. Realizar un estudio del arte de la relación entre arquitectura y el clima; 2. Identificar las estrategias de diseño arquitectónico más idóneos para la ciudad; 3.

Describir en qué consiste el diseño de NZEB, en particular para la ciudad Quito; 4. Realizar un análisis comparativo de rendimiento energético mediante prototipos de construcciones convencionales y NZEB.

Un NZEB enlaza un espectro de conocimiento muy amplio, abarca distintas disciplinas y requiere un equipo interdisciplinario para su diseño, construcción y mantenimiento (Attia 2018), lo cual engloba un cierto nivel de experticia para desarrollar el tema. Por tanto, las medidas en cuanto a las posibles mejoras en materia de eficiencia energética activa, y otras formas de generar energía renovable como por ejemplo a través del calor, quedan al margen de esta investigación, reconociendo que su aporte es parte integral de un NZEB, más el objetivo fundamental de esta investigación es optimizar la arquitectura del edificio para que reduzcan emisiones de GEI y eviten consumos de energía relacionados a aspectos físicos del edificio, así como también, la generación de electricidad a partir de fuentes renovables para cubrir necesidades restantes de energía.

Pautas metodológicas

Como punto de partida se analiza las contribuciones de la arquitectura en la reducción de emisiones de GEI, luego se analiza el desarrollo de los NZEBs mediante un rápido análisis de repertorio mundial, nacional y local. Posteriormente se establecen las bases científicas que rigen el diseño de un NZEB, y se efectúan análisis energéticos mediante simulaciones.

La revisión de la literatura permite establecer los parámetros para las simulaciones energéticas del edificio. Como programa para modelizar el comportamiento energético de los edificios se eligió EnergyPlus, por ser el motor de cálculo más completo y contar con un vasto alcance de aplicaciones y amplia comunidad de usuarios que han desarrollado variedad de herramientas para extender mayor funcionalidad y amigabilidad del software, lo cual permite usar interfaces gráficas y de tamizaje información desde fuentes externas (US Department of Energy 2021). Sus simulaciones se basan en la física de los edificios y en la termodinámica (US Department of Energy 2014), para ello, requiere características propias del lugar y el edificio como: datos meteorológicos, ubicación geográfica, así como la geometría, forma, tamaño, orientación del edificio y las características térmicas de los materiales utilizados en el edificio.

La interfaz gráfica SketchUp permitió ingresar los datos relacionados con la geometría del edificio; para el ingreso de los datos climáticos, el análisis de los resultados,

selección de los tipos de simulación y datos de salida de los resultados, se usó OpenStudio; para el ingreso de la información relacionada con las propiedades térmicas de los materiales, presentación de la información, tipo de análisis de cálculo y optimización del diseño se utilizó SgSave. Por su completo análisis de cálculo termodinámico de los materiales del edificio y su interacción con el entorno a emplazarse, EnergyPlus permite conocer el rendimiento energético de los edificios convencionales y de tecnología NZEB.

Al contrastar los resultados se observa que se logra alrededor de un 30 % promedio de ahorro energético por concepto de casa pasiva, con un tratamiento térmico acorde al clima y el edificio, sin ser necesarios sistemas de climatización. La producción de energía eléctrica renovable es variable y está en función de las características físicas espaciales del edificio, teniendo un excedente en 3 de los 4 prototipos de construcción simulados como NZEB.

Estructura de la tesis

La tesis está organizada en cuatro capítulos más las conclusiones. El capítulo primero responde la interrogante en cuanto a que se puede hacer desde la arquitectura para reducir emisiones de GEI y destaca la estrategia NZEB. En el segundo se dialoga entre las diferentes disciplinas y pensamientos entorno a la forma de desarrollar un NZEB. En el capítulo tercero se expone la metodología empleada tanto para determinar los prototipos, tipos de sistemas constructivos, así como la simulación seleccionada, con el objetivo de analizar el desempeño energético de los edificios de construcción convencional y NZEB. El capítulo cuarto, expone los hallazgos encontrados a lo largo del desarrollo de esta investigación, así como la discusión comparativa de los resultados obtenidos en las simulaciones. Y por último se describen las conclusiones a la que ha llegado esta investigación, analizando fortalezas y debilidades en el camino hacia una futura implementación.

Capítulo primero

Arquitectura, Emisiones de GEI y NZEB

Este capítulo pretende responder los objetivos específicos números 1 y 2. El primero, mediante un recorrido a través del tiempo en la historia de la arquitectura desde las bases autóctonas hasta la actualidad, tomando como eje central la relación arquitectura-clima. Este análisis histórico permite identificar las estrategias de diseño arquitectónico más idóneas para Quito y, destaca a la estrategia NZEB como una solución para corregir posibles deficiencias y mitigar el cambio climático en la arquitectura de los edificios, por lo tanto, responde al segundo objetivo específico.

Introducción

Para Brucemann y Prowler (1977, 11), el problema del consumo de energía en la arquitectura inicia a mediados del siglo XIX con el desarrollo de la calefacción y ventilación mecánica. Hacia 1860, en ciudades como Londres, Paris y Nueva York, casi todos los edificios públicos importantes contaban con agua caliente y calefacción central de vapor, así como un completo sistema de ventilación asistida, que sumado al surgimiento del primer calefactor eléctrico para hogares a finales del siglo XIX (1977, 12) incrementó la demanda de energía en los edificios. Durante el siglo XIX Europa inicia “la producción a gran escala de acero y vidrio” (Requena Ruiz 2011). A mediados del siglo XIX, en varios países europeos, así como en los Estados Unidos, surge el hormigón armado y se registran múltiples patentes (Wight y MacGregor 2016). A inicios del siglo XX, “el desarrollo de la termodinámica y de la industria mecánica” (Requena Ruiz 2011, 39) hicieron posible que, en 1928, se patente el aire acondicionado de uso doméstico (2011, 39).

Con la revolución industrial, se modifica el arte de proyectar y construir edificios, muy visibles desde los inicios de la arquitectura moderna, facilitando los medios para que la arquitectura dejara de considerar el clima en su labor (Requena Ruiz 2011). La electricidad, sumado a los sistemas de ventilación, calefacción (Brucemann y Prowler 1977, 11) y refrigeración (Requena Ruiz 2011; Nagengast 2002) en conjunto con la mejora en la ingeniería de materiales (Blok y Nieuwlaar 2021; Requena Ruiz 2011; Wight y MacGregor 2016) dieron libertad en el diseño espacial, tanto al interior como al exterior

de la obra, expandiendo la imaginación de los arquitectos y la plasticidad formal de los edificios, y maximizando aspectos formales sobre funcionales. Las relaciones arquitectura-clima dentro del diseño de los espacios quedaron a cargo de los sistemas de climatización, al generar aclimatación en cualquier lugar del mundo, dando origen al estilo internacional con una arquitectura sin restricciones del clima y del inconfort térmico ((Requena Ruiz 2011). El Anexo 3 detalla aspectos a considerar en el diseño en relación al clima y la arquitectura.

1. Contribuciones de la arquitectura a la eficiencia energética y a la mitigación del cambio climático

Desde la antigüedad, la humanidad ha buscado optimizar los recursos energéticos disponibles, para construir sus viviendas y satisfacer sus necesidades de confort, con algunas técnicas de eficiencia energética pasiva. Hace 5500 a.c. las casas en la región de los Cárpatos se construyeron semienterradas, para mantener estable la temperatura interior; comunidades como los capadocios, los esenios de Medio Oriente y nativos americanos, también aprovecharon las propiedades térmicas del suelo (Ionescu et al. 2015, 244). También se usaron receptores de viento llamados “badghir” en Persia, y “malqaf” en Egipto; adicional los egipcios y romanos usaron muros gruesos de ladrillo y tejas (propiedades termoacústicas); los romanos también usaron calefacción, mediante gases quemados, a través de las cavidades huecas en los muros y pisos; luego usaron energía solar y agua para temperar sus balnearios, entre otros (2015, 244). Estas experiencias son ejemplos de cómo la búsqueda de eficiencia energética es un tema antiguo.

1.1. Arquitectura vernácula

Los principios de diseño y construcción de la arquitectura vernácula, reflejo de siglos de experiencia y adaptación a los microclimas locales (Agudo Torrico 1999; Torres Balbás 1930), son fundamentales para la eficiencia energética de los edificios, el confort térmico y, en consecuencia, la mitigación del cambio climático (Alelwani et al. 2019; Chandel, Sharma, y Marwah 2016; Requena Ruiz 2011; Ureña Moreno, Chávez, y Parra León 2019; Hidalgo Villacis 2018; Martín Wieser, Rodríguez-Larraín, y Onnis 2021; Majid, Shuichi, y Takagi 2012). Los edificios vernáculos implementan diversas

estrategias bioclimáticas, tales como la protección contra la precipitación y la optimización del uso de la radiación solar en climas oceánicos, y la captación pasiva de energía solar en climas continentales fríos mediante muros con materiales de alta capacidad de almacenamiento térmico (Chandel, Sharma, y Marwah 2016, 463).

Un estudio realizado en el sur de Portugal subrayó la utilidad de materiales con elevada inercia térmica e higroscópica para mantener la humedad relativa y la temperatura dentro de los rangos habitables durante casi todo el año (Fernandes et al. 2019). Alelwani et al. (2019), por otro lado, abordaron la mejora del diseño de “Rawshan”, un componente representativo de la arquitectura vernácula árabe, optimizando la iluminación natural y minimizando el consumo energético y la ganancia solar en climas árabes. Singh et al. citado en (Chandel, Sharma, y Marwah 2016, 463) resaltó la eficiencia pasiva de las casas vernáculas de la India, que se basan en la orientación en función del sol y el viento y en la utilización de materiales autóctonos como madera, caña, bambú, piedra, barro, yute y cal. Majid, Shuichi, y Takagi (2012), en Omán, destacaron la importancia crucial del factor humano en la elección del diseño, construcción y características arquitectónicas, pues influye en la eficiencia energética de los edificios.

En conclusión, la arquitectura vernácula puede proporcionar inspiración y pautas técnicas valiosas para la lucha contra el cambio climático y la proyección de edificios de energía neto cero, siempre y cuando se tenga en cuenta la interacción entre las propiedades de los materiales de construcción, los factores humanos y climáticos.

1.2. Arquitectura moderna

La Arquitectura moderna, a menudo tildada de “anticlimática” por su dependencia de sistemas de climatización artificial (Requena Ruiz 2011), estimuló el desarrollo científico del diseño climático, que representan aportes significativos para el desarrollo de edificios climáticamente neutros. Además, este avance fue propiciado por crisis económicas y tecnológicas del siglo XX, que fueron fusionando elementos de la arquitectura vernácula con la arquitectura moderna (2011).

El buque polar “Fram” de 1893, diseñado por el arquitecto naval Colin Archer, se considera el primer espacio habitable operativo con características de “casa pasiva”⁵

⁵ El concepto de casa pasiva son todas aquellas características materiales y físicas en torno a la eficiencia energética pasiva que se le otorgan a los espacios habitables de los edificios, para que los mismos no demanden energía por factores físicos del edificio en la fase operativa.

(Amundsen y Archer 1909, 455; Feng et al. 2019, 3), por demostrar la incorporación de principios de eficiencia energética en la arquitectura.

A principios del siglo XX, el climatólogo Köppen desarrolló una clasificación climática de cinco zonas, aún vigente (Anexo 4), sintetizando la información climática local, un aspecto carente en la climatología hasta entonces (Heymann 2010, 588). El ingeniero estadounidense Willis Haviland Carrier y el arquitecto Baruch Givoni realizaron aportes significativos para el diseño climático de edificios. En 1905, Carrier patentó el primer aparato de acondicionamiento de aire y, en 1906 desarrolló la carta psicrométrica⁶ (Nagengast 2002, 44–45; Requena Ruiz 2011, 39), que más adelante Givoni perfeccionó, convirtiéndola en una herramienta esencial para el diseño arquitectónico (Anexo 5) (Givoni 1998).

En los años 1930, los pioneros edificios “Casa Solar 1 del MIT” y “Casa del mañana” incorporaron análisis térmicos y colectores solares (Ionescu et al. 2015, 244). En la década de 1960, se desarrollaron métodos para la estimación de carga térmica en edificios (2015, 248), algunos aún en uso. El arquitecto modernista Le Corbusier incorporó principios de diseño climático en su trabajo, desarrollando los sistemas de protección solar “*brise-soleil*”, de ventilación “*aérateur*” y cubierta ajardinada (Requena Ruiz 2011), elementos fundamentales en sus diseños arquitectónicos y para la eficiencia energética y el confort térmico en la arquitectura moderna.

En Europa, la crisis energética de los años 70 (Blok y Nieuwlaar 2021, 10–11) impulsó la búsqueda de diseños arquitectónicos sostenibles (Ionescu et al. 2015, 248; Blok y Nieuwlaar 2021), culminando con el desarrollo de edificios de “energía cero” (Esbensen y Korsgaard 1977; 1976; Ionescu et al. 2015, 248). En la década de 1980, se establecieron estándares legales de energía para edificios de bajo consumo en Suecia y Dinamarca (Passipedia 2022, párr. 1), y en Alemania, Wolfgang Feist y Bo Adamson bosquejaron el concepto de “casa pasiva” (Ionescu et al. 2015, 248; Musall et al. 2010, 2).

En resumen, la eficiencia energética pasiva en la arquitectura se basa en la relación intrínseca con el clima y el entorno. Aunque la tecnología moderna alejó a la arquitectura de esta relación, las crisis globales han reinstaurado la conciencia de la importancia de adaptar los edificios al clima local. La necesidad de superar la crisis climática actual actúa como un llamado a la acción, donde la arquitectura evolucione en sintonía con el clima.

⁶ Gráfica que ilustra las propiedades termodinámicas de las relaciones que se dan en un aire húmedo.

2. Nuevas iniciativas arquitectónicas: hacia la NZEB

En la década de 1990, los esfuerzos en Estados Unidos, hacia una arquitectura sostenible culminaron en la formación del Comité del Medio Ambiente del Instituto Americano de Arquitectos y el Concejo del Edificio Verde, estableciendo estándares como LEED, Green Globes, and BREAM (Eley 2016), Alemania vio la inauguración de la primera “Casa pasiva Kranichstein” en 1991 y la primera casa solar energéticamente independiente “Self sufficient solar house” (primera ZEB)⁷, en 1992 (Musall et al. 2010, 2; Ionescu et al. 2015, 248).

La Casa pasiva Kranichstein (Figura 1), es un edificio compuesto de tres pisos y cuatro unidades habitacionales en hilera, con paredes exteriores típicas de madera, piso de concreto, cubierta verde de madera, ventana con aislante y vidrio triple de baja emisividad (Ionescu et al. 2015, 248; Musall et al. 2010, 2; Feist, Pfluger, y Hasper 2020, 1543).



Figura 1: Foto de la primera casa pasiva en Darmstadt, Kranichstein, Alemania
Fuente: (Feist, Pfluger, y Hasper 2020, 1545)

La “Self sufficient solar house”, en Freiburg, Alemania (Figura 2), logra almacenar calor sensible y latente⁸ (en tanques separados), baterías eléctricas y almacenamiento de hidrógeno, su morfología es una planta de forma rectangular, de curva convexa hacia la fachada sur para aprovechar al máximo la radiación solar, fachadas este

⁷ Zero Energy Building o edificio de energía cero, se describe en el capítulo segundo.

⁸ Calor sensible es la energía que provoca un cambio de temperatura en una sustancia sin cambiar su estado molecular, el calor latente está asociado a un cambio de estado, pero no de temperatura.

y oeste cortas para evitar el exceso de radiación solar en verano (Musall et al. 2010, 2; Stahl, Voss, y Goetzberger 1994, 111–12; Ionescu et al. 2015, 248).

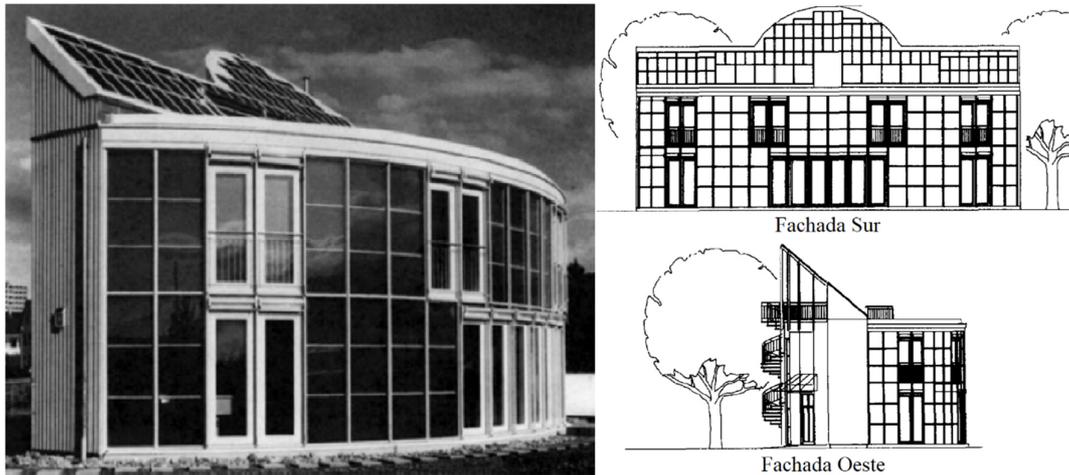


Figura 2: Primera ZEB, The Self-sufficient solar house en Freiburg, Autumn, 1992
Fuente: (Stahl, Voss, y Goetzberger 1994; Musall et al. 2010; Ionescu et al. 2015)

Para 1995 “Self sufficient solar house” sirve de base para el estándar Passive House (Stahl, Voss, y Goetzberger 1994; Ionescu et al. 2015). Hacia 1994 se crea Minergie, un sello de calidad suizo para edificios nuevos o renovados con bajo consumo energético, se construyen las dos primeras casas Minergie, también se inaugura la primera casa de energía positiva “plus energie haus” llamada Heliotrope, en Freiburg, dotada de fuentes renovables, y; en 1988 Minergie es un estándar oficial de certificación energética, tres años después se crea Minergie-P siendo más riguroso que el inicial similar al estándar Passive House (Ionescu et al. 2015). El 1996 se crea el “Passive House Institute” dirigido por F. Feist y se establecen bases claras y solidas de una casa pasiva (2015).

Los avances tecnológicos hacia finales del siglo XX facilitan el surgimiento de los edificios inteligentes. La domótica e inmótica en edificios inicia de forma gradual, de 1980 a 1985 con la automatización de controles de equipos y sistemas dedicados para una máquina (función única / sistema dedicado); de 1985 a 1990, los sistemas se expanden y controlan múltiples sistemas (comunicación entre equipos de similares sistemas) conocido como sistema multifunción; de 1990 a 1995 los sistemas integrados son a nivel de edificios, centros de mando para automatización y comunicación, que controlan y monitorean todos los sistemas del edificio (seguridad, electricidad, y sistemas de calefacción y refrigeración); de 1995 a 2000, la integración de todos los sistemas en el edificio es mediante computadora (sistema de cableado estructurado); del 2002 a la

presente, la integración de los sistemas se hace por red empresarial (ENIS) (portafolio remoto de sistemas integrados y gestión de mesa de ayuda) (Ionescu et al. 2015, 248; Wang 2010, 7–9), tomando un rol relevante los teléfonos inteligentes y el internet de las cosas.

3. Iniciativa NZEB: Arquitectura en tiempos de CCA

La iniciativa NZEB (Net Zero Energy Building) o edificios de energía cero netos conducen a emisiones cero netos de carbono operacional al reducir las necesidades energéticas del edificio al mínimo, mientras compensa las necesidades restantes de energía mediante fuentes de energía renovable del sitio o fuera de sitio (Eley 2016), pudiendo exportar a las REU y/o importar energía de las REU (Sartori, Napolitano, y Voss 2012). Su característica principal de producir su propia energía a partir de fuentes de energía renovable y a la vez permanecer conectados a las REU, hace que se consideren una estrategia hacia edificios climáticamente neutro, debido a que, al exportar excedente de energía renovable y en combinación con el suministro de red casi neutral de carbono, aumentan la proporción de energía renovable dentro de las REU, y al mismo tiempo reducen emisiones de carbono asociadas a la energía (2012).

Al 2007, luego del cuarto informe climático del IPCC la mayoría de países empezaron a concientizar acerca de la incidencia humana en el cambio climático actual, lo que conllevó a reformular políticas energéticas y nuevos estándares internacionales más rigurosos en el ámbito de descarbonización y energía, aunque algunos países como por ejemplo Alemania ya habían reformulado sus políticas a raíz del Acuerdo de Kioto en cual fue firmado en 1997 (Musall 2015). La Unión Europea proyecta una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero con año base 1990 de un 20 % para 2020 y un 80 % para 2050 (2015). En 2010 se añadieron los objetivos de aumento de la cuota de energías renovables en el consumo total y un objetivo de aumento de la eficiencia energética en un 20 % (2015). Las medidas previstas y ya implementadas incluyen la emisión de directivas y reglamentos para aumentar la participación de las energías renovables, así como una mayor eficiencia y ahorro energético, esto incluye la “Directiva sobre el rendimiento energético de los edificios” (actualizada al presente) emitida por la Unión Europea (2015). En el Art. 9 de la citada directiva aparece por primera vez el concepto de Edificio de consumo de energía casi nulo nZEB (Gómez Melgar 2017)

mismo que se incluiría como estándar para edificios nuevos a partir de 2020 en los estados miembros (Musall 2015).

La Unión Europea ha solicitado un estándar de construcción de energía cero definido a nivel nacional para edificios nuevos a partir de 2019 (públicos) y 2020 (privados) (Musall et al. 2010), con la expectativa de que al 2020 el consumo de energía, así como las emisiones de CO₂, se reduzcan hasta un 6 % en toda la Unión europea (Musall 2015). Desde el 30 de junio de 2011, es obligatorio desarrollar planes nacionales para la conversión a la directiva actualizada (Musall et al. 2010).

Tabla 1
Requisitos NZEB en algunos países europeos

País	Año de aplicación		Edificios nuevos		Edificios existentes	
	Público	No público	Maximum primary energy [kWh/m ² y]		Maximum primary energy [kWh/m ² y]	
			Edificios residenciales	Edificios no residenciales	Edificios residenciales	Edificios no residenciales
Austria	2019	2021	160	170 (desde 2021)	200	250 (desde 2021)
Bélgica Bruselas	2015	2015	45	90 [a]	54	108 [a]
Bulgaria	2019	2021	30-50	40-60	30-50	40-60
Chipre	2019	2021	100	125	100	125
Dinamarca	2019	2021	20	25	20	25
Francia	2011	2013	40-65 [a, b]	70-110 [a,b]	80 [b]	60% EP [a]
Alemania	2019	2021	40% EP [c]	en desarrollo	55% EP [c]	en desarrollo
Hungría	2019	2021	50-72 [a]	60-115 [a]	en desarrollo	en desarrollo
Letonia	2019	2021	95	95	95	95
Malta	2019	2021	40	60	no definido	no definido
Polonia	2019	2021	60 [a]	75 [a]	no definido	no definido
Eslovenia	2019	2021	45-50 [a]	70	70-90 [a]	100
Suecia	2019	2021	30-75 [a, b]	30-105 [a, b]	no definido	no definido

[a] En función del edificio de referencia, [b] En función de la Ubicación, [c] Consumo máximo de energía primaria definido como porcentaje del consumo de energía primaria (EP) de un edificio de referencia.

Fuente: (Harkouss 2018, 25)
Edición y traducción propias

A nivel mundial y a finales del milenio, las estimaciones de la intensidad de consumo de energía (EUI) promedio en los edificios residenciales⁹ era alrededor de 76,71 kBtu.pie².año o 242 kWh/m².año (Eley 2016, 55) mientras el EUI promedio global de edificios al 2021 fue 150 kWh/m².año (UNEP 2022, 7). La Tabla 1 muestra el avance que hace parte de la comunidad internacional en relación a la mitigación del cambio climático desde el sector de los edificios, en todos los países descritos en la Tabla 1, tanto en los

⁹ Promedio de la estimación de la intensidad del uso de energía (EUI) para edificios residenciales en las ocho zonas climáticas, a finales del milenio.

edificios nuevos como en los existentes, las exigencias energéticas ha aumentado sustancialmente, la máxima necesidad de energía permisible observada la registra Austria con 160 y 200 kWh/m².año para edificios residenciales nuevos y existentes respectivamente, pero a su favor sigue debajo de la media estimada promedio de EUI a nivel mundial a finales del milenio, mientras que el EUI más bajo permisible de consumo lo registra Dinamarca con 20 kWh/m².año, tanto para edificios residenciales nuevos como existentes. Estos resultados reflejan el compromiso y la limitante propia que cada país tiene en particular. Realizando un análisis rápido, Dinamarca por su condición geográfica¹⁰ posee un clima relativamente templado, lo cual le permite estimar un EUI obligatorio para edificios bajo, mientras que probablemente las condiciones geográficas y de clima en Austria¹¹ le permite estimar un valor conservador, pero relativamente más alto en comparación a la estimación de los demás países en la Tabla 1 y la media global de 2021. Las iniciativas en torno a reducción de GEI por medio del parque de edificios están en marcha en el viejo continente.

En Alemania, según Musall (2015) el sector de la construcción se describe como uno de los nueve puntos clave con el objetivo de hacer que el parque de edificios sea casi climáticamente neutral (edificio con una baja demanda de energía, cuya necesidad de energía restante se cubra principalmente con energías renovables) para 2050, el proceso regulatorio más importante para el sector de la construcción se dio con la aprobación de la Ordenanza de Ahorro de Energía de 2002 (EnEV 2002), con la cual también espera evitar la dependencia de las importaciones de combustibles fósiles, al reducir el consumo total de energía primaria en un 50 % en todos los sectores respecto a 2008 (2015). Los planes nacionales de eficiencia energética incluyen la expansión de la generación combinada de calor y electricidad, el aumento de la contribución de la biomasa, el biogás y los biocombustibles, y la reducción del consumo energético de los edificios a través de la introducción de la Ley de calor de fuentes de energía renovable (EEWärmeG) (2015).

Según Gómez Melgar (2017), en España la primera referencia normativa sobre regulación relacionada con el consumo de energía en los edificios proviene del Decreto 1490/1975. Luego en 1979 “se publica la primera norma española moderna que regula aspectos del consumo de energía en los edificios denominada Norma Básica de

¹⁰ Territorio formado por penínsulas y archipiélagos ubicado a 56° latitud norte.

¹¹ Austria se ubica en el centro de la zona continental de Europa a 47° latitud norte sobre los Alpes, su clima continental y de montaña, le confiere un clima extremo tanto en verano como invierno, las recientes olas de calor que han azotado a Europa no son la excepción en dicho país.

Edificación de Condiciones Térmicas en los edificios (NBE-CT-79)”, después es derogada y se aprueba el Código Técnico de la edificación (CTE), como anexo a la CTE se genera el Documento básico de ahorro de energía (CTE-DB-HE). Actualmente y en cumplimiento a disposiciones de la Unión Europea, los edificios españoles nuevos deben ser nZEB. Al 2016, Inglaterra proyectaba que todas las casas nuevas sean cero carbonos, mientras Estados Unidos también formula dentro de sus programas políticos estos edificios e ideas de equilibrio adecuadas para ello (Musall et al. 2010).

“El sector de la construcción jugará un papel importante en el apoyo a la descarbonización de la economía global, a través de mejoras en la eficiencia energética para reducir la demanda de energía; reducir el uso de materiales y, al hacerlo, reducir el carbono incorporado; y finalmente, apoyando la adopción de generación de energía renovable y baja en carbono distribuida. Durante su vida útil, la huella de carbono de un edificio consiste en el carbono incorporado de la fabricación y el procesamiento de los materiales de construcción y la construcción, así como el carbono operativo del uso de energía de sus operaciones.” (GlobalABC, IEA, y UNEP 2020, 22)

La visión general a nivel mundial es tener un parque inmobiliario descarbonizado, para ello, la coalición de cero netos en edificios, busca tener edificios neutros de carbono mediante dos opciones que convergen hacia 2030, edificios cero netos de carbono operacional y edificios cero netos de carbono incorporado (Anexo 6), con el único objetivo de llegar al 2050 con edificios de cero netos de carbono (operacional e incorporado), llamados edificios neutros de carbono de por vida (UNEP 2020). Los edificios con emisiones cero netos de carbono durante toda su vida útil¹² son edificios cuyas emisiones de carbono, tanto de los materiales utilizados en su construcción y fin de la vida útil¹³, o carbono incorporado, así como sus emisiones de carbono operativas¹⁴, se compensan¹⁵ (GlobalABC, IEA, y UNEP 2020, 22). Es decir, el termino cero netos para la coalición radica en la compensación de emisiones de carbono equivalente que generan o pudieran generar.

¹² La coalición contempla que se pueda aplicar en distintas escalas, tanto a nivel de edificio como a nivel de barrio, distrito o ciudad.

¹³ En la fase final o de mantenimiento del edificio, se debe contemplar los materiales producto del derrocamiento o cambio que puedan ser reutilizados, mejorados, reciclados, etc., corriente económicamente conocida como “economía circular de los edificios”.

¹⁴ También conocidos como edificios de energía cero netos, la coalición flexibiliza en este punto el uso de las tecnologías de energías renovables al edificio. Si la energía renovable no está disponible, no es factible o no alcanza a cubrir toda su demanda, se puede emplear términos como "casi cero" o "listo para cero netos", en referencia a los esfuerzos ya realizados con la eficiencia energética.

¹⁵ Los edificios pueden compensar emisiones de carbono resultantes del consumo de electricidad o cualquier forma de combustible consumido en el sitio, mediante la producción de energías renovables. También pueden compensar emisiones producto del carbono incorporado.

En América Latina, se está estableciendo un camino claro hacia la construcción de edificios climáticamente sostenibles mediante una “hoja de ruta”, que promueve prácticas de construcción pasiva para nuevos edificios, con el objetivo de minimizar la dependencia de sistemas de climatización, lograr un mayor ahorro energético y un desarrollo sostenible (GlobalABC, IEA, y UNEP 2020). Los países latinos como Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, Ecuador, El Salvador, Haití, México, Panamá, Perú y Uruguay han iniciado el camino hacia ceros netos en edificios, en distintos ámbitos y escalas (Austin, Chung-Camargo, y Mora 2021)

Durante los últimos años ha aumentado considerablemente el número de proyectos internacionales diseñados con balance de energía cero netos. Las continuas mejoras tecnológicas sumado a las exigencias más rigurosas en cuanto a rendimiento energético dan lugar a los edificios de energía cero netos o ZEB conectados a la red pública. La Tabla 2 es el resultado de un proyecto de investigación ASHRAE de varios años, que muestra una estimación de que tan bajo debería ser el EUI en los edificios si toda la tecnología conocida disponible se aplicara a los modelos de construcción (Eley 2016, 56–57).

Tabla 2
EUI bajo para lograr un ZEB - valores objetivos

Tipo de clima		Intensidad del uso de energía (EUI) potencial técnico máximo estimado (kBtu/pie ² /año)						
		Costa del Pacífico	Cálido y seco	Cálido y húmedo	Más cálido y húmedo	Frio y seco	Frio y húmedo	Ártico
zona climática ASHRAE		(3c, 4c)	(2b, 3b, 4b)	(1a, 2a)	(3a, 4a)	(5b, 6b)	(5a, 6a, 7)	(8)
Tipo de edificios, según su uso	Bodegas	6	6	5	6	7	8	7
	Oficinas	8	10	11	11	11	11	12
	Locales comerciales	13	18	18	17	18	19	27
	Escuelas	16	21	23	22	21	23	26
	Apartamentos	24	30	29	31	32	34	35
	Oficinas / Centro de Datos	43	47	47	44	47	46	47
	Hoteles	40	49	49	51	51	54	58
	Centros de atención médica	63	64	68	67	66	69	72
	Restaurantes	265	323	324	336	343	353	377

Fuente: (Eley 2016, 13, 57)
Traducción y edición propias

La necesidad de una acción rápida en la lucha contra el cambio climático mediante el parque de los edificios, generó que la Agencia Internacional de Energía (AIE)

desarrolle un proyecto conjunto con 20 países denominado: Hacia los edificios solares de energía cero (NZEB), con el objetivo de estudiar los edificios existentes de energía cero netos y casi cero y muy baja energía, con la finalidad de llevar a la práctica la construcción de NZEB en el parque inmobiliario mundial (Voss et al. 2009, 3, 14-5).

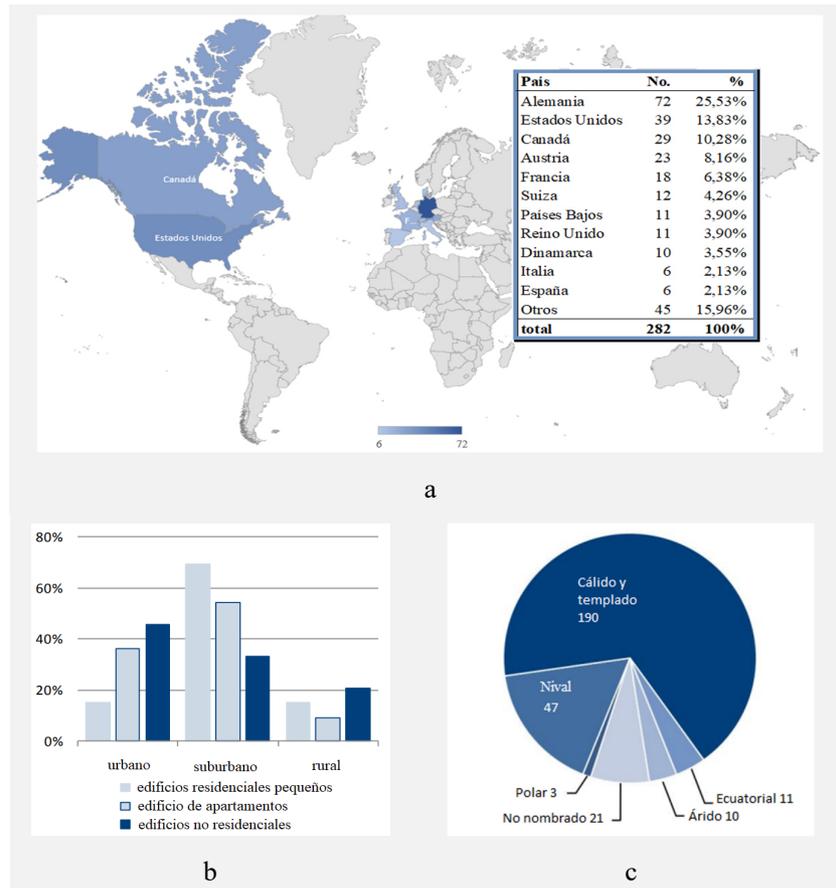


Figura 3: Resultados 1 de la Encuesta del Estudio: Hacia los Edificios Solares de Energía Cero a. Numero de NZEB en el mundo¹⁶, b. Preferencia de ubicación geográfica de NZEB y c. Numero de NZEB por tipo de clima.

Fuente: (Musall et al. 2010)

Edición y traducción propias

La investigación también originó una encuesta, los resultados previos indicaron una falta definición clara y vacíos principalmente en relación a parámetros de delimitación y medición (Musall et al. 2010). En este sentido, Sartori, Napolitano, Marszal, Pless, Torcellini y Voss, parte del grupo de expertos convocados a esa

¹⁶ El estudio inicio con 20 países, con opción de participación posterior a los países del mundo, de los 282 edificios censados, se describen 11 nombres de países con resultados y una denominación como otros de 45 unidades, extrapolando resultados con la Figura 3c los 45 denominados otros podrían estar repartidos alrededor del mundo.

investigación, determinaron los elementos importantes de un NZEB, así como la relación entre esos elementos y una forma para medir como mecanismo operativo de evaluación NZEB (Sartori et al. 2010), misma que luego fue actualizada (Sartori, Napolitano, y Voss 2012), y sirvió de base para la evaluación de la investigación propuesta por la AIE (Sartori et al. 2010; Musall et al. 2010). Esta encuesta permitió recopilar importantes datos estadísticos y conocimiento pragmático producto de la experiencia operativa de los edificios.

Es así que, a nivel mundial, al 2010 se tenía un registro de 282 proyectos construidos con categoría casa pasiva y edificios de energía neta ceros (Figura 3a) (Musall et al. 2010, 4–5). En la Figura 3b se observa que los edificios no residenciales predominan tanto, en la zona urbana como en la zona rural, mientras que los edificios pequeños residenciales predominan en la periferia, pudiendo deberse a factores como la prestación de servicios básicos que brinda una ciudad o posibles límites para dotación de energía renovable que presenta una determinada configuración urbana como el sombreado excesivo de edificios adyacentes, entre otros (Requena Ruiz 2011; Givoni 1998), lo que desincentiva la construcción de edificios residenciales dentro y fuera del área urbana. La Figura 3c destaca un mayor número de NZEB en climas cálidos y templados, según Musall et al. (2010, 4–5) esto se debe a que el desarrollo de NZEBs en Europa se ha dado mayormente en países ubicados al noroeste de Europa, donde gozan de una economía estable, que permitió desarrollar proyectos de esta naturaleza.

En la Figura 4a se observa una predominancia en los NZEB, por el uso de energías renovables solares fotovoltaicas sobre cubierta, seguido por el calentamiento de agua sanitaria (ACS) con energía solar térmica y bombas de calor, aunque en la encuesta el uso de fotovoltaica sobre fachadas es mínima esto probablemente cambie en un futuro próximo, debido al desarrollo cada vez mayor de tecnología enfocada en la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos. Los edificios pequeños usan en mayor proporción que los demás edificios energía solar fotovoltaica sobre cubierta, ACS solar térmica, calefacción solar térmica, energía eólica en el sitio, esto podría deberse en parte porque el desarrollo de estos edificios se da en la zona suburbana (Figura 3b), donde la densidad poblacional generalmente es menor y el área de lotes suele ser mayor, a diferencia de las zonas urbanas donde la proporción cambia, siendo menor el área del lote y mayor la altura de pisos.

En la Figura 4b se observan las ganancias energéticas de los edificios pequeños que, se dan mediante el buen aislamiento térmico de la envolvente, los sistemas solares

térmicos de agua caliente, eficiencia de los electrodomésticos y ventilación mecánica. Las estrategias predominantes en los edificios de apartamentos se dan en las ganancias de calor avanzadas, recuperación de calor, bombas de calor y los sistemas solares térmicos de agua caliente. En los edificios no residenciales las ganancias energéticas se dan en menor proporción que los edificios residenciales; mediante aislamiento térmico, ventilación mecánica, recuperación de calor y enfriamiento o ventilación pasiva.

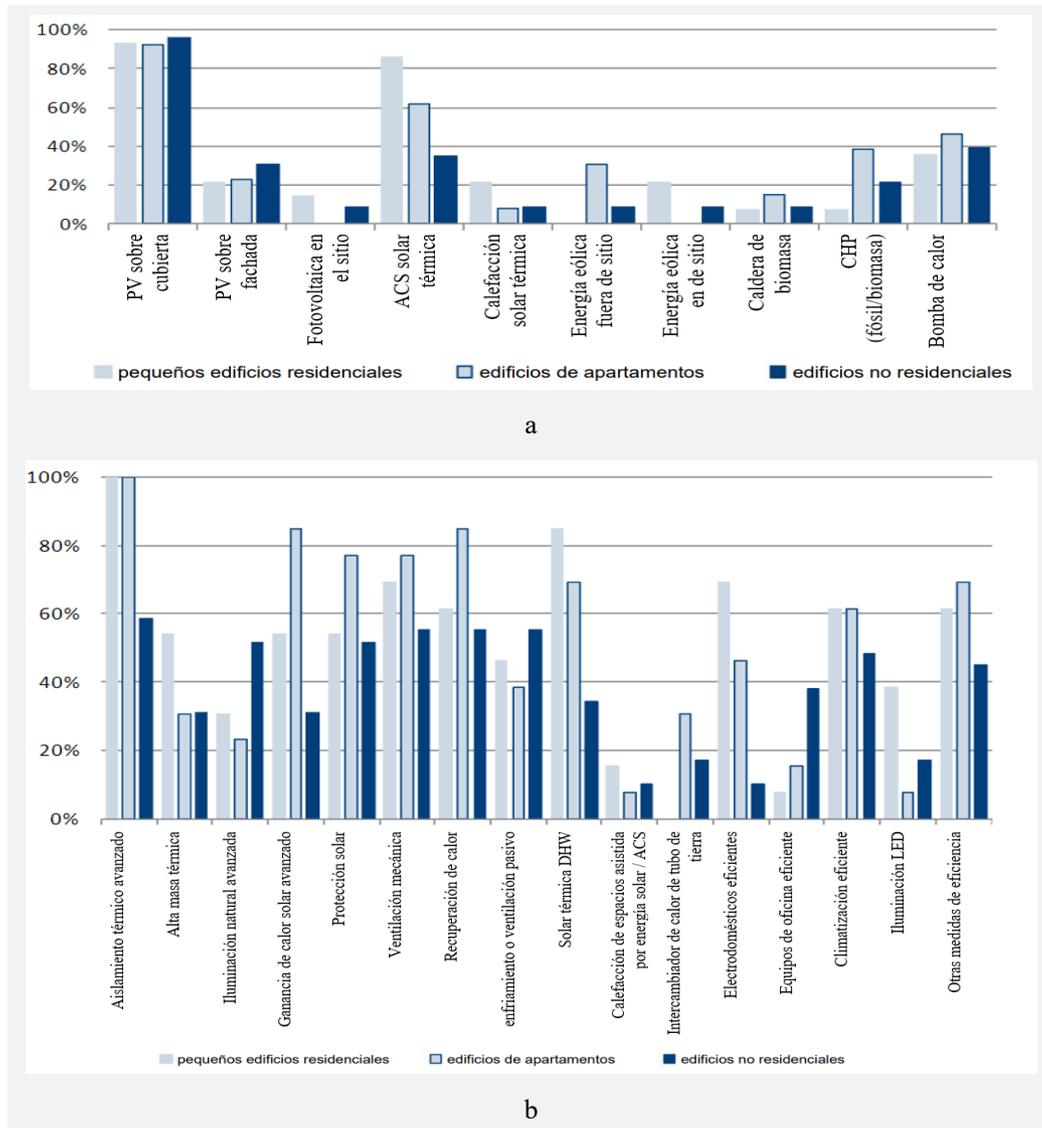


Figura 4: Resultados 2 de la Encuesta del Estudio: Hacia los Edificios Solares de Energía Cero a. Tecnologías aplicadas en diferentes tipos de edificios, b. Medidas pasivas y activas usadas en los NZEB para ahorro energético.

Fuente: (Musall et al. 2010)
Edición y traducción propias

Otro aspecto de gran importancia a considerar, para una mitigación efectiva en la reducción de GEI, a través del desarrollo de los NZEB, es contar con controles energéticos posoperativos.

Gómez Melgar (2017) realizó un análisis sobre las principales certificadoras energéticas voluntarias como: Passivhaus, LEED, BREAM, TRI-STAR, DGNB y HQE; en todas ellas no se contaba con un análisis posoperativo que evaluara el cumplimiento energético propuesto, ni tampoco se realizaba un análisis técnico de datos. Dado que los edificios inician la fase de consumo energético de forma permanente luego de finalizar el proceso de construcción y las acreditaciones energéticas; incluso los edificios generan mayores emisiones de GEI asociadas al consumo de energía en la fase operativa que en la constructiva (GlobalABC, IEA, y UNEP 2020; Bostancioğlu 2010), no estimar el cumplimiento energético posoperativo dificulta la estimación real de cumplimiento hacia la meta de tener edificios de energía cero neto y reducir verazmente las emisiones de GEI.

4. La iniciativa NZEB en el Ecuador

A nivel nacional, se han realizado varias acciones políticas y de eficiencia energética activa, que encaminan a la nación a reducir el consumo energético y las emisiones de GEI asociadas a la energía. Dentro de las acciones para reducir el consumo de energía están: el cambio de bombillos eléctricos de focos incandescentes por fluorescentes, el cambio de tecnología en los equipos del hogar y la clasificación energética comercial, que se impuso a los electrodomésticos en general. También se realizó una campaña exitosa por el cambio de tecnología en refrigeradores que contenían gases nocivos para la capa de ozono. Los cambios en el uso de energía por efecto de la eficiencia en “el sector residencial ha contribuido en gran medida a la disminución del consumo de energía con 119 petajulios desde el periodo 1979-1980 hasta 2012-2013” (Vallejo Carpio 2017).

Posteriormente la política se enfocó en reducir las emisiones de GEI asociadas a combustibles fósiles de uso doméstico, mediante la electrificación de sistemas de cocción y calentamiento de agua caliente. Sin embargo, una evaluación del impacto de la matriz energética ecuatoriana expuso que la implementación de cocinas de inducción y calentadores de agua eléctricos, si bien reduce emisiones de GEI, incrementaría al 50 %, la demanda de energía hacia el 2035, recomendando la implantación de estrategias de eficiencia energética pasiva y activa en el sector de edificios como: arquitectura

bioclimática, refrigeradores eficientes con calificación energética “A”, iluminación LED y electrodomésticos eficientes y calentamiento de agua por colectores solares, para reducir el consumo eléctrico promedio anual por abonado (Ríos, Guamán, y Vargas 2018).

En cuanto a los estatutos legales vigentes en el Ecuador existe la Ley Orgánica de Eficiencia Energética del 19 de marzo de 2019 (Registro Oficial 449), la cual establece el marco legal del Sistema Nacional de Eficiencia Energética (SNEE), y promueve la seguridad energética en el país, describiendo las competencias y responsabilidades de las entidades nacionales. Además, se tienen dos normas importantes en el sector de la construcción, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) – Eficiencia Energética de Edificaciones Residenciales (EE) o (NEC-HS-EE) de 2018 (EC MIDUVI 2018); y NEC Energías Renovables (EE) (NEC-HS-ER) (EC MIDUVI 2020); en materia de eficiencia energética para edificios residenciales, y sistemas solares térmicos para agua caliente sanitaria (ACS) – aplicaciones menores a 100 °C, respectivamente; las cuales son de cumplimiento obligatorio nacional. Otro avance importante es la Resolución Nro. ARCERNNR-013/2021 dentro la Regulación n.º ARCERNNR-001/2021, que permite que los sistemas de energías renovables generadas en los edificios puedan conectarse a la red pública, ya sea para exportar o importar energía en el edificio, mediante un medidor de energía bifásico (EC ARCERNNR 2021).

Gaudry et al. (2019) analizaron el ahorro de energía en los hogares guayaquileños con la implementación de la NEC-HS-EE. Eligieron dos viviendas en una zona climática húmeda muy calurosa de la ciudad de Guayaquil y aplicaron la NEC-HS-EE mediante simulaciones energéticas con el software DesingBuider. Los resultados mostraron una reducción promedio en el consumo 1046 kWh/m² equivalentes a 934.4 kgCO₂, sugiriendo estrategias complementarias de reducción de emisiones de GEI como un esquema de etiquetado para los usuarios residenciales y ampliar la tipología de edificaciones sujetas a la NEC-HS-EE más allá del uso residencial (2019).

Alvear Calle, Peña Toro y Labus (2013) analizaron la implementación de un edificio de energía cero (EEC) como medida contra la intensificación de energía y la mitigación de GEI, concluyendo que “la introducción de estrategias de eficiencia energética y sistemas de energía renovables pueden ser aplicadas con éxito en el diseño de los edificios en Ecuador”, sin embargo, solo las estrategias pasivas podrían ser aplicadas en ese momento (año 2013, REU 69 % verde). Otro estudio determinó las condiciones más favorables para edificios ecuatorianos por pisos climáticos en materia

de arquitectura bioclimática, estableciendo una metodología de evaluación de las estrategias para aplicarlas desde los inicios del diseño (Alvear Calle et al. 2016).

Varios estudios expusieron múltiples obstáculos para la implantación de un NZEB en el país, como la falta de datos climáticos y válidos en el país (Pérez Pérez y Parra 2017) conectar el edificio a una REU 100 % no verde (Alvear Calle, Peña Toro, y Labus 2013), el costo de la tecnología de las baterías para el almacenamiento en los suministro de energía solar (Montalvo Beltrán 2016; Alvear Calle, Peña Toro, y Labus 2013), el conocimiento previo que se requiere para el diseño arquitectónico y simulación energética, así como la escasa interacción y relación entre programas digitales de diseño arquitectónico y simulación energética (Pérez Pérez y Parra 2017), este último estudio estimo que, la metodología BIM podría ayudar en el proceso al conectar con gbXML la importación directa de la geometría del edificio.

En el país, existen varios edificios con certificaciones LEED, especialmente en las principales ciudades como Quito, Guayaquil y Cuenca. Más a la presente, no se tiene registro de un edificio de energía cero netos de energía en Ecuador (Musall et al. 2010). Sin embargo, existe una tendencia cada más mayor a buscar soluciones que aporten a la problemática global, tanto desde el sector inmobiliario y académico, así como de las distintas entidades técnicas y gubernamentales (Gaudry et al. 2019; Alvear Calle, Peña Toro, y Labus 2013; Pérez Pérez y Márquez Pérez 2016; Pérez 2014; INER 2016; Palme et al. 2017).

4.1. NZEB en Quito

Los aportes más significativos se han realizado en la ciudad de Quito. Ordoñez, Mora, y Gaudry (2019) desarrollaron una hoja de ruta para edificios de energía neta cero en Quito, apoyados en un análisis comparativo de edificios residenciales con 4 prototipos construcción convencional y 4 prototipos NZEB simulados con el clima de Quito, encontrando que en Quito el concepto de casa pasiva reduce la demanda de energía en comparación a los edificios convencionales y que la producción de ER en el sitio de NZEB supera el requerimiento de energía entre un 30 y 40 % (suministro de energía solo del área de cubiertas) concluyendo que si se puede tener un NZEB. La hoja de ruta refleja las limitantes tecnológicas para la implementación de edificios de energías cero netos en el país y las oportunidades de desarrollar nuevos conocimientos basado en baja tecnología de la construcción (evolución de saberes ancestrales) como pasos iniciales hacia un NZEB

en Quito. Un hallazgo muy interesante que se menciona en materia de optimización energética, es la relación entre los huecos de las fachadas norte-sur, un ligero incremento de las ventanas de la fachada sur (entre 1 al 5 %) con respecto a las ventanas de la fachada norte logra el equilibrio energético.

Probablemente tenga una fuerte relación con la cantidad de energía solar directa que reciben al año las fachadas norte y sur en la latitud en que se encuentra Quito, si bien Ecuador y Quito gozan de fama mundial por la latitud cero, no significa que toda la ciudad tenga latitud cero, los ficheros climáticos estándar para simulaciones energéticas de Quito registran la latitud de -0,15 para la ciudad, lo cual indica que en un año la fachada norte recibe unos días más de energía solar directa que la fachada sur, siendo un punto de partida para lograr la optimización al 100 % a escala global en los edificios; basados en la cantidad de energía solar directa que recibe cada lado de la fachada, la intensidad de esa radiación, conforme a la ubicación geográfica del emplazamiento del edificio y la cantidad de tiempo que recibe esa radiación, tal como sucede con las estaciones o variaciones climáticas del planeta.

Ordóñez et al (2019) analizó los parámetros constructivos más influyentes en el comportamiento térmico de los edificios residenciales de Quito, con múltiples configuraciones que resultaron en 16 prototipos simulados y la verificación de resultados mediante lecturas de temperatura interior en 2 edificios reales de similares configuraciones. Hallaron que el material y grosor de la envolvente (techos y pisos), la relación ventana-pared y la infiltración son los parámetros más sensibles, por tanto, mejorar la envolvente térmica del techo y usar materiales con mayor masa térmica en la envolvente vertical como ladrillo, puede ayudar a reducir el inconfort térmico al interior del edificio.

Un estudio de factibilidad económica y financiera para la implementación de tecnología Net Zero Energy en el suministro de energía de edificios en Quito, concluyó que no era factible su implementación debido al costo elevado de las baterías de los sistemas de suministro eléctricos fotovoltaicos y a la falta de política pública entorno a permitir conectar los edificios con producción de energía renovable en el sitio a la red pública (Montalvo Beltrán 2016). Si bien, los costos de las baterías aún se mantienen elevados, el obstáculo en la actualidad queda superado porque ya existe una política pública que permite conectar el edificio a la red de energía pública a través de una compra-venta de energía, tal cual lo sugerido el autor en su momento (EC ARCERNNR 2021).

Conclusiones del capítulo primero

De todo lo analizado se concluye que las contribuciones de la arquitectura para reducir las emisiones de GEI se dan principalmente mediante la eficiencia energética pasiva. Esto quiere decir, considerar el potencial de la arquitectura vernácula, mediante el uso, innovación y mejora de los materiales dentro del partido arquitectónico; estimar la aplicación de las estrategias según el lugar donde se implante el edificio; mejorar y optimizar los criterios dados en nuestra propia arquitectura vernácula; fusionar buenas prácticas de la construcción de nuestros antepasados con la técnica e industria actual del parque de edificios hacia una arquitectura en comunión con el ser humano y el clima, son un camino viable y rápido en la mitigación al CCA en nuestro contexto.

A nivel internacional Europa lidera las políticas en cuanto a edificios y reducción de emisiones, se registra una mayor presencia de NZEB, circunscrito en distintos climas y ubicado tanto dentro de la urbe, su periferia o ruralidad.

A nivel de Latinoamérica, la hoja de ruta marca un camino fijo hacia edificios climáticamente neutros, donde las recomendaciones para edificios nuevos se centran en que se adopten diseños pasivos para reducir la necesidad de uso de sistemas de climatización. Varios países latinos han iniciado el camino hacia ceros netos de energía en edificios.

A nivel nacional existen acercamientos hacia los NZEB desde sectores instituciones relacionadas a la conservación de energía y medio ambiente, y la academia. El sector residencial ha venido trabajando en términos de eficiencia energética activa, así como, algunas leyes y normas técnicas de energía en la construcción que facilitan el posible desarrollo de un NZEB en Quito.

Capítulo segundo

Marco teórico

Este capítulo analiza la teoría sobre cómo desarrollar un edificio de energía cero netos, en busca de los parámetros que rigen la concepción y el diseño de un NZEB. Pretende responder el objetivo específico número 3. Por ello, se revisa la teoría concerniente a otras disciplinas científicas y pensamientos referentes a NZEB para su estimación y desarrollo. El objetivo de este capítulo es, por tanto, describir el diseño de un NZEB, en relación al clima y la arquitectura.

1. Energía

La primera fuente de energía que utilizó el ser humano fue el alimento que da calor y energía al cuerpo (2 a 3 GJ persona/año), luego se usó leña para iluminar, calentar espacios y para cocer alimentos (Blok y Nieuwlaar 2021, 1). Después la agricultura usó energía en el procesamiento de alimentos y transporte mediante el trabajo de animales de tiro y los molinos de viento para mover agua y granos (primeros bosquejos de energía eólica e hídrica) (2021, 1), Desde el año de 1750 el uso de la energía se expandió a procesos industriales, luego la máquina de vapor y la energía eléctrica transformaron el sistema energético (Blok y Nieuwlaar 2021, 1–2).

Para Çengel y Boles (2008, 2, 53) la energía es la “capacidad de causar cambios” mediante el trabajo y/o calor, de forma: térmica, mecánica, cinemática, potencial, eléctrica, magnética, química o nuclear. Toda la energía presente en el planeta proviene del sol (incluida la energía fósil)¹⁷ y se distribuye a través de tres ejes fundamentales: 1. radiación solar en la tierra; 2. disipación natural de energía de rotación de la tierra y; 3. flujo de calor geotérmico del núcleo de la tierra (Anexo 7) (Gommans 2012; Blok y Nieuwlaar 2021).

La energía primaria es energía en la forma original como se presenta en la naturaleza, siendo renovables aquellas de fuente inagotable o que se regeneran rápido y,

¹⁷ Blok y Nieuwlaar consideran que la energía fósil es energía solar de la biomasa fosilizada que se formó mediante procesos complejos durante millones de años almacenándose por estratos dentro del subsuelo terrestre. En la Anexo 7 no se incluye al sol como fuente directa de la energía fósil a fin de evitar conclusiones erradas, pues podría asumirse que es renovable por su origen, cuando su estatus de no renovable radica en el largo tiempo que toma en formarse y renovarse.

no renovable aquellas agotables, que no se regenera o se regenera muy lento (Anexo 7) (Blok y Nieuwlaar 2021, 18; Gommans 2012, 32), aunque la energía nuclear y el gas natural son energías no renovables, la Unión Europea le ha dado un estatus temporal de energía renovable a través de su taxonomía verde (Comisión Europea 2022, párrs. 2–3), dado las consideraciones de la actual coyuntura socioeconómica, política y ambiental por las que atraviesa el continente europeo. Adicional Blok y Nieuwlaar (2021, 97) consideran que la energía geotérmica una vez que agota su fuente de calor no se regenera.

La energía secundaria, también llamada energía final es el producto de conversión de la energía primaria (Gommans 2012, 32; Blok y Nieuwlaar 2021, 19) para que esté disponible y pueda usarse. La conversión de energía siempre produce pérdidas, así como el transporte hasta su usuario final. La energía secundaria predominante en el ámbito doméstico es la electricidad y el calor. La unidad de medida básica de la energía en el sistema internacional (SI) es el Julio (J). Un julio equivale al trabajo producido por una fuerza de un newton,¹⁸ cuyo punto de aplicación se desplaza un metro. Para medir cuanta energía se necesita, está en uso o ha sido consumida, es necesario calcularla en función del tiempo, siendo ideal las unidades de potencia. La potencia es aquella cantidad de energía medida en unidades de tiempo expresada como Julio por segundo (J/s) o W. La forma más común de expresar la energía eléctrica en el sistema no internacional (no SI) es kilovatio hora (kWh) y el kilo de unidad térmica británica (kBTU).

1.1. Uso de energía en los edificios

La energía en edificios residenciales se utiliza para calefacción, agua caliente, iluminación, refrigeración y congelación, lavado y secado de ropa, lavado de vajilla, aire acondicionado, cocina, tecnología de la información y comunicación (TIC), multimedia, entre otros (Blok y Nieuwlaar 2021, 43–44). En países con climas templado y frío la calefacción representa alrededor del 50 % de la demanda de energía (2021, 43).

1.2. Factores que influyen el uso de energía en los edificios

Yoshino, Hong, y Nord (2017, 124–25) determinaron 6 factores que influyen el uso de energía agrupados en factores físicos y factores humanos (Tabla 3). Los factores

¹⁸ Un Newton es una fuerza de aceleración de un metro en un segundo de tiempo elevado al cuadrado que se le aplica a un cuerpo de un kilogramo de masa.

físicos como el clima, la envolvente y el servicio y sistemas de energía, pueden ser controlados mediante la aplicación de la eficiencia energética pasiva y activa, así como la tecnología de energía renovables, durante el inicio del diseño, la fase de construcción y en menor proporción en la readecuación. En oposición, los factores humanos están más asociados a la fase posoperativa.

Tabla 3
Principales Factores que Influyen en el Uso de Energía

Físicos	Humanos
<ul style="list-style-type: none"> • Clima • Envolvente del edificio • Servicio y sistemas de energía del edificio 	<ul style="list-style-type: none"> • Operación y mantenimiento del edificio • Actividades y comportamiento de los ocupantes • Calidad provista del ambiente interior

Fuente: (Yoshino, Hong, y Nord 2017, 124–25)
Elaboración y traducción propias

Se estima que dos tercios de las emisiones totales de los edificios asociadas al consumo de energía suceden en la fase posoperativa. Por tanto, si los factores humanos inciden sobre el real valor estimado durante la planificación y construcción del edificio, la visión de trabajar en la reducción de emisiones desde la fase operativa mediante edificios cero netos de carbono operacional, podría distar de la real magnitud proyectada para el consumo, reduciendo la efectividad de la medida de mitigación de cero netos. Es indispensable el control adicional en la etapa posoperativa que evite un consumo desmedido de recursos energéticos por desperdicio de energía.

Adicional existe otro factor que incide el consumo de energía, el factor social (Yoshino, Hong, y Nord 2017). Los aspectos sociales, como hábitos de uso de edificios, costo de la energía, actitud de los ocupantes y condiciones políticas, afectan la eficiencia energética de los edificios y el nivel de vida de los usuarios, e influyen en la capacidad de los usuarios del edificio para pagar las facturas de energía o invertir en medidas de eficiencia energética. Yoshino, Hong, y Nord consideran que la falta de conocimiento sobre los factores que inciden en el uso de energía es una barrera importante para lograr la eficiencia energética y el ahorro de energía en los edificios.

Los factores humanos y sociales pueden ser controlados con medidas de ahorro de energía mediante la combinación de la conservación de energía y eficiencia energética técnica o tecnológica (Pérez-Lombard, Ortiz, y Velázquez 2013, 251). El término "conservación de energía" se refiere a una reducción en el consumo de energía y en la cantidad o calidad del servicio prestado. Hay tres tipos de medidas de conservación de

energía: ahorro sin cambiar la eficiencia energética (la entrada de energía y la prestación del servicio se reducen por igual), ahorro con mejora de la eficiencia energética (la entrada de energía se reduce más que el servicio prestado), y ahorro con disminución de la eficiencia energética (la entrada de energía disminuye menos que la prestación del servicio). Ejemplos incluyen el uso de equipos Smart como sensores para apagar luces, o reducir el uso del automóvil, o ajustar temperaturas en sistemas de climatización (2013). Es decir, son medidas implementadas para reducir el uso intensivo de la energía, incluye todo tipo de ahorro energético con y sin eficiencia energética.

2. Eficiencia energética

En términos generales, ser eficiente es “hacer más con menos” (Comisión Europea 2005). Por tanto, la eficiencia energética (EE) es la capacidad de usar menos energía para lograr una tarea específica, reduciendo el consumo de energía, los costos y emisiones asociados, sin restar calidad y confort, pudiendo incluso aumentar la calidad del servicio. La EE se logra a través de medidas activas y pasivas adoptadas tanto, para edificios como para los equipos. La EE implica optimizar tanto el recurso recibido como el servicio prestado (Pérez-Lombard, Ortiz, y Velázquez 2013, 241).

2.1. Eficiencia energética en los edificios

La eficiencia energética en edificios (EEE) es un tema de gran importancia en la actualidad debido a los altos/bajos¹⁹ costos de la energía y las preocupaciones medioambientales, pero concretamente al número de emisiones de GEI que provocan los edificios. La EEE se refiere a la reducción del consumo de energía en un edificio con el objetivo de optimizar costos y reducir emisiones de GEI, sin que esto implique afectar el confort o la funcionalidad del edificio.

Para lograr una EEE real se requiere prestar atención a la eficiencia de los servicios del edificio, pues a menudo se confunde con ahorro energético o la

¹⁹ Ambos extremos limitan la eficiencia energética, si el costo de la energía es alto, limita la capacidad de ahorro e inversión en EE por pago de costosas facturas, si el costo de energía es bajo existe un desincentivo económico por efectuar cambios o invertir en algo que no representa una inversión futura particular. Generalmente el costo de energía bajo se relaciona a subsidios gubernamentales.

implementación de nuevas tecnologías como las tecnologías de energías renovables o inteligentes (Pérez-Lombard, Ortiz, y Velázquez 2013).

Algunas formas de lograr la EEE son: Por eficiencia energética técnica, al mejorar la tecnología y reducir el uso de energía sin afectar la calidad de los servicios prestados. Por productividad energética, cuando la reducción del uso de energía por mejoras de la eficiencia, sirve para brindar más servicios, con lo cual no se ahorra energía realmente, pero sí se mejora la eficiencia. Por optimización de la eficiencia energética, cuando se proporcionan mejores servicios utilizando menos recursos (Pérez-Lombard, Ortiz, y Velázquez 2013, 248–49). En edificios existen dos tipos de eficiencia energética y son: eficiencia energética pasiva (EEP) y eficiencia energética activa (EEA).

La EEP son aquellas técnicas de diseño y construcción, aplicadas sobre las características físicas del edificio, que utilizan la energía natural del sol, la ventilación y la inercia térmica del edificio para reducir el consumo de energía (van den Dobelsteen et al. 2019), las cuales se describen más adelante en este capítulo.

La EEA se relaciona a la optimización energética de sistemas mecánicos y electrónicos instalados en un edificio para reducir el consumo de energía, incluye el desempeño energético de los sistemas de iluminación y aire acondicionado eficientes, paneles solares y sistemas de generación de energía renovable, entre otros (Pérez-Lombard, Ortiz, y Velázquez 2013). Por ejemplo, el uso de bombillas o equipos eléctricos con calificación energética “A” reduce el consumo de electricidad, o la combinación de energía fotovoltaica y solar térmica (producción simultánea de electricidad y calor²⁰) puede optimizar significativamente el rendimiento mutuo al entrar en cooperación mutua ambos sistemas (van den Dobelsteen et al. 2019).

En cuanto a los mecanismos de control de la EEE, están los sistemas de gestión energética (EMS), estos ayudan a los usuarios a monitorear y controlar el consumo de energía en todo el edificio, y proporcionar informes detallados sobre el consumo de energía, permitiendo a los usuarios tomar decisiones informadas para reducir el consumo de energía. Existen varios tipos de monitoreos de consumo de energía en edificios, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones.

²⁰ La generación de electricidad mediante energía solar fotovoltaica produce calentamiento en el sistema fotovoltaico, mismo que debe ser enfriado, este calentamiento reduce el rendimiento. Cuando se combina con el sistema de generación de calor solar térmico, el calor generado por el sistema fotovoltaico aporta calor al sistema solar térmico reduciendo gasto de energía por enfriamiento y pérdidas de energía por calentamiento.

Los datos generados por los monitores de consumo de energía pueden ser de carácter público o privado, pero en general, son considerados como información confidencial y están sujetos a las leyes y regulaciones de protección de datos conforme a cada país. Por lo tanto, el acceso a estos datos estará limitado a personas autorizadas, como el propietario del edificio o el personal de mantenimiento.

Algunos sistemas de monitoreo de consumo de energía también pueden permitir el acceso público a ciertos datos, como el consumo de energía en tiempo real o los datos históricos del consumo de energía, y ser utilizado para promover la transparencia y la educación sobre el consumo de energía, así como para proporcionar información útil para investigadores y expertos en eficiencia energética. Al respecto, Yoshino, Hong, y Nord (2017) consideran que se debe encontrar un enfoque medio en cuanto al manejo de datos de la información en torno a los monitores de consumo de energía, con la finalidad de tener el acceso a la información de consumo de energía posoperativo de los edificios.

Para evaluar la eficiencia energética en edificios existen varios indicadores, destacándose el índice de intensidad de uso de energía (EUI, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos y el indicador de rendimiento energético (EPI, por sus siglas en inglés) europeo, que miden la relación entre la entrada de energía y la salida de servicios energéticos. (Pérez-Lombard, Ortiz, y Velázquez 2013). Esta investigación usará el EUI como medida de evaluación de eficiencia energética en los prototipos simulados. La función de los índices es comparar el consumo de energía de un edificio con el consumo de energía de un edificio similar en tamaño, ubicación geográfica y uso (edificio de referencia)²¹ o conforme a las políticas y regulaciones impuestas, y proporcionan una forma de medir el rendimiento energético.

Para mantener la EEE, se recomienda realizar inspecciones regulares y mantenimiento de los sistemas existentes para asegurar su correcto funcionamiento y maximizar su eficiencia, y promover prácticas de uso responsable de la energía entre los usuarios de un edificio (Yoshino, Hong, y Nord 2017).

Mantener la EEE se vuelve medular en un contexto de cero netos, donde las exigencias de reducción de energía se maximizan en busca de reducciones de emisiones de GEI, mismas que sin un correcto control posoperativo podrían disminuir la efectividad

²¹ La mayoría de EUI parten de un edificio de referencia o de estimaciones estadísticas de análisis simulados energéticos de óptimo rendimiento, pero también pueden estar determinado por la política y metas propia de cada país o región en función de los objetivos propuesto para mitigar emisiones de GEI asociados al consumo de energía de los edificios.

de las medidas de mitigación de cero netos. En la actualidad las distintas certificadoras energéticas de edificios no efectúan controles posoperativos de energía y se limitan a los datos presentados durante la fase proyecto y/o construcción del edificio (Gómez Melgar 2017), esto genera cierta ambigüedad en cuanto a mantener la medida real establecida como EUI-bajo máximo admisible, en el consumo de energía de los edificios durante toda la fase operativa de los mismos.

En los edificios, la eficiencia energética pasiva con el correcto empleo de dispositivos eléctricos de calidad reduce sustancialmente el consumo de energía por factores físicos, mientras que los dispositivos activos e inteligentes limitan el desperdicio de energía por factores humanos (Yoshino, Hong, y Nord 2017).

En otras palabras, la eficiencia energética en edificios se logra a través de una combinación de técnicas de diseño y construcción pasivas, en combinación con sistemas activos como equipos mecánicos y electrónicos, y se evalúa a través del EPI o el EUI.

3. NZEB

El termino energía cero o zero energy en los edificios destaca en su definición la “energía” y “cero” emisiones de carbono equivalente en el uso de energía durante el periodo operativo del edificio. Un edificio de energía cero o Zero Energy Building conocido por sus siglas en ingles ZEB es un edificio energéticamente eficiente a través de medidas de ahorro de energía adecuadas, capaz de generar electricidad u otros vectores de energía a partir de fuentes renovables para compensar su demanda de energía, pudiendo conectarse a la infraestructura urbana de energía o ser autónomo (Sartori, Napolitano, y Voss 2012)). El termino cero netos se refiere al equilibrio entre la cantidad de gases de efecto invernadero producidos y la cantidad eliminada de la atmósfera (Jaysawal et al. 2022). El termino neto indica que existe un equilibrio, en edificios recalca que existe un equilibrio y/o saldo entre la energía renovable extraída y devuelta a las redes de energía durante un período de tiempo, nominalmente un año (Sartori, Napolitano, y Voss 2012). Por tanto, el termino Net ZEB hace referencia a edificios conectados a la infraestructura energética o red pública (2012). La expresión “ahorro de energía adecuada” o “energéticamente eficiente” con frecuencia usadas en la caracterización de un ZEB se refiere al uso eficiente de energía, es decir, la eficiencia energética pasiva y activa que se aplicó al edificio para lograr un óptimo desempeño energético (2012).

Un edificio de energía cero neto o Net Zero Energy Building conocido por sus siglas en inglés NZEB o Net ZEB es un edificio conectado a los sistemas de energía urbana, que logra un alto rendimiento energético a través de criterios de eficiencia energética pasiva y activa como concepto de casa pasiva y empleo de dispositivos pasivos y activos (incluido dispositivos inteligentes), que suple su demanda con autogeneración de energía renovables en el sitio o fuera de sitio; y, cuyo saldo o balance energético anual es igual o mayor a cero (Sartori, Napolitano, y Voss 2012; Sartori et al. 2010; Austin, Chung-Camargo, y Mora 2021; Eley 2016; Harkouss 2018; Jaysawal et al. 2022; Attia 2018).

Existen otras definiciones internacionales de orden político e institucional donde las definiciones surgen en función de los objetivos de cada entidad o nación. Para la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire (ASHRAE, por sus siglas en inglés), por ejemplo, un NZEB es aquel que produce tantas energías renovables (ER) en sitio como su consumo anual, pudiendo estar conectado a la red solo para exportar el excedente de energía generada cuando su saldo de energía supera la base prevista de consumo. Para el Departamento de energía de Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés) en cambio, un NZEB es un hogar de energía cero netos (NZEH) con necesidades reducidas de energía a través de las ganancias de eficiencia entre un 60 a 70 % menos que los edificios convencionales, con equilibrio de demandas, suministrado por ER en sitio que cubren la demanda anual. Para la Federación Europea de Calefacción y Asociación de Ventilación y Aire acondicionado (REHVA, por sus siglas en inglés) la demanda anual de energía en sitio puede ser suplida tanto en producción en sitio como mediante créditos verdes de alimentación de energía relacionada, pudiendo ser o no independiente de la red. Para la Directiva de rendimiento energético de edificios (EPBD, por sus siglas en inglés) un edificio de energía cercana a cero “Nearly Zero Energy Building (nZEB)” es un edificio con alto rendimiento energético dotado principalmente de ER ya sea dentro o fuera de sitio (Harkouss 2018).

Por otra parte, existen varias clasificaciones de NZEB. Por ejemplo, Lausten citado en (Harkouss 2018) clasificó a los edificios en función de dependencia y dotación de energía a red pública, y realizó cuatro categorías que van de mayor a menor dependencia: cero netos, autónomos cero, energía plus o positiva y carbono cero, respectivamente. Dentro de la clasificación de Lausten un Edificio de Energía cero netos es un edificio neutral que no usa combustibles fósiles, pero que están conectados a la red eléctrica urbana, cuya energía exportada a la red de suministro es igual a la importada anual.

Torcellini et al. citado en (Harkouss 2018) realizaron dos clasificaciones, una basada en el suministro de energía renovable y otro por método de medición, la primera genera cinco categorías que las denomina opciones y van desde cero a cuatro, en orden de menor a mayor exigencia, la segunda la divide en cuatro tipos de edificios: edificio cero netos del sitio, fuentes de energía cero netos, costos de energía cero neto y emisiones cero netos. Pless et al. Citado en (Harkouss 2018) clasifica a los NZEB por su capacidad de producción de energías renovables, subdivide en cuatro categorías a la NZEB con denominación de letras alfabéticas que van de la letra “A” y “D” que indican el grado de producción de mayor producción a menor producción respectivamente.

Gómez Melgar (2017) agrupó a los edificios de energía cero como edificio de consumo mínimo de energía (MEB), dentro de esa categoría generó tres subcategorías: edificio de energía casi nula (nZEB), edificio de consumo real de energía cero (ZEB) y edificio que produce más energía que la consume (+ZEB). Wells, Rismanchi, y Aye propusieron una clasificación en función de la evolución, política y nivel de exigencias a los NZEB a lo largo del tiempo (en ese momento²²). Identificaron cinco generaciones (G) que se pueden evidenciar en la Tabla 4: 1G: Edificios verdes, 2G: nZEB, 3G: NZEB, 4G: NZEB, 5G: Generaciones futuras (Wells, Rismanchi, y Aye 2018, 619).

Tabla 4
Clasificación de NZEBs según Wells, Rismanchi, y Aye

Requerimientos	1G: Edificios verdes	2G: nZEB	3G: NZEB	4G: NZEB	5G: Futura Generación
Uso de la eficiencia energética	✓	✓	✓	✓	✓
Consideración de los impactos en el medio ambiente natural	✓	✓	✓	✓	✓
Soporte político		✓	✓	✓	✓
Uso del balance energético			✓	✓	✓
Consideración de la estación de carga de vehículos eléctricos				✓	✓
Viabilidad económica				✓	✓
Consideración del cambio climático				✓	✓
Almacenamiento de energía in situ y tecnología "inteligente"				✓	✓
Energía incorporada (infraestructura de tecnología renovable)				✓	✓
Edificio regenerativo que crea una economía compartida					✓
Distritos de energía neta cero					✓
Uso del balance energético positivo					✓

Fuente: (Wells, Rismanchi, y Aye 2018, 619) citado en (Ordoñez, Mora, y Gaudry 2019)
Traducción propia

²² Al ser una clasificación por evolución, cada categoría también varía a lo largo del tiempo, tal es el caso de los edificios verdes y nZEB.

Resultan diversas las propuestas que surgen en torno a un NZEB, no obstante, todas convergen siempre una sola cosa, el “*balance cero netos*” que requiere entre la producción y la demanda de energía, desde múltiples aristas como económicas, de emisiones, producción de energías renovables, capacidad energética, entre otras.

Los pensamientos surgidos en relación al tema sin duda han generado múltiples aportes a la determinación de un NZEB. Mas, aún persiste cierta ambigüedad en cuanto a su caracterización. Sartori, Napolitano, Marszal, Pless, Torcellini y Voss identificaron los elementos importantes de un NZEB, así como la relación entre esos elementos y una medida como mecanismo operativo de evaluación NZEB (Sartori et al. 2010) que luego fue actualizada (Sartori, Napolitano, y Voss 2012); y servirá como base de valoración de eficiencia energética en los prototipos de NZEB del presente estudio y se analizan a continuación.

Balance neto ZEB

Para que un edificio sea considerado un NZEB, el balance anual neto entre la demanda y producción de energía debe igualar mínimo a cero. Sin embargo, solo cumplir con el requisito de balance cero netos no es suficiente, el edificio también debe cumplir con medidas de eficiencia energética pasiva y activa y tener en cuenta la interacción del edificio con la red eléctrica urbana. Sartori et al. (2010) identificaron dos tipos de equilibrios, el equilibrio de carga/generación (dentro de los límites del edificio) y el equilibrio de importación/exportación (fuera de los límites del mismo), y establecieron un marco formal que integra al NZEB responsablemente con el medio ambiente.

También identificaron los principales elementos para caracterizar un NZEB, la relación entre esos elementos y una medida para poder determinar si los edificios, son o no NZEB (Figura 5). Dichos elementos son: 1. límite del sistema de construcción, que incluye el límite físico (cargas y generación de un edificio o un grupo de edificio) que determina si los recursos renovables son en el sitio o fuera del sitio; y el límite de balance que establece que usos de energía (agua caliente, iluminación, electrodomésticos, etc.) se incluyen en el balance. 2. redes de energía, son redes urbanas de energía como redes eléctricas o térmicas al que el edificio se conecte; y, sistema de ponderación²³ (demanda

²³ Es el sistema de ponderación que se asigna a un NZEB en el campo de la energía con la finalidad de comparar la eficiencia, es la conversión de unidades físicas de la energía utilizada/producida por el

ponderada-suministro ponderado) como el balance cargas/generación o importación/exportación (Figura 5) (Sartori, Napolitano, y Voss 2012).

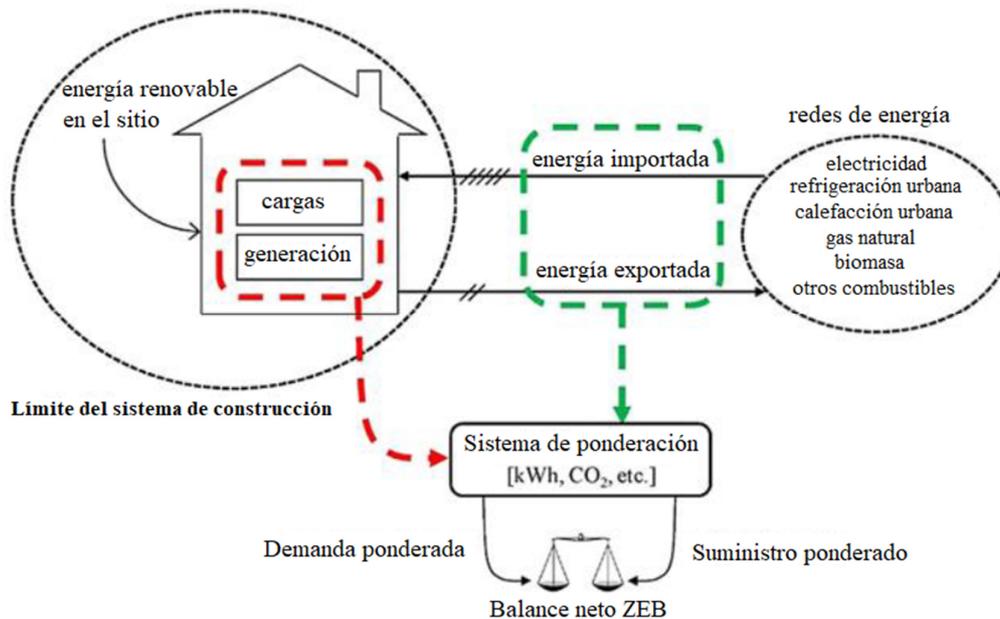


Figura 5: Relación ZEB-redes de energía en un NZEB

Fuente: (Sartori, Napolitano, y Voss 2012)

Edición y traducción propias

Cálculo del Balance neto ZEB

Los autores entregan tres opciones de cálculo para estimar el balance Neto ZEB (Ec1), dos de los cuales se desglosan y analizan en esta investigación. La primera opción es restar la importación de la exportación de energía anual (Ec2), la segunda opción se da mediante la relación anual de sustracción entre la generación y cargas de energía del edificio (Ec3) y una tercera similar a la segunda, pero a menor escala temporal (mensual).

$$\text{Balance Neto ZEB} = |\text{suministro ponderado}| - |\text{demanda ponderada}| = 0 \quad \text{Ec1}$$

El equilibrio de la Ec1 representa el concepto central de una definición NZEB. El balance neto ZEB es la condición que cumple un NZEB cuando la demanda ponderada es cubierta por la producción propia y/o no supera al suministro ponderado.²⁴

edificio a otras formas de medida por ejemplo emisiones GEI o EUI. El sistema de ponderación también puede tener en cuenta factores políticos, por ejemplo, las metas de reducción de emisiones de un gobierno.

²⁴ Generación de energía en el sitio transformado a unidades de medida específica para el cálculo, por ejemplo, para comparar resultados de consumo con el EUI se transforma en unidades [kWh × año] / m².

La energía importada que ingresa al límite de construcción del edificio incrementa el aporte de energía al mismo, pero también puede aportar efectos negativos, por tanto, se requiere establecer un balance de equilibrio entre la energía recibida por las REU y la energía entregada a las REU, y a la vez, estimar posibles aportes de emisiones asociados a la energía que ingresa de la REU (por ejemplo, la generación con combustibles fósiles) o de la propia tecnología de cogeneración utilizada (por ejemplo, la energía incorporada²⁵ que porta un sistema fotovoltaico), según sea la determinación impuesta (meta) en el sistema de ponderación. La Ec2 detalla el equilibrio exportación/importación.

$$\sum_a e_a \times p_{e,a} - \sum_a i_a \times p_{i,a} = Ee - Ei \geq 0 \quad \text{Ec2}$$

Donde e e i significan exportado e importado, respectivamente; p representa factor de ponderación y a el portador de energía. Ee y Ei significan totales de energía exportada e importada ponderada, respectivamente.

La demanda de energía de un NZEB requiere ser menor o igual que su propia generación de energía renovable. La Ec3 detalla cómo se mide este equilibrio.

$$\sum_a g_a \times p_{g,a} - \sum_a c_a \times p_{c,a} = G - C \geq 0 \quad \text{Ec3}$$

Donde g y c significan generación (producción) y carga, respectivamente; p representa factor de ponderación y a el portador de energía. G y C significan totales de energía producida y cargas ponderadas, respectivamente.

La Figura 6 describe tres relaciones de equilibrio para lograr el balance neto ZEB, la gráfica señala una relación de igualdad entre la generación ponderada (generación de energía, energía exportada y generación neta mensual) con la demanda ponderada (cargas, energía importada y carga neta mensual) respectivamente. La suma de las cargas y la energía importada determinan el autoconsumo del edificio. También establece una medida de eficiencia energética del edificio en función de un edificio de referencia y las cargas del edificio.

²⁵ La energía incorporada es aquella energía que se incorpora a un producto o un bien, es la energía primaria que se requirió para crear o producir el producto y se integra como parte del mismo, considera todas las energías usadas para producir ese bien y en todas las etapas. No diferencia el tipo de fuentes de energía (renovable o no renovable) provistas en su construcción.

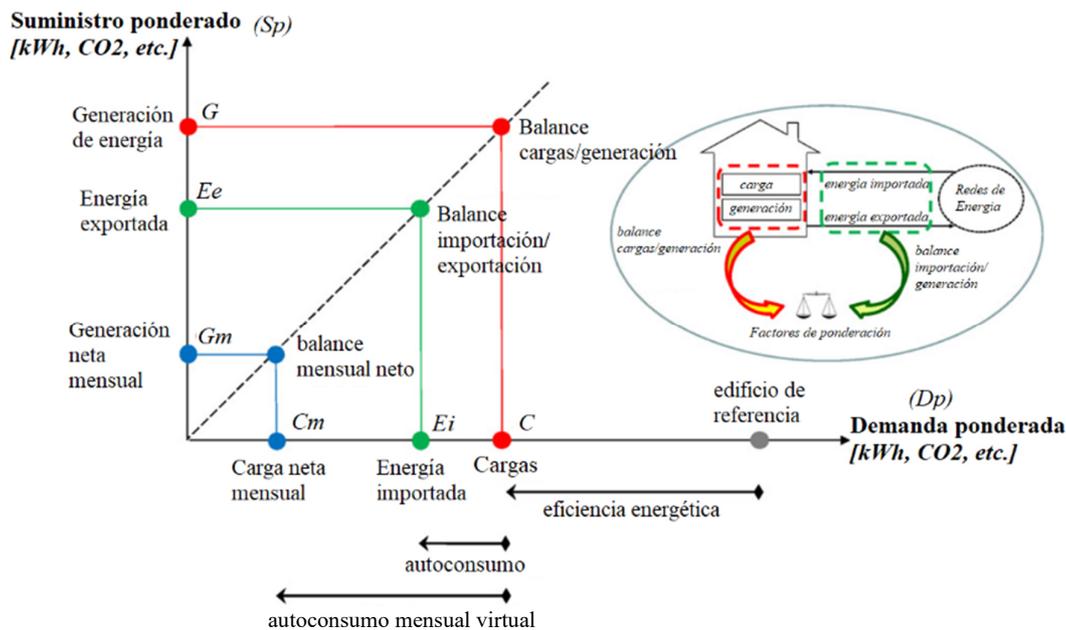


Figura 6: Opciones de cálculo para el balance/saldo neto cero

Fuente: (Sartori, Napolitano, y Voss 2012)

Edición y traducción propias

El complicado ejercicio de diseño de un NZEB

“En un modelo energético, cada superficie (pared, techo o piso) está representada por coordenadas y números que describen su posición en el espacio, su altura, ancho, inclinación y orientación. Cada superficie hace referencia a un conjunto de construcción que describe la cantidad de aislamiento, su capacidad para almacenar calor (masa térmica) y las propiedades de la superficie (áspera o lisa, clara u oscura). [...] Se hacen suposiciones acerca de cuándo se encienden o apagan las luces, cuándo entran y salen personas del edificio y cuándo se usa el equipo. [...] Los modelos energéticos pueden volverse bastante complejos [...] Un modelo demasiado simple pasa por alto interacciones importantes, pero un modelo demasiado complejo es costoso de desarrollar, lento de ejecutar y cargado de información superflua; además, los resultados pueden ser difíciles de interpretar.” (Eley 2016)

Entre las décadas de 1960 y 1970, la investigación en simulación y modelización se intensificó con el auge de las computadoras y la matemática aplicada, y ha evolucionado a lo largo del tiempo (Turkle 2009). Los modelos arquitectónicos son simplificaciones de la realidad futura, pues los proyectos aún no han sido construidos. Sin embargo, gracias al actual desarrollo de la informática, los modelos tridimensionales arquitectónicos lucen tan realistas (Renders conceptuales/foto realismos) que superan la misma realidad (Eley 2016). En oposición, simular energéticamente un edificio es usar

una herramienta de cálculo matemático para predecir el consumo y generación de energía. El diseño de un NZEB requiere simulaciones energéticas, así como un equipo de trabajo interdisciplinario, lo cual limita el normal ejercicio del diseño arquitectónico en el planteamiento de un NZEB (Attia 2012).

En edificios, la simulación energética modela y analiza el rendimiento energético de un edificio, para predecir el consumo de energía y la eficiencia energética de un edificio, en función de diferentes factores, por ejemplo, la orientación, la forma, el tamaño, tipo de sistema constructivo, los equipos electrónicos y los patrones de uso, entre otros, con el objetivo de ayudar a los profesionales a tomar decisiones informadas sobre la eficiencia energética y el rendimiento energético de los edificios, e identificar oportunidades para mejorar el ahorro de energía y la sostenibilidad. Actualmente, la simulación energética es una parte importante del proceso de diseño y construcción de edificios, y se utiliza para cumplir con regulaciones, normativas; y, estándares internacionales, ambientales y de construcción (Formación Efinovatic 2019).

La simulación energética “es una poderosa herramienta en la búsqueda de soluciones de diseño que garanticen el bienestar de los ocupantes, reduzcan el consumo de energía, satisfagan las aspiraciones de sostenibilidad, mitiguen el impacto ambiental y contribuyan a la reducción del cambio climático” (Clarke 2001) citado en (Attia 2012). Una razón de mayor peso para considerar las simulaciones energéticas en el diseño de un NZEB, es el hecho que el “20 % de las decisiones que se toman al inicio del diseño influyen en un 80 % de todas las decisiones de diseño a posterior” (2012), realizar análisis energéticos previos del bosquejo de diseño, con criterios que contemplen las estrategias pasivas y activas sugeridas para cada lugar y las tecnologías recomendadas para energías renovables, ayuda a plantear soluciones más reales al clima del medio externo del emplazamiento, previo a llegar al diseño final ideal, reduciendo el tiempo de inversión en el diseño de un NZEB.

Uno de los programas más potentes y a la vez más complejos matemáticamente es EnergyPlus (e^+), realiza completas y complejas simulaciones energéticas, pero la comunicación entre usuario y programa es a través de un lenguaje de programación²⁶ (Fortran). En el siguiente capítulo se amplía la descripción de e^+ . Favorablemente, este software interactúa con múltiples aplicaciones desarrolladas a su alrededor para facilitar su accesibilidad y operatividad. En este sentido existe varios programas que reducen ese

²⁶ Es un conjunto de reglas sintácticas y semánticas que permite a un humano escribir instrucciones para que una computadora o programa de computadora determinado realice tareas.

proceso complejo de programación, aunque cada software siempre va a requerir de un conocimiento previo a su utilización, en cuanto a su manejo y funcionamiento.

Los programas que permiten modelar energéticamente, mediante interfaces gráficas, algunos en forma bidimensional y tridimensional son: DesignBuilder, HEED (Home Energy Efficient Desing), eQuest (Commercial Building Energy Modeling Tools), ENERGY-10, Autodesk con Autodesk Insight y Autodesk Insight 360, BEopt (Residential Building Energy Modeling Tool), SketchUP con OpenStudio (Commercial Building Energy Modeling Tool), Sefaira y SgSave, ResStock (Residential Stock Modeling Tool), RETScreen (Renewable Energy Modeling Tool), IES VE-Ware, TRNSYS, IDA-ICE, HAP (Hourly Analysis Program), DIVA para Rhino, TAS (Thermal Analysis Software), Therm, Green Building Studio, entre otros (Eley 2016; Attia 2012).

Tabla 5
Principales softwares de simulación energética

Programa	Simulaciones		Cálculos			Motores de cálculo	Código abierto		Otros
	EEP	EEA	ER	ACS	LCC		Si	No	
DesignBuilder	✓	✓	✓	✓	✓	<i>e</i> ⁺		✓	Más utilizado por firmas de diseño y académicos, integra la interfaz grafica
HEED	✓	✓	✓	✓		<i>e</i> ⁺ , TRSYS, esp-R	✓		Pensada para casas de California, EEUU.
eQuest	✓	✓	✓	✓		DOE-2	✓		Calificado para el cálculo de las Deducciones Fiscales de Edificios Comerciales en EEUU, interfaz gráfica limitada
ENERGY-10	✓	✓	✓	✓		<i>e</i> ⁺	✓		
OpenStudio	✓	✓	✓	✓	✓	<i>e</i> ⁺ , Radiance, OpenFOAM	✓		Preferencia por edificios comerciales
BEopt	✓	✓			✓	<i>e</i> ⁺	✓		
ResStock	✓	✓	✓	✓			✓		
RETScreen	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
IES VE-Ware	✓	✓	✓	✓	✓	Motor propio e incorporado en el programa		✓	Plataforma web con diversas opciones
SgSave	✓	✓	✓	✓		<i>e</i> ⁺	✓		Simula edificios residenciales y es pensado para España

Simbología: EEP (Eficiencia energética pasiva), EEA (Eficiencia energética activa), ER (energías renovables), ACS (Agua Caliente Sanitaria), LCC (Análisis de costos de ciclo de vida). Código abierto se refiere a, si el software es de acceso libre o requiere licencias (gratis o pagado), algunos permiten un uso de prueba de 3 meses como IES VE-Ware.
Nota: La palabra pensado (a) se refiere a que calcula la estimación del rendimiento energético en función de Códigos energéticos y de la forma de construir de un determinado lugar, ciudad o país.

Elaboración propia

En la Tabla 5, se describen algunos softwares sus funciones más relevantes enfocadas en el presente tema de investigación. También existen programas para estimar la EEA de equipos y redes de energía, por ejemplo, para la estimación de la eficiencia

energética de equipos destaca el programa Motor Master+ Tool. Cuando las condiciones del lugar son propicias para aprovechar varias fuentes de energía renovable, tal como, biomasa, eólica, solar térmica y fotovoltaica juntas; se puede usar un programa adicional que estime el aporte de las micro-redes o redes de energía juntas como HOMER Energy Microgrid Energy Modeling (Eley 2016; Attia 2012), entre otras.

El uso de los mismos depende de la experticia del equipo diseñador y la tecnología a usarse en la edificación.

3.1. Estándar Passive House como base del concepto de casa pasiva

La base sobre la que se asienta el diseño arquitectónico de un ZEB o edificio de energía cero, es el concepto de casa pasiva, que son medidas de eficiencia energética pasiva, llamada también arquitectura pasiva.

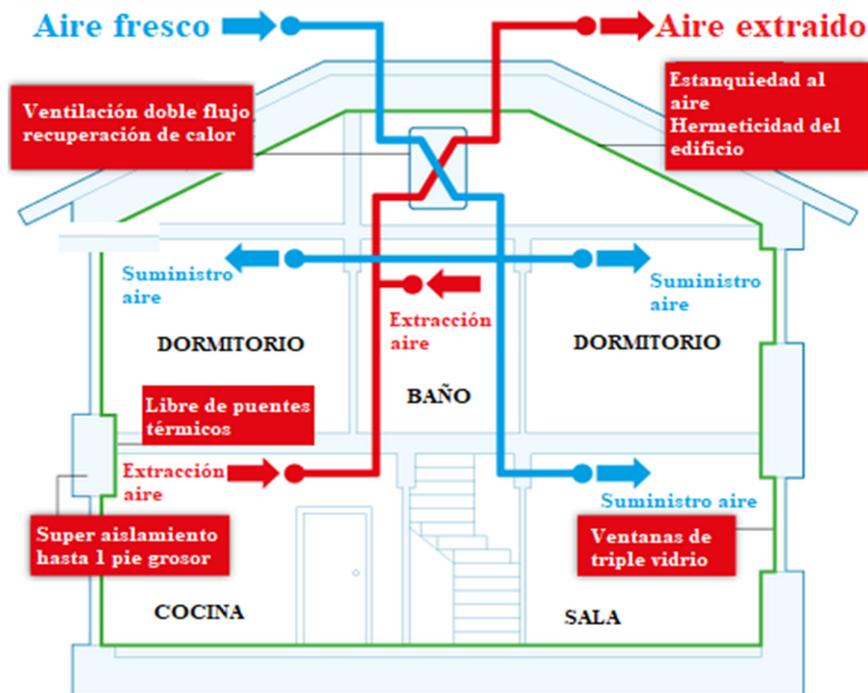


Figura 7: Cinco principios del estándar energético alemán “Passive House”

Fuente: (Feist, Pfluger, y Hasper 2020; Stahl, Voss, y Goetzberger 1994; Gómez Melgar 2017)

Imagen base: Thermal Insulation of a Passive House - Eco Passive Houses

Traducción y edición propias

Existen numerosas derivaciones cada una con su particularidad definida que también hacen uso de la arquitectura pasiva, entre ellas se cita: arquitectura bioclimática, arquitectura sostenible, arquitectura ecológica, eco-arquitectura, arquitectura de reciclaje,

passive house, entre otras, cada una con algunos parámetros diferentes por cuestiones ideológicas o de concepción. Particularmente el desarrollo de NZEB se registra desde la inserción de los sistemas activos y energías renovables al estándar passive house (Musall et al. 2010; Ionescu et al. 2015), estándar que se perfila a ser un prototipo aplicable a nivel internacional, al tener apego con múltiples directrices de los 17ODS y del cual se deriva el concepto de casa pasiva o eficiencia energética pasiva, siendo importante analizar el estándar que contiene los principios de casa pasiva.

Las casas pasivas están diseñadas de manera que, en principio, no necesiten sistemas de calefacción convencionales (Blok y Nieuwlaar 2021, 43), están basadas en cinco principios como: Aislamiento térmico, eliminación de puentes térmicos, estanqueidad del aire, ventanas de alta prestación térmica y ventilación de doble flujo con recuperador de calor (Figura 7). Los requisitos energéticos en viviendas son: La demanda anual de calefacción y refrigeración no debe ser superior a 15 kWh/m² para calefacción o tener una carga máxima de 10 W/m² (Gómez Melgar 2017). Además, el consumo total de energía primaria para calefacción, agua caliente y electricidad no debe ser más de 120 kWh/m² por año de la superficie tratada (se desprecian áreas no habitables y/o sin tratamiento de eficiencia energética pasiva, por ejemplo, sótanos o parqueaderos cubiertos) (Gómez Melgar 2017; Blok y Nieuwlaar 2021).

Los requisitos energéticos están en función de las condiciones climáticas de Alemania, al mismo tiempo, la fuga de aire del edificio no debe ser más de 0,6 veces el volumen de la casa por hora (2017; 2021), esto se logra mediante el uso de súper aislamiento de paredes y techos, tecnología avanzada de ventanas, hermeticidad, ganancia de energía solar pasiva y sistemas mecánicos de ventilación con recuperación de calor; los requisitos de calor residual se pueden cumplir, por ejemplo, utilizando una pequeña bomba de calor que extrae calor adicional del aire de ventilación de escape (Blok y Nieuwlaar 2021).

El eje del diseño de la casa pasiva es el tratamiento que se le da a la envolvente y fenestración²⁷ *para evitar pérdidas de calor*, sumado a los sistemas de servicios, *que reducen posibles pérdidas de calor por ventilación y fuentes internas*. En cuanto a los requerimientos energéticos, estos se dan en función de las necesidades dadas por la geografía, el clima del lugar y factores políticos. El Anexo 8 contiene una síntesis de los

²⁷ Huecos sobre la envolvente como ventanas, puertas, claraboyas, tragaluces tubulares, entre otros.

principios del estándar passive house en función de la forma de medida y las características que deben tener cada requerimiento.

La importante cuestión de la protección térmica de los edificios

La protección térmica de los edificios se refiere a la implementación de medidas para reducir las pérdidas de calor desde el interior del edificio hacia el exterior o viceversa. Por ello, en protección térmica, el calor es importante y se define como “la forma de energía (no mecánica, no eléctrica) que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y sus alrededores) debido a una diferencia de temperatura” (Çengel y Boles 2008, 60; Martínez 1992). Las pérdidas de calor en los edificios se dan por: 1. Transmisión de calor de la envolvente del edificio (paredes exteriores, techos, ventanas, pisos, sótanos) con el exterior y; 2. Ventilación (Blok y Nieuwlaar 2021, 44; Schild y Willems M 2011, 211-2). Además, es importante considerar las pérdidas de calor por fuentes internas.

La transmisión de calor es el flujo de energía térmica y siempre está relacionada con una diferencia de temperatura. En este sentido, el análisis del calor se ocupa en determinar cómo fluye el calor (termodinámica de la evolución) y no tanto por cuánto se transfiere ese calor (termodinámica del equilibrio) (Martínez 1992).

La transmisión de calor en los edificios se realiza a través de tres principales vías: conducción, convección y radiación (Blok y Nieuwlaar 2021). En la conducción, el calor se transmite a través de contacto directo entre las partículas de diferentes materiales, sin transporte (2021). El aislamiento térmico en paredes, techos y suelos del edificio ayuda a evitar la transferencia de calor a través de conducción (Schild y Willems M 2011). Ejemplos de materiales de aislamiento térmico son la lana de roca, espuma de poliuretano, lana de vidrio, entre otros (van den Dobelsteen et al. 2019).

En la convección, el calor se transporta a través de fluidos en movimiento por medio de materiales, fluidos, evaporación o condensación (Blok y Nieuwlaar 2021), por ejemplo, el aire. El aislamiento en las ventanas y puertas, así como el sellado de las aberturas, ayuda a evitar la transmisión de calor por convección (Schild & Willems M, 2011; van den Dobelsteen et al., 2019).

En la radiación, el calor pasa de un sistema a otro a través de ondas electromagnéticas (Blok y Nieuwlaar 2021). El aislamiento en las ventanas ayuda a bloquear la radiación solar y reducir la entrada de calor (Schild y Willems M 2011).

Además, los revestimientos y pinturas reflexivas en el techo del edificio pueden ayudar a reducir la transmisión de calor por radiación, así como estimar criterios relacionados a la temperatura del color (van den Dobelsteen et al. 2019; Cohen 1943).

En cuanto a las pérdidas de calor por ventilación en los edificios, estas suceden por el intercambio de aire caliente con el aire exterior a través de las aberturas de ventilación y/o huecos de fachadas y cubierta, como ventanas, puertas y tragaluces, que no están selladas adecuadamente (van den Dobelsteen et al. 2019) o la presencia de fisuras y/o grietas en la envolvente (Schild y Willems M 2011). Algunas soluciones técnicas son la ventilación mecánica controlada (VMC),²⁸ el sellado de fugas de aire con materiales sellantes en las ventanas,²⁹ puertas,³⁰ pisos y losas; y paredes de la envolvente o el uso de ventanas de doble acristalamiento con baja emisividad. A nivel constructivo, las recomendaciones están en mantener las fenestraciones libres de deformaciones (2011), para mantener las puertas y ventanas bien ajustadas y enmarcadas, que permitan un cierre hermético. Además, las pérdidas de calor en los edificios también se producen por fuentes internas como electrodomésticos, iluminación y sistemas de climatización.

Envolvente

En protección térmica de los edificios, la envolvente es lo más importante, por tanto, es necesario conocer los términos relacionados a ella. La envolvente del edificio es el conjunto de elementos constructivos como paredes, pisos y cubierta que separan el interior del exterior (ES MITMA 2022; Eley 2016). Se dividen en dos categorías: la envolvente gris, que incluye aquellos elementos que no contribuyen al aislamiento térmico del edificio, como la estructura, elementos mecánicos y sistemas de ventilación; y la envolvente térmica, que incluye aquellos elementos que contribuyen al aislamiento térmico como aislamientos de muros exteriores y ventanas de doble acristalamiento. Además, en las paredes y cubiertas exteriores se integran elementos como tragaluces, ventanas y puertas (2016). El rendimiento del aislamiento térmico de la envolvente del

²⁸ La ventilación se produce de manera asistida, se activa cuando los sensores indican que el aire interior viciado debe ser renovado.

²⁹ Mediante la aplicación de materiales sellantes, como cinta adhesiva, espuma de poliuretano o masilla acrílica, sobre las juntas entre la ventana y el marco de la ventana; y, también entre el marco de la ventana y la pared en la que está instalada.

³⁰ Mediante la aplicación de materiales sellantes de alta calidad alrededor de la puerta y en cualquier otra área de fuga para crear un sello hermético, o instalar puertas con juntas perimetrales integradas o con un sistema de sellado incorporado.

edificio está directamente relacionado a las propiedades físicas de los materiales empleados; un material con mayor densidad aparente exhibe una conductividad térmica inferior; por consiguiente, a mayor resistencia térmica menor pérdida de calor (van den Dobelsteen et al. 2019), lo que se traduce en una capacidad de aislamiento térmico superior, optimizando así la eficiencia energética del edificio. (Schild y Willems M 2011, 12).

Puentes Térmicos

La eficiencia energética pasiva de la envolvente exige evitar los puentes térmicos, que son regiones donde el flujo de calor experimenta variaciones debido a: 1. la incorporación total o parcial de un material constructivo con diferente conductividad térmica; 2. un cambio en el espesor de los componentes; 3. diferencia de tamaños de las superficies internas y externas y; 4. una combinación de las mencionadas influencias (Schild y Willems M 2011, 145). El uso apropiado de materiales de revestimiento aislante y buenas prácticas constructivas, que aseguren la continuidad, tanto de los materiales, de los elementos y las uniones entre elementos, reduce la formación de puentes térmicos.

Estanqueidad del aire y ventilación

La envolvente del edificio debe garantizar la estanquidad del aire, es decir, una a hermeticidad que impida las infiltraciones incontroladas de aire que comprometerían la eficiencia energética. La hermeticidad se comprueba a través de la permeabilidad del aire, mediante el índice de traspaso de aire por hora por m² de área de envolvente a un diferencial de presión de referencia. En adición, la tasa de ventilación es el número de veces que el volumen total de aire del edificio se intercambia con el medio ambiente por hora (2011). Para edificios residenciales y edificios de oficinas regulares, una tasa de ventilación de aproximadamente una vez por hora es generalmente suficiente para mantener el aire interior fresco y saludable (Blok y Nieuwlaar 2021, 48).

Control de humedad

Las casas pasivas emplean barreras de vapor y barrera de humedad de contacto. Las barreras de vapor, que se instalan en la cara más cálida de paredes interiores y la parte

interna de la envolvente del edificio, previenen la condensación, humedad y formación de moho mediante un adecuado traslape y evitando perforaciones; las barreras de humedad de contacto, ubicadas en la cara externa de la envolvente impiden la infiltración de agua desde el exterior (Schild y Willems M 2011). Con frecuencia se usan láminas plásticas, films, metálicas, membranas bituminosas, entre otros. Es recomendable que las barreras de vapor tengan una resistencia al vapor de al menos $50 \text{ ng}/(\text{Pas}\cdot\text{m}^2)$ y una resistencia al agua de al menos 300 mbar, mientras que las barreras de humedad de contacto requieran una resistencia al vapor de al menos $100 \text{ ng}/(\text{Pas}\cdot\text{m}^2)$ y una resistencia al agua de al menos 1000 mbar (Passive House Institute 2022). Las especificaciones técnicas pueden variar según el proveedor y deben ser solicitadas al fabricante (Schild y Willems M 2011).

Confort térmico y calidad del aire

El confort térmico es una consideración clave en el diseño de la envolvente, es una manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción con el ambiente térmico existente (2011) y está determinada por la vestimenta de la persona, su nivel de actividad (tasa metabólica), la temperatura del aire, la humedad relativa, el movimiento del aire y la temperatura de las superficies que encierra la habitación (2011). En este sentido, los sistemas de ventilación juegan un papel importante, especialmente en climas fríos donde mantener una ventilación natural puede generar pérdidas energéticas. Así, sistemas de ventilación de doble flujo con intercambio de calor son primordiales. Además, la calidad del aire se evalúa desde una composición del aire fisiológicamente deseable (alto contenido de oxígeno, menor contenido de CO_2 y otros contaminantes) como por fenómenos de corrientes de aire en relación con el confort térmico. Un equilibrio adecuado de la humedad del aire es esencial para evitar incomodidad, insalubridad y daño estructural (Blok y Nieuwlaar 2021).

Compacidad

La compacidad es esencial para lograr una eficiencia energética pasiva efectiva, por tanto, prescindible para un NZEB. Matemáticamente la compacidad (C) se expresa mediante la relación entre el volumen encerrado por la envolvente térmica (V) y la superficie de intercambio térmico con el aire exterior o terreno de la envolvente (A), ver

Ec5 y Ec6 (Formación Efinovatic 2019). En climas fríos, los edificios compactos tienen una menor demanda de energía (Anexo 9) (Schild y Willems M 2011, 179); en climas cálidos, los edificios medianamente compactos se benefician de una mayor iluminación y ventilación natural (Requena Ruiz 2011; Harkouss 2018; Bostancioğlu 2010); no considerar la compacidad idónea representa costos adicionales de construcción y mayor demanda de energía, restando eficiencia energética al edificio (Schild y Willems M 2011, 179).

$$C=V/A \text{ [m}^3/\text{m}^2 \text{]} \quad \text{Ec5}$$

$$A = \Sigma A \text{ [m}^2 \text{]} \quad \text{Ec6}$$

La Influencia de la geometría arquitectónica

Es importante vincular la geometría y el clima local en el diseño arquitectónico. Un estudio analizó la correlación entre la geometría, orientación, costos de consumo de energía para calefacción y costos de construcción; concluyó que la orientación produce aumentos insignificantes en el costo por consumo de energía en comparación con el cambio de la geometría, recomendando como más apropiado el empleo de geometrías compactas como el cuadrado y rectángulo (Figura 8) (Bostancioğlu 2010).

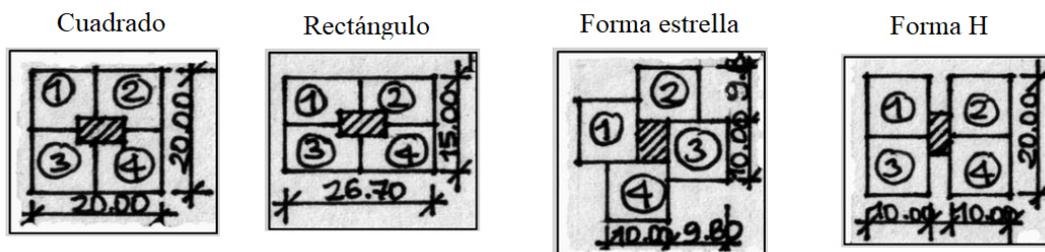


Figura 8: Alternativas vistas en planta de la geometría de edificio
Fuente: (Bostancioğlu 2011)

Por otra parte, dentro del entorno construido, las estrategias pasivas más utilizadas incluyen aislamiento térmico avanzado, alta masa térmica, iluminación natural avanzada, ganancia de calor solar avanzada, protección solar, técnicas de enfriamiento y ventilación pasiva (Musall et al. 2010).

3.2. Otras consideraciones pasivas

Para el estándar passive house la envolvente ideal no solo confina y aprovecha las ganancias de energía y evita las pérdidas de calor en el espacio interior hacia el exterior, sino que además se sella herméticamente. En tanto, Eley (2016) compara a la envolvente como una flor que se abre de día y se abotona de noche. “La envolvente [...] modula el flujo de calor, aire y luz hacia y desde el edificio”, es decir, se abre a la luz y absorbe aire en condiciones climáticas favorables y, forma una barrera contra flujos de viento y/o exceso de luz solar (2016), en función de los requerimientos. Ambos son puntos de vista válidos, siempre y cuando se apliquen con criterios de orden holístico, que incluya tanto aspectos sanitarios,³¹ técnicos y ambientales, así como culturales y socioeconómicos del grupo humano que habite los espacios.

En el diseño, la contribución del sol está determinada principalmente por la posición de la casa, el sombreado, el tamaño de las ventanas y el plano del piso (van den Dobelsteen et al. 2019; Eley 2016). En este punto, es necesario analizar la orientación tanto a nivel urbano como arquitectónico.

Orientación Urbana

La mejor disposición del reticulado urbano es aquella que permita aprovechar y/o limitar el paso de los rayos solares desde las vías hacia las fachadas de los edificios durante el día, conforme al clima del lugar. Para lugares con clima frío o templado, la malla urbana con calles principales en sentido este-oeste o una inclinación de 20 grados con respecto al sur (Figura 9a y Figura 9d) (van den Dobelsteen et al. 2019) son ideales, porque aprovechan la energía solar anual que llega a la superficie durante el día y que ingresará fácilmente a las viviendas.

Considerar un amanzanamiento de forma más alargada de oeste a este y más corta de norte a sur (Figura 9b), dará un mayor aprovechamiento de la energía solar pasiva disponible para los edificios, el ancho de vías y retiros urbanos que se plantean en correlación con la altura de las edificaciones, la declinación solar y el clima del lugar disminuye las pérdidas de energía solar por sombreado (Figura 9b y Figura 9d). Para zonas de clima cálido el reticulado urbano y el amanzanamiento que aproveche las

³¹ Si la calidad del aire exterior no es óptima, posiblemente el estándar passive house resulte conveniente.

oportunidades de sombra adyacente del entorno natural o entre edificios, limitando el calor latente de la geografía, maximizara el rendimiento energético en los edificios y limita a nivel urbano el efecto de isla de calor (Shareef y Altan 2022).

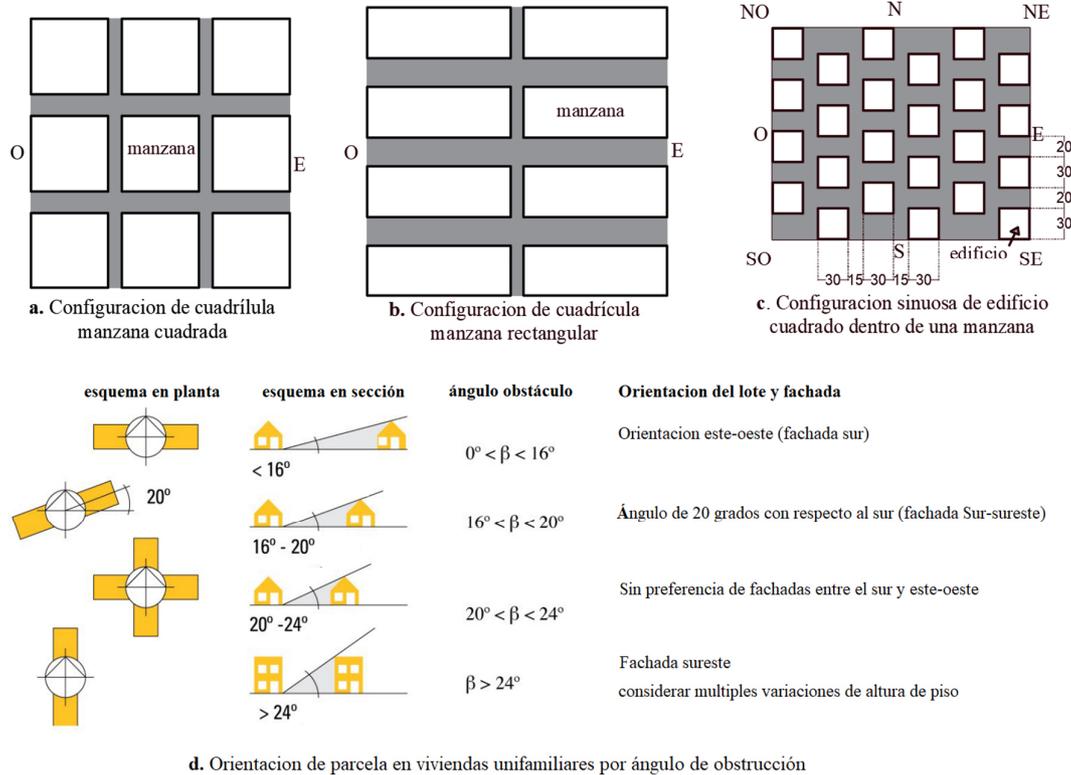


Figura 9: Algunas orientaciones y disposiciones de manzanas y edificios

Fuente: (van den Dobelsteen et al., 2019; Shareef y Altan 2022; Bobadilla et al. 2012)

Elaboración y traducción propia

La ubicación del edificio dentro de la manzana también es importante para el microclima del medio externo. Shareef y Altan (2022, 5, 9) simularon configuraciones dentro de una manzana, disposiciones de 24 edificios cuadrados de dimensiones de 30x30m con una altura 24m dispuestos en hileras de 6x4, en disposiciones de configuración tipo cuadrícula (una alternativa) y sinuosa (tres alternativas) para las cuatro orientaciones (norte-sur, este-oeste, noreste-suroeste, y noroeste-sueste) (Figura 9c), y distintos factores de vista del cielo (SVF) (mayores y menores).

Sus resultados encontraron una reducción significativa en la temperatura de la superficie terrestre (LST) creado por la sombra entre edificios (aspecto formal de configuración sinuosa) en combinación con un SVF bajo, siendo mejor las orientaciones este-oeste y Noreste-Suroeste, que tienen mayor exposición al sol y se benefician del sombreado entre edificios que bloquea la mayor parte de la radiación. El viento no fue

determinante en la temperatura, pero si en la humedad, concluyendo que la configuración de cuadrícula que forma calles rectas (Figura 9a) es mejor para zonas cálidas de alta humedad, porque no concentra la humedad ni bloquea el viento y permiten la aceleración del mismo, mientras que la configuración sinuosa es mejor para zonas cálidas y áridas (2022, 17).

Kim et al. (2022) analizó el efecto del SVF sobre LST en áreas residenciales urbanas desde un cielo muy abierto a hasta muy cerrado y, concluyó que un SVF entre 0.2 y 1.0 se correlaciona con un mayor nivel de LST en el área residencial, mientras que un SVF por debajo de 0.2 se correlaciona con LST más bajo en el área residencial. Para Shareef y Altan (2022, 2) la compacidad de la malla urbana se puede lograr utilizando una serie de variables de geometría urbana, como aumentar el área construida o la relación Altura / Ancho (H / W) y reducir SVF.

El problema de la orientación de los edificios

Pasando a la orientación arquitectónica. Se ha difundido ampliamente que la mejor fachada de un edificio para captar la energía solar pasiva es la sur, porque la mayor cantidad de investigaciones han surgido en el norte del planeta (Gómez Melgar 2017, 54), y el sol en esas latitudes llega predominantemente iluminando las fachadas sur de los edificios.



Figura 10: Protección horizontal en fachadas y ventanas

Fuente: archiexpo.es

En latitudes intermedias como los trópicos y subtropicos donde se tiene una mayor concentración de energía solar, las fachadas ideales son la norte y la sur, en proporción al tiempo que cada fachada recibe la energía directa del sol y a factores climáticos propios

del lugar. En las fachadas norte y sur, proteger las ventanas del sol con persianas interiores o contraventanas exteriores horizontales o volados maximiza el aprovechamiento de las fuentes de luz y calor, reduciendo efectos de sobrecalentamiento, insolación, deslumbramiento y pérdidas de energía (Figura 10). Los microclimas creados a partir de atrios, toldos o invernaderos funcionan mejor si se ubican en las zonas de antesala al área más caliente o más fría, según sea el requerimiento.

Las ventanas en las fachadas este y oeste generan en mayor o menor proporción sobrecalentamientos, insolación, deslumbramiento y pérdidas de energía, siendo ideal que la geometría de la ventana sea más alta que ancha (alargada en sentido vertical) o introduzca más retranqueos en sentido vertical y/o utilizar persianas verticales para aprovechar el calor y la iluminación natural lateral de la luz del día (Figura 11) (Formación Efinovatic 2019). Propiciar microclimas agradables: por ejemplo: aprovechar la fachada oeste (radiación solar durante la tarde) con elementos de alta masa térmica que ayuden a calentar el edificio en las noches frías; o hacia el este (radiación solar durante la mañana) que atrape y limite el calor al exterior del edificio, limitar molestias del viento y radiación mediante sombras verde (como árboles y techos de vegetación) para limitar el efecto “isla de calor” en verano o climas cálidos (van den Dobelsteen et al. 2019).



Figura 11: Protección vertical en fachadas y ventanas, volado en ventana horizontal vertical
Fuente: archiexpo.es, U.S. Department of Energy

En lugares con cargas de radiación y vientos mayor se puede estimar el uso de toldos en lugar de persianas o contrafachadas, en una construcción enmarcada (vidrio y marco juntos) es necesario considerar los puntos de fijación para toldos, por ejemplo, es posible que sea necesario reforzar un elemento de fachada para colocar un toldo que se expanda. También es importante considerar el acristalamiento solar si, por ejemplo, el sitio es demasiado vulnerable para las persianas solares o si la carga del viento es

demasiado alta, puesto que las rejillas de ventilación de integración en las persianas, varían entre fabricantes suministran productos confeccionados.

En climas cálidos evitar las ganancias de calor, mientras se aprovecha las ganancias de iluminación son clave, por ello opciones adicionales que minimicen la transmisión del calor solar, como colores más claros en los marcos de ventanas, retranqueos y superficie exterior de la envolvente contribuyen al fin (van den Dobelsteen et al. 2019; Bobadilla et al. 2012).

Algunas consideraciones sanitarias

La calidad del aire que respiramos es esencial para la vida, salud y productividad humana. Al 2016 el 90 % de la población mundial respiraba aire contaminado (Cozzi et al. 2021, 21, 55), que sumado con la contaminación del ambiente interior y la contaminación por partículas atmosféricas son factores asociados a la morbilidad y mortalidad. (Lim et al. 2012, 21–22). Un estudio demostró el potencial bactericida de la luz solar ordinaria filtrada a través de las ventanas al reducir patógenos del polvo doméstico, (Fahimipour et al. 2018). Otro estudio demostró la incidencia positiva de los sistemas de aire renovados y el confort térmico que tienen sobre la productividad, de los 154 edificios estudiados solo hubo 2,88 días menos de baja por enfermedad en los empleados, con lo cual las empresas ahorran 54 €/m² al año con un valor neto de 215 €/m² (Miller et al. 2009). En este párrafo es menester acotar que, el confort térmico, la renovación de aire y la hermeticidad son fundamentales en un edificio sano; juntos brindan bienestar, salud, comodidad en el ambiente interior y evitan molestias que perturben física o mentalmente a sus ocupantes (Fahimipour et al. 2018; Lim et al. 2012; Miller et al. 2009).

3.3. Eficiencia Energética Activa

Los sistemas de eficiencia energética activan más usados en los NZEB son: ventilación mecánica, recuperación de calor, calentamiento de agua sanitaria solar térmica, sistema híbrido de calefacción de espacios y agua caliente sanitaria solar térmica, intercambiador de calor de tubo de tierra, electrodomésticos eficientes, climatización eficiente, iluminación LED, entre otras (Musall et al. 2010).

3.4. Tecnología Smart y de Generación de Energía Renovable

Los sistemas inteligentes, también conocidos como tecnologías de automatización de edificios, pueden ayudar al edificio a tener un mayor desempeño energético, reduciendo el consumo de energía por el uso intensivo de energía, permiten a los usuarios monitorizar y controlar el consumo de energía en tiempo real (Pérez-Lombard, Ortiz, y Velázquez 2013, 251). Esto puede ayudar a identificar y solucionar problemas de consumo de energía, así como a tomar decisiones informadas sobre cómo reducir el consumo de energía. Por ejemplo, el uso de sensores y dispositivos IoT (Internet de las cosas) pueden permitir el control de la iluminación y el aire acondicionado en tiempo real (van den Dobelsteen et al. 2019)

Un NZEB solventa sus necesidades restantes de energía mediante la dotación de energías renovables. Dentro de la Tecnologías de generación de energía renovable más usual en los NZEB se encuentran: fotovoltaica sobre cubierta y cubierta, fotovoltaica fuera de sitio, sistemas de agua caliente sanitaria solar térmica, calefacción solar térmica, energía eólica dentro y fuera de sitio, calderas de biomasa, sistema combinado de calor y energía (CHP) fósil /biomasa y bomba de calor (Musall et al. 2010).

En el diseño arquitectónico se considera los requisitos espaciales para colectores solares y paneles fotovoltaicos (PV), así como el posicionamiento óptimo y el ángulo de inclinación es fundamental en un edificio eficientemente energético, evitando la sombra por edificios, tejados, buhardillas, conductos de humos y vegetación circundantes, ya que los sistemas fotovoltaicos son muy sensibles a esto. (van den Dobelsteen et al. 2019).

Tabla 6
Ángulos de inclinación para sistemas solares fotovoltaicos (PV)

Latitudes	ángulos óptimos informados
90°–71° N	De 45° a 41°
70°–40° N	De 40° a 29°
30°–2,6° N	De 28° a 5°
0°	De 2,5° a 2,5°
2,6°–30° S	De – 4° a – 32°
30°–46° S	De – 33° a – 36°
47°–65° S	– 34° a – 50°
66°–90° S	– 51° a – 62°

Fuente: (Yunus Khan et al. 2019)
Elaboración propia

El rendimiento de los sistemas de energía solar está sujeto también a variables propias del clima de cada lugar, como pluviosidad y sombras de nubes. La Tabla 6

muestra ángulos de inclinación referenciales con respecto a la latitud como ideales para un mejor desempeño energético de los paneles fotovoltaicos por orientación en la cubierta (Yunus Khan et al. 2019).

En resumen, un NZEB es un edificio de alto rendimiento energético con producción propia de ER, conectado a la REU, cuya fortaleza radica en aprovechar las oportunidades físicas del lugar a implantarse, tanto para lograr la máxima EEP y EEA en la arquitectura del edificio, como explotar las fuentes de ER más idóneas para suplir las necesidades restantes de energía y exportar excedentes de energía a la REU.

4. Estrategias Pasivas y Activas en el caso específico de la ciudad de Quito

El Ecuador cuenta con seis zonas climáticas macro, numeradas del 1 al 6 que va desde las zonas más calurosas hasta las zonas más frías, respectivamente (Tabla 7). Quito con un clima continental lluvioso, está dentro de la clasificación climática ecuatoriana número “3”, correspondiente a “3C” en la zona climática ASHRAE 90.1, categorización usual en softwares de simulaciones energéticas.

El ex Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), realizó un estudio denominado Estrategias para mejorar las condiciones de habitabilidad y consumo de energía en vivienda (Palme et al. 2017). El estudio presenta las estrategias basado en el análisis de la carta psicrométrica de Givoni (Anexo 10), y algunas normas y software internacionales agrupando las estrategias en: calefacción solar masiva (CSP) cuatro estrategias, inercia térmica (IT) seis estrategias, Minimizar pérdidas de calor (MPC) once estrategias, minimizar ganancias de calor (MGC) seis estrategias, Equipos (E) siete estrategias, Ventilación natural (VN) siete estrategias (2017).

Tabla 7
Zonas climáticas en el Ecuador y su equivalente ASHRAE 90.1

ZONA CLIMÁTICA (Ecuador)	ZONA CLIMÁTICA (ASHRAE 90.1)	NOMBRE	CRITERIO TÉRMICO
1	1A	HÚMEDA MUY CALUROSA	5000 < CDD10°C
2	2A	HÚMEDA CALUROSA	3500 < CDD10°C ≤ 5000
3	3C	CONTINENTAL LLUVIOSA	CDD10°C ≤ 2500 y HDD18°C ≤ 2000
4	4C	CONTINENTAL TEMPLADO	2000 < HDD18°C ≤ 3000
5	5C	FRÍA	CDD10°C ≤ 2500 y HDD18°C ≤ 2000 2000 < HDD18°C ≤ 3000 3000 m < Altura (m) ≤ 5000 m
6	6B	MUY FRÍA	CDD10°C ≤ 2500 y HDD18°C ≤ 2000 2000 < HDD18°C ≤ 3000 5000 m < Altura (m)

Fuente: (Palme, Lobato, Gallardo, Beltran, et al. 2017; MIDUVI 2018)

Para la zona climática de Quito “zona climática 3” equivalente en la categorización climática de ASHRAE “C3”, las recomendaciones son: inercia térmica: (IT3, IT4a, IT6), ventilación natural (VN1, VN2, VN3, VN4), minimización de ganancias de calor (MGC1, MGC2, MGC3, MGC4, MGC5, MGC6) y equipos (E1, E2, E3, E4, E5) (2017).

La estrategia de inercia térmica se relaciona con la capacidad del material de guardar calor. Este sistema es útil en zonas templadas o con oscilaciones bruscas diurnas de temperatura. Los mejores materiales para este propósito son los que poseen un alto calor específico como el hormigón, adobe, piedra y agua. Para Quito un método puede ser, usar materiales de alta densidad en la envolvente para almacenar el calor del sol en el día y soltarlo durante la noche (IT3) o bien utilizar materiales de alta inercia en la cubierta; en este caso se puede utilizar agua dentro de un contenedor con compuertas que estén cerradas durante el día y abiertas en la noche (IT4a), o aprovechar la inercia térmica del suelo para climatizar el ambiente interior, con sistemas conocidos como “tubo canadiense” o “tubo provenzal” tanto para calentar o enfriar el aire interior (IT6) (2017).

Las estrategias de ventilación natural se refieren al uso del aire exterior para climatizar ambientes al interior, mediante un mecanismo manual activado por el usuario, provee muy buenos resultados con respecto a los diagramas de Givoni, especialmente sobre la humedad relativa. Este es el único método pasivo que permite acceder a humedades de entre 70 y 90 %. Existen varios métodos que se pueden emplear, como usar ventanas grandes y móviles que maximicen el flujo de aire (VN1), usar una relación de tamaño casi igual entre ventanas móviles de ingreso y salida del aire, ubicados en el mismo sentido uno enfrente de otra para permitir un flujo uniforme de aire (VN2), este es también llamada ventilación cruzada. Emplazar a la vivienda con su lado largo perpendicular a la corriente de aire (VN3) para maximizar el flujo de aire cruzado. Igualmente, en el caso de tener ventanas fijas se recomienda colocar la fachada de esa ventana perpendicular al viento (VN4) (2017).

Otra estrategia recomendada es minimizar las ganancias de calor, se refiere a la transferencia de calor entre el interior y exterior por medio de los fenómenos de convección, conducción y radiación. Entre las recomendaciones tenemos, evitar ventanas o generar sombra en las fachadas este y oeste (MGC1); proteger las ventanas de los rayos solares usando voladizos, parasoles, toldos, etc. (MGC2); utilizar ventanas especiales de alto rendimiento, por ejemplo, crear una cámara de aire para un efecto aislante entre dos

vidrios (MGC3); usar materiales con un alto índice de reflectancia solar (SRI) para reducir la cantidad de calor absorbido en días cálidos (MGC4); utilizar barreras radiantes en la cubierta, lo cual puede también ayudar a reducir la radiación solar (MGC5); y emplear cubiertas y fachadas vegetales, esto protegerá a la vivienda de la radiación, además de dar aislación al retener aire en su interior (MGC6) (2017).

Las estrategias en cuanto equipos, se refiere a los sistemas de climatización de ambiente y agua, así como los electrodomésticos con alta eficiencia energética. Se pueden utilizar equipos que aprovechen la energía solar para calentar agua a partir de paneles solares o tubos al vacío (E1). Los electrodomésticos deben ser eficientes (Energy Star o superiores), en especial los refrigeradores, ya que son los que más electricidad consumen (E2). Al igual que los electrodomésticos, la iluminación también debe ser diseñada y escogida apropiadamente, estudiando los últimos modelos más eficientes del mercado (E3). En lugares de muy bajas temperaturas es necesaria la calefacción mecánica para alcanzar un confort aceptable, estos electrodomésticos deben ser eficientes energéticamente, y asimismo favorables económicamente a largo plazo (E4). Además, se puede minimizar el uso de iluminación artificial mediante iluminación solar a través de la cubierta, ya sean mediante claraboyas (ventanas pequeñas sobre cubierta) o tubos solares (conducto de tubo metálico que transporta luz solar hacia el interior desde una entrante que sobresale en la cubierta) parte de la superficie del techo iluminar al interior de las viviendas (E5) (2017).

4.1. EUI bajo estimado para Quito

La intensidad del uso de energía comúnmente conocido por sus siglas en inglés como EUI, es una forma común de expresar el uso de energía de un edificio. Se necesita un EUI bajo para lograr NZEB (Eley 2016). Generalmente se expresa en (kWh × año) /m² o kBTU/pe²/año. La expresión matemática de un EUI es:

$$EUI = \frac{\sum EE_a}{A_E} = \frac{E_{Ta}}{A_E} \quad \begin{matrix} [\text{kWh} \times \text{año}] \\ [\text{m}^2] \end{matrix} \quad \text{Ec7}$$

Donde, EE_a es la suma de todas las entradas de energía anuales al edificio, E_{Ta} es el uso de energía total anual producto de toda la sumatoria de EE_a y, A_E es el área total del edificio.

Tabla 8
EUI bajo para lograr un NZEB en Quito

EUI potencial máximo técnico estimado Zona climática ASHRAE 3C		
Tipo de edificios, por su uso	kBtu/pie ² /año	(Kwh·year) /m ²
Bodegas	6	18,93
Oficinas	8	25,24
Locales comerciales	13	41,01
Escuelas	16	50,47
Apartamentos	24	75,71
Oficinas / Centro de Datos	43	135,64
Hoteles	40	126,18
Centros de atención médica	63	198,73
Restaurantes	265	835,91

Fuente: (Eley 2016, 13, 57; Glazer 2012)
 Traducción y elaboración propias

Como resultado de años de investigación, ASHRAE realizó una estimación de la intensidad del uso de energía que debería poder cumplir un NZEB, si utiliza toda la tecnología hasta ahora desarrollada, por tanto, los valores hallados expresan el EUI bajo a alcanzar como máximo admisible en un NZEB. La Tabla 8 extrae solo los datos correspondientes a la categorización climática correspondiente a Quito “3C” en unidades de medidas anglosajón y del sistema internacional, misma que, servirá como medida de evaluación en los prototipos de NZEB a simular en esta investigación. Para espacios residenciales en la Tabla 8 solo consta la categoría apartamentos, este estudio utilizara el valor correspondiente de apartamentos de 24 kBtu/pie²/año o 75.71 (Kwh·year)/m², como referencia.

Conclusiones del capítulo segundo

El ser humano ha utilizado diferentes fuentes de energía a lo largo de la historia, por ejemplo, el alimento, el fuego, la leña, y actualmente la electricidad que ha revolucionado el sistema energético mundial. La energía es el motor del mundo y la base sobre la cual funciona la actual sociedad. Las formas más comunes en la que llega la energía a los edificios son como calor y electricidad. Los Factores que influyen el uso de energía son humanos, físicos y sociales, y su desconocimiento incrementa el consumo de energía y las emisiones de GEI asociadas al consumo de energía. Los factores físicos como el clima, la envolvente, así como los servicios y sistemas de energía del edificio

necesitan ser considerados desde la arquitectura. Los factores humanos y sociales también pueden ser limitados con eficiencia energética pasiva y activa en combinación con el internet de las cosas y la automatización de los edificios. El sol es el máximo proveedor de energía al planeta, diseñar edificios que aprovechen su energía de forma pasiva (concepto de casa pasiva para un alto rendimiento energético) y activa (producción de energías renovables), reduce emisiones asociadas a la energía en las edificaciones y las redes de energía urbana, e incrementa la resiliencia energética en las ciudades.

Por otra parte, un NZEB ha generado en la comunidad académica un pensamiento extenso, alrededor de un NZEB el conocimiento es vasto y variado, muchos autores tratan de definirlo, de clasificarlo, de caracterizarlo, lo cual amplía más la brecha de comprensión, pero a la vez esta ambigüedad sobre el tema también resulta enriquecedora, muchos investigadores centrados en una misma especificidad generan resultados.

En ese sentido, Sartori et al. detallaron los elementos que representan un NZEB, la relación entre esos elementos y medidas de valoración que permitan estimar un NZEB mediante dos vías (equilibrio de generación/demanda y/o importación/exportación) y dos escalas (anual y mensual) a fin de cumplir con el requisito esencial de un NZEB, igual a cero neto la demanda de energía anual con la producción de energía renovable en sitio, mediante un alto rendimiento energético y cuyas necesidades restantes de energía se cubran con su propia producción de energías renovables. La eficiencia energética pasiva y activa, así como el uso de la tecnología de las energías renovables y/o Smart son el eje central de un NZEB.

Por otra parte, el diseño de un NZEB al inicio puede requerir de un conocimiento y experticia mayor del habitual en el diseño arquitectónico, considerar las condiciones climáticas del lugar y cómo llega la energía solar en la disposición geográfica del terreno, analizar si existen microclimas como por ejemplo cuerpos de agua cercanos, o sombras naturales o urbanas como montes, colinas o edificios adyacentes de gran altura alrededor del terreno, determinaran la pautas iniciales por donde iniciar el diseño climático del edificio. Felizmente en la actualidad, existen programas con interfaz gráfica que ayudan al cálculo y estimación en ese proceso, las opciones son múltiples, desde recomendar las mejores estrategias, hasta simular energéticamente el edificio incluida la tecnología de energías renovables, aunque se requiere un conocimiento previo del uso de cada programa, en su mayoría son amigables y se logra entender con facilidad cómo funcionan y que datos requieren.

Para Quito, con “zona climática 3” equivalente en la categorización climática de ASHRAE “C3”. las estrategias de diseño se centran en: aprovechar la calefacción solar masiva, la inercia térmica de los materiales, guardar un equilibrio entre las ganancias y pérdidas de calor, ventilación natural y el uso de equipos altamente eficientes en energía.

La medida estimada e impuesta en esta investigación para determinar la eficiencia energética de un NZEB residencial en Quito es de 24 kBTU/pie²/año, valor que ha sido desarrollado por ASHRAE para un clima 3C si toda la tecnología existente se aplicara. Este valor no representa una meta obligatoria para Quito, son estimaciones. Las exigencias y obligaciones entorno al desempeño energético de los edificios se determinan generalmente en base a edificios de referencia, mismos que en la actualidad no tiene el país, algunos países como Brasil y Argentina, apuntan sus aspiraciones hacia esta meta. Ecuador tenía la misma aspiración, pero aún no ha construido ningún prototipo modelo que permita observar su desempeño en tiempo real.

Capítulo tercero

Metodología y Simulaciones

Esta sección responde el objetivo específico número 4, al realizar un análisis comparativo de rendimiento energético entre prototipos de construcción convencional y construcción NZEB. Para ello, se caracteriza técnicamente a la vivienda de Quito, con el objetivo de tener información referencial para definir prototipos de edificios de construcción convencional, mismos que sirven de base en las simulaciones energéticas de los prototipos convencionales, luego se remodelan los mismos prototipos convencionales, pero con criterios de eficiencia energética pasiva y tecnología NZEB.

1. Metodología

En esta investigación se plantea la hipótesis de que en Quito es posible tener un NZEB. Para determinar si es factible un NEZB, esta investigación se impuso dos verificaciones de cumplimiento, la primera guarda relación con la demanda de energía³² y el EUI,³³ la segunda con la cogeneración de energía renovable en el sitio en relación a la demanda de energía.

Para la verificación de la primera imposición a cumplir, se toma como límite de consumo de energía anual, las estimaciones propuestas por ASHRAE de un EUI bajo para climas “C3” de 24kBTU/pie2/año (Tabla 9), si toda la tecnología existente se aplicara al edificio (Eley 2016, 13, 57; Glazer 2012), categorización climática “C3” similar a la ciudad de Quito. Este valor sería el máximo admisible de consumo de energía que tendrían que cumplir los prototipos NZEB simulados, para ser considerados NZEB en Quito. La segunda imposición metodológica, se basó en la propuesta efectuada por Sartori et al. (2012), quienes presentaron una manera de medición con 3 opciones de verificación de cumplimiento de un NZEB, esta investigación toma la opción que está en relación con la demanda de energía y la cogeneración de energía renovable anual en el sitio (Tabla 9).

Las imposiciones de verificación de cumplimiento cumplen tres propósitos, con la primera imposición se verifica si el NZEB ha reducido o no su consumo de energía por

³² Sumatoria de todas las cargas de energía transformadas a kWh que demanda el prototipo en un tiempo de un año.

³³ Intensidad del uso de la energía.

concepto de eficiencia energética pasiva y activa, mediante la comparación de la demanda del NZEB con el valor del EUI bajo. La segunda imposición cumple dos propósitos, verificar si el edificio cumple o no con el balance neto ZEB mediante la relación producción de energía en el sitio y demandas de energía, el segundo propósito es medir la eficiencia energética (Tabla 9), pero en función al prototipo de referencia (prototipo convencional).

Tabla 9
Metodología para la estimación de un NZEB en Quito

No.	Descripción	Métodos propuestos por:	
		Eley - ASHRAE	Sartori et al.
1	DEA vs. EUI	$\leq 24\text{kBTU}/\text{pie}^2/\text{año}$	
2	NZEB vs. EdR		$\text{NZEB} \leq \text{EdR}$
3	DEA vs. CER		$\text{DEA} \leq \text{CER}$
		Eficiencia energética	Balance neto cero
Simbología			
DEA, demanda de energía anual			
CER, cogeneración de energía renovable anual			
EdR, edificio de referencia			

Elaboración propia

En otras palabras, se tendrán tres análisis valorativos que indiquen si un NZEB es posible o no en Quito, dos de ellos relacionados a la eficiencia energética, es decir, uno en función del edificio de referencia y otra en función del EUI bajo máximo admisible, y el tercero relacionado con el balance neto ZEB. Previo a las simulaciones y aplicación de la metodología propuesta, se requiere recolectar información que ayuden en la toma de decisiones. Como una práctica adicional se medirá el balance de pérdidas/ganancias de calor, misma que es medular para determinar el balance cero de un ZEB.

1.1. Datos de Quito

El clima de Quito pertenece a la zona climática continental lluviosa de Ecuador, categorizado con el numero 3 equivalente a la categorización ASHRAE “C3”. Esta zona está localizada en la región que separa los valles calurosos de los Andes y se caracteriza por grandes precipitaciones. Particularmente, en Quito la temperatura puede oscilar entre 7 y 25 grados Celsius a lo largo de un día en el año, y la humedad relativa está entre 30 y 100 % (Palme et al. 2017, 58). Debido a los amplios cambios de temperatura a lo largo de un día puede ser necesario refrigeración y calefacción (2017, 58). El ex INER

determinó algunas estrategias pasivas y activas para Quito. Estas estrategias se explicaron en el anterior subcapítulo (Palme et al. 2017).

1.2. Caracterización de la vivienda

En este apartado se pretende caracterizar la vivienda³⁴ de Quito, mediante estadística descriptiva, basada en censos y encuestas del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) y datos estadísticos del INEC organizados por el Instituto de la Ciudad para Quito; registros de datos de la vivienda en estudios académicos y de mercado inmobiliario. En Ecuador, entre el periodo 2002-2016 se emitieron 471.011 permisos de construcción (pdc), siendo el 2010 el año con la demanda más alta de permisos con un número de 42.042 pdc (INEC 2016, 13). Durante el 2016, se emitieron 29.785 pdc, creciendo 5,0 % en relación al 2015 y un 35,6 % respecto al 2002, “la mayor concentración según el tipo de obra se encuentra en nuevas construcciones con 26.614 aprobaciones (89,4 %)” (2016, 20).

El promedio nacional de metros cuadrados de construcción por vivienda es de 131 m², la “provincia de Cañar tiene el promedio [...] más alto en el país con 175 m²,” en tanto Pichincha ocupa el cuarto lugar con 168 m², mientras “Manabí tiene el menor valor con 82 m².” (2016, 21). Los materiales predominantes a ser utilizados en la edificación nueva son: hormigón armado para estructura (91,8 %) y cimientos (81,4 %), bloque para paredes (61,6 %) y; en la cubierta, el hormigón armado (46,7 %) y Eternit / Asbestocemento un 27,7 % (2016, 19). “El principal uso de las edificaciones reportado en los permisos de construcción es para residencias de una familia con 18.400 permisos (61,8%). Los usos no residenciales y otros usos corresponden al 7,7% del total de permisos. Las edificaciones mixtas, representan 1.801” pdc (2016, 21), El gobierno ecuatoriano ofrece viviendas de interés social de uno y dos pisos a través del MIDUVI y entidades financieras anexas, cuyas características están determinados en el Acuerdo ministerial No. 0045-19 (EC MIDUVI 2019).

En Quito, las viviendas predominantes son de tipo casa/villa con un 53,64 % seguidas por los departamentos en casa o edificio con un 32,59 % (Tabla 10). En las parroquias: Tumbaco, Calderón y Los Chillos, las casas/villas constituyen 69,77, 71,46 y

³⁴ Para el INEC, vivienda “es un recinto de alojamiento estructuralmente separado y con entrada independiente, construido edificado, transformado o dispuesto para ser habitado por una persona o grupo de personas, siempre que al momento de la investigación no este utilizado con finalidad distinta” (INEC 2005).

77,94 % del total de viviendas de cada administración, siendo los valores más altos de su grupo (Tabla 10). En oposición, las parroquias Eugenio Espejo (50,15%) y Eloy Alfaro (41,22%) las viviendas predominantes son en su mayoría departamentos en casa o edificios (Tabla 10). El sector inmobiliario ofrece viviendas de dos plantas de uno y dos pisos y departamentos en edificios altos con un promedio de altura de 10 pisos (Centro de Investigación CLAVE 2018).

Tabla 10
Tipos de vivienda particular en Quito

Denominación	Administraciones Zonales (%)								Quito (%)
	Calderón	Eloy Alfaro	Eugenio Espejo	La Delicia	Los Chillos	Manuela Sáenz	Quitumbe	Tumbaco	
Casa/Villa	71.46	45.09	40.89	57.73	77.94	41.8	57.51	70.3	53.64
Departamento en casa o edificio	16.08	41.22	48.63	29.13	11.07	36.71	29.29	11	32.59
Cuarto(s) en casa de inquilinato	4.56	11.09	6.51	7.4	3.11	18.79	7.34	8.38	8.51
Mediagua	7.04	2.28	3.33	4.74	6.85	2.14	5.05	9.19	4.52
Rancho	0.08	0.02	0.06	0.26	0.11	0.02	0.04	0.15	0.09
Covacha	0.26	0.07	0.14	0.26	0.38	0.1	0.25	0.38	0.21
Choza	0.04	0.02	0.05	0.06	0.12	0.07	0.04	0.16	0.06
Otra vivienda particular	0.47	0.21	0.39	0.42	0.42	0.37	0.49	0.44	0.38
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fuente: INEC 2010, Instituto de la Ciudad, Quito
Elaboración propia

Celi Sánchez y Pantoja Moyano (2018) en su estudio sobre la vulnerabilidad de las construcciones de Quito ante fuerzas sísmicas, realizaron previo una encuesta, la muestra fue 11556 unidades de viviendas residenciales, mixtas, unifamiliares y multifamiliares; en cuanto al aspecto formal, los resultados indicaron que la predominancia formal de las viviendas de dos pisos era cuadrada y en “L” en planta. Mientras que, en viviendas de uno y tres pisos la predominancia formal era rectangular en planta, y juntas representaban el 62 % del total. Los sistemas constructivos predominantes, fueron: hormigón con losas de entrepiso de hormigón y, mampostería de bloque pómez (2018).

Otro estudio sobre vulnerabilidad estructural en Quito, observó una tendencia en las viviendas, tanto las de uno, como dos pisos aumentaban su área de construcción horizontal y verticalmente, lo cual resultó en una predominancia de altura promedio de tres pisos, en las viviendas estudiadas (Mora, Ordoñez, y Gómez 2021).

Tabla 11
Materiales predominantes y tenencia de las viviendas particulares en Quito

a. Piso (%)							
Duela, parquet, tablón o piso flotante	Tabla sin tratar	Cerámica, baldosa, vinil o mármol	Ladrillo o cemento	Caña	Tierra	Otros materiales	Total
33.88	5.83	34.34	23.67	0.01	1.62	0.66	100.00
b. Paredes Exteriores (%)							
Hormigón	Ladrillo o bloque	Adobe o tapia	Madera	Caña revestida o bahareque	Caña no revestida	Otros materiales	Total
14.94	78.73	5.51	0.66	0.04	0.01	0.12	100.00
c. Techo (%)							
Hormigón (losa, cemento)	Asbesto (Eternit, Eurolit)	Zinc	Teja	Palma, paja u hoja	Otros materiales	Total	
70.81	13.56	8.30	7.20	0.03	0.11	100.00	
d. Tenencia (%)							
Propia y totalmente pagada	Propia y la está pagando	Propia (regalada, donada, heredada o por posesión)	Prestada o cedida (no pagada)	Por servicios	Arrendada	Anticresis	Total
33,0%	8,3%	8,8%	9,7%	1,3%	38,8%	0,2%	100%

Fuente: INEC 2010, Instituto de la Ciudad de Quito
Elaboración propia

Los materiales predominantes en la construcción de viviendas de Quito son: para pisos, materiales como la duela, parquet, tablón o piso flotante con un 33,88 %, la cerámica, baldosa, vinil o mármol un 34,34 % y, ladrillo o cemento con un 23,67 % (Tabla 11a); para paredes exteriores, el empleo de ladrillo o bloque con un 78,73 % (Tabla 11b) y; para techos, el uso de losas de hormigón con un 70,81 %, seguido por el uso de asbesto (Eternit, Eurolit) con un 13,56 % (Tabla 11c).

La Figura 12 muestra las principales actividades económicas de Quito, de 23 citadas, el comercio al por mayor y menor ocupa el primer lugar con un 20,7 %, seguido por las industrias manufactureras (13,5 %) y la industria de la construcción (7 %). Quito genera concentración de personas de todo el país y del mundo, en parte, por su rol como capital del país, así como, por su ubicación geopolítica dentro del país (Moya Campaña

2021), esto no solo incide en la tenencia de la vivienda con un mayor número de viviendas arrendadas que propias, 33 % frente a 38,8 % respectivamente (Tabla 11d), sino también en el número de comercios establecidos generalmente en planta baja.

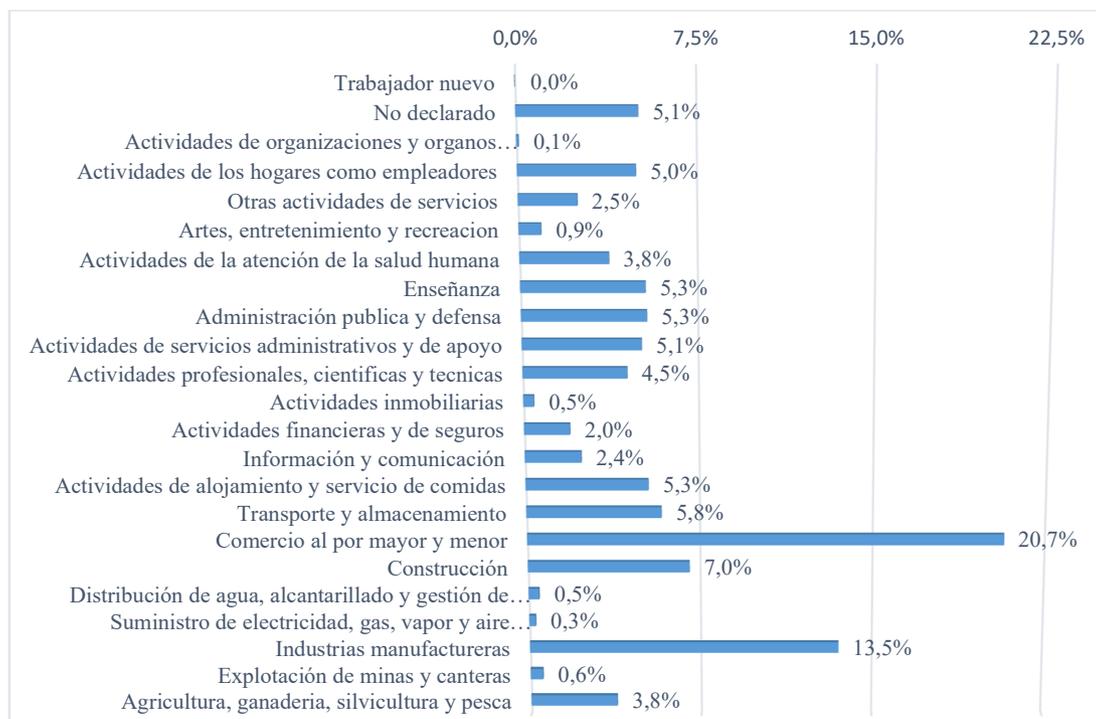


Figura 12: Actividades económicas en Quito
Fuente: INEC 2010, Instituto de la Ciudad de Quito
Elaboración propia

En conclusión y una vez descritos los datos se infiere que; en el país, el crecimiento del entorno construido aumenta en promedio un 3 % anual, la preponderancia de la vivienda está en el desarrollo de construcciones nuevas, el uso residencial unifamiliar, y en menor proporción mixto, el uso casi totalitario del hormigón armado tanto en la estructura como cimientos y cubierta, aunque le sigue de cerca las cubiertas de asbesto; y paredes de bloque; el área promedio de construcción de 131 m² sugiere que muy probablemente las viviendas predominantes en la Provincia de Pichincha sean de dos y tres dormitorios para un estrato de ingresos medios.

En cuanto a Quito, las viviendas de estructura de hormigón armado con mampostería de bloque predominan el paisaje urbano, pero a la vez su desarrollo presenta una diferenciación por altura de edificaciones o número de pisos. En este aspecto, las viviendas de uno y dos pisos se presentan mayoritariamente como unifamiliares, seguido por viviendas mixtas (residencial y comercial) con un promedio de altura de tres pisos y

bloques multifamiliares de mayor altura. En el sector suburbano se desarrollan más viviendas tipo villa/casa, mientras que en la parte urbana exceptuando el centro histórico se desarrollan viviendas tipo departamento o apartamentos en casa o edificio. La forma predominante de las viviendas convencionales es rectangular.

Es menester acotar el poco control que se ejerce en materia de productos comerciales y salud en nuestro país. En el mundo, distintos países han prohibido el uso del asbesto como material de construcción, al ser catalogado en todas sus formas como un material de compuestos cancerígenos para el ser humano (Magnani et al. 2023). Sin embargo, en Ecuador aún se utiliza libremente este material, aunque el sector salud trabaje arduamente paleando las enfermedades, una parte de ellas podrían ser evitadas si se consideraran criterios de prevención, como, por ejemplo, la no exposición a la ciudadanía con materiales de construcción de venta libre y desfavorables para su salud.

1.3. Selección de los prototipos

La caracterización de la vivienda en Quito, determinó los tipos de vivienda predominantes en Quito, mismos que sirven de base para determinar los prototipos convencionales que representan a los edificios residenciales de Quito. Los prototipos convencionales se seleccionaron en función de la predominancia en el paisaje urbano, mediante la lectura que ofrece los datos estadísticos y encuestas relacionados a edificios en la ciudad.

Los parámetros físicos que determinaron los prototipos predominantes y que esta investigación estimó que representen a la vivienda convencional de Quito son: tipo de materiales usados en la construcción, número de pisos, tipo de vivienda. En este último punto, la expresión “tipo de vivienda” se relaciona con la preferencia que se tiene por habitar un edificio residencial, por ejemplo, los edificios pequeños y medianos de uno o dos pisos de altura destinados como vivienda generalmente acogen una familia (unifamiliar) y habitualmente se les denomina casa/villa o vivienda unifamiliar; cuando estos son sujeto de ampliaciones en altura y le confieren a la planta baja un estatus comercial y la vivienda pasa a tener un uso combinado, denominándose vivienda de uso mixto, y por supuestos, los planificados desde su concepción como mixtos, mientras que los edificios de mayor altura tienen una mayor capacidad para albergar más de un número de familias denominándose multifamiliar.

Este último punto es importante definir previo a la simulación porque, por ejemplo, determina las cargas en la demanda de energía del edificio o los aportes internos de calor por los equipos y los usuarios del edificio. En consecuencia, se define esta primera fase y quedan: dos prototipos unifamiliares (uno que represente a la vivienda social y otro que represente una familia de ingresos de estratos medios), un prototipo multifamiliar que represente la preferencia de habitar en edificios de apartamentos y un último edificio de uso mixto que represente aquellas viviendas que incorporan otras actividades adicionales a su uso principal como por ejemplo actividades comerciales.

Subsiguiente, la determinación por número de pisos también se basó en la predominancia de las viviendas, así como en las tendencias de crecimiento del parque inmobiliario de Quito. Para los prototipos de viviendas unifamiliares se eligió uno y dos pisos, la vivienda de un piso como representante de la vivienda social, la vivienda de dos pisos representa a la vivienda de ingresos de estratos medios, la vivienda mixta se decide sea de tres pisos, dos pisos habitados por una familia y un piso para actividades comerciales. Para las viviendas multifamiliares se decide un número de pisos más alto, 10 pisos de altura, en función a la altura media de edificios de apartamentos en sectores de crecimiento urbano vertical de Quito y, a la media en tendencia actual de venta de departamentos en altura.

Tabla 12
Tipología seleccionada para la simulación de prototipos de vivienda convencional

Tipo de vivienda	No. piso	Dimensiones (m)		Ventanas (%)	Sistema constructivo convencional
		A	L		
Unifamiliar (vivienda social)	1	6.3	7.9	16	Estructura de hormigón armado, y mampostería de bloque de hormigón
Unifamiliar (estrato de ingresos medios)	2	6.0	8.0	30	
Mixto (estrato de ingresos entre bajos y medios)	3	7.0	8.0	30	
Multifamiliar (estrato ingresos altos)	10	35.0	18.0	40	

A = ancho, L = largo

Nota: para todos los prototipos, la altura de entrepiso es de 3m y la altura de piso a cielo falso 2,5m.

Elaboración propia

El sistema constructivo predominante de las viviendas en Quito es: estructura de hormigón armado, paredes de bloque. Se decide mantener el mismo sistema constructivo en todos los prototipos que representen a la vivienda convencional de la ciudad. Los cuatro prototipos de vivienda convencional seleccionados, se exponen en la Tabla 12.

En cuanto a las características físicas de las ventanas, no se halló un registro documentado del tipo de ventanas que se use en la vivienda de Quito, por ello, como materiales se decide simular con ventanas de vidrios simples (una hoja) en función de lo mayormente observado físicamente en la ciudad. En cuanto a las dimensiones de las ventanas, se decide manejar una media en función de porcentajes sobre la fachada, en referencia a los huecos de fachadas de viviendas existentes y los proyectos inmobiliarios. Definir esta característica es relevante, ya que, en principio, las ventanas son el medio por el cual ingresa la energía solar al edificio en mayor proporción, determinar tanto las dimensiones como el material es relevante para una mayor aproximación del prototipo al comportamiento energético real de la vivienda.

En cuanto a la geometría de los prototipos, la forma predominante de las viviendas de Quito fue rectangular, por tanto, se mantiene el mismo aspecto formal en todos los prototipos. En cuanto al dimensionamiento, el mismo se decide de la siguiente manera:

Tabla 13
Características técnicas de los 8 prototipos a simular

Uso Residencial	R. Unifamiliar 1 piso		R. Unifamiliar 2 pisos		R. Mixto 3 pisos		R. Multifamiliar 10 pisos (42u)	
Prototipos	EdR-1	NZ-1	EdR-2	NZ-2	EdR-3	NZ-3	EdR-10	NZ-10
Sistema constructivo	C	NZEB	C	NZEB	C	NZEB	C	NZEB
Lado N-S (m)	6,30	6,30	8,00	8,00	8,00	8,00	35,00	35,00
Lado E-O (m)	7,90	7,90	6,00	6,00	7,00	7,00	18,00	18,00
Área (m ²)	49,77	49,77	96,00	96,00	168,00	168,00	6.300,00	6.300,00
Ventanas (%)	16	pd	30	pd	30	pd	40	pd

EdR significa edificio de referencia y es el prototipo convencional, NZ es el prototipo NZEB y los números en ambos prototipos son el número de pisos del prototipo. C es el sistema constructivo convencional: hormigón armado, mampostería bloque ligero de cemento, losa entrepiso de hormigón y vidrio simple 4mm. NZEB es el sistema constructivo NZEB que se define en la simulación; y pd significa por definir. El edificio residencial multifamiliar de 10 pisos tiene 42 apartamentos.

Elaboración propia

Para los prototipos de vivienda social de un piso, se toma como referencia la vivienda social de un piso propuesta por el MIDUVI, en el prototipo de vivienda de dos pisos el dimensionamiento referencial obedece a la oferta de viviendas comerciales de dos pisos en urbanizaciones, para los prototipos de vivienda mixta de tres pisos, sirve referencia las dimensiones de las viviendas de dos pisos, pero se incrementa 1m de un

lado que sirva como metraje total de adecuación para el acceso independiente a la vivienda pero también para estimar diferentes configuraciones formales en la simulación y, se aumenta un piso más que albergue el área comercial. Subsiguiente la caracterización de los prototipos se presenta en la Tabla 13.

Cabe aclarar, que las simulaciones efectuadas son a nivel plan masa, es decir, no se elaboran planos arquitectónicos, solo se efectúan esquemas de dimensionamientos y áreas, pues el enfoque de este estudio es cuantificar el ahorro de energía que representa un NZEB en comparación con una vivienda de construcción tradicional, y esto se puede lograr sin entrar en detalles de elaboración de planos, los datos ingresados en las simulaciones son suficientes para determinar los resultados, así como las medidas pasivas, activas y de tecnología de energía renovable que tendría un NZEB, es decir, el análisis a partir de simulaciones como el efectuado en este estudio, es la parte inicial previo al diseño arquitectónico del edificio.

Los resultados de las simulaciones de los prototipos convencionales, servirán en este estudio, como un edificio de referencia para la medida de la eficiencia energética de los prototipos NZEB. Por tanto, en esta investigación toma como punto de partida para el análisis energético comparativo, la simulación de los prototipos que representan a los edificios residenciales de construcción convencional.

Para la determinación de los prototipos NZEB, se mantiene la misma configuración formal y aspectos físicos relacionados con la volumetría y dimensiones. En cuanto a los materiales, para el presente estudio, estos se definen en la simulación, es decir, el propósito de las simulaciones de NZEB es medir cuanto se podría alcanzar a reducir, si se construye con materiales de mayor resistencia térmica y se aplican estrategias pasivas como, por ejemplo, el dimensionamiento óptimo de las ventanas, la mejor orientación de las ventanas con respecto a la ubicación geográfica, estimar que funciona de las opciones recomendadas como medidas de EEE. En otras palabras, se optimiza el mismo esquema configurativo del edificio de referencia (prototipo convencional) mediante criterios de casa pasiva y tecnología de energías renovables.

Para efectos de medir el real aporte de la arquitectura de un NZEB a la mitigación de GEI, esta investigación no estima las mejoras por eficiencia energética activa, como la mejora en los sistemas de iluminación, equipos electrónicos y de calentamiento de agua. Para efectos de lograr la meta de alcanzar un NZEB, se ingresan valores de cargas eléctricas de equipos electrónicos y de iluminación ya mejorados tanto para los prototipos de vivienda convencional como para los prototipos NZEB. Es decir, el edificio de

referencia ya tiene algunas mejoras, como la mejora en iluminación y equipos y la mejor orientación.

Contrastando con la realidad del país, a nivel nacional el gobierno ha realizado esfuerzos por aumentar en el sector residencial el aporte de eficiencia energética activa, con el cambio de tecnología de refrigeradores, la etiqueta de energía en equipos electrónicos, el cambio de focos incandescentes por fluorescentes, entre otros. En esta misma línea, la iluminación LEED en el país, ya es tendencia, aunque el uso de focos y lámparas fluorescentes continua, la tendencia es hacia la iluminación LEED en el país.

1.4. Selección de los programas para simulaciones

Una vez determinados los prototipos, se inicia con la elección los softwares que intervienen y convienen para efectuar la simulación. El criterio de selección de las herramientas de simulación se basó en tres principios: seguridad, accesibilidad y amigabilidad. La seguridad se refiere a la solidez y confianza de los resultados. La accesibilidad está determinada por las licencias, si las mismas son de libre acceso, ósea abiertas, o requieren comprarlas. La amigabilidad es más específica, se refiere a que sean amigables con el arquitecto, es decir, que programa tenga un entorno de trabajo similar a los programas ya usados por los arquitectos.

Por ello, Uno de los programas más potentes en los cálculos energéticos y que permite la entrada gráficos es EnergyPlus, aunque en principio el lenguaje que usa es de programación, existen diversos programas de interfaz gráfica que traducen la información gráfica a datos numéricos para EnergyPlus, y por supuesto el programa si admite en ingreso de datos externos. La entrada grafica amigable seleccionada fue SketchUp, con el fin de ensayar en esta investigación herramientas que puedan ser usadas de forma inmediata por los profesionales de la construcción, además la interfaz gráfica interactúa con los plugins SG Save y Open Studio. SG Save presenta algunas herramientas que facilitan el prediseño arquitectónico con algunas herramientas como, por ejemplo, asignar ventanas en porcentajes sobre las fachadas seleccionadas en un solo paso. OpenStudio transcribe los datos gráficos a un lenguaje apto para que sean calculados por EnergyPlus, y presenta un abanico de opciones como diseño de materiales, librería de materiales, sistema de familia de materiales, entre otros, también ayuda a definir como se presenta la información, o qué información se requiere sea calculada por EnergyPlus, se podría decir que este plugins es un administrador de la información.

Caracterización del programa EnergyPlus (e^+)

Uno de los programas más usuales a nivel mundial es EnergyPlus (e^+). Fue lanzado por primera vez en 1999 como un reemplazo para el programa de simulación de energía DOE-2 y desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). Sus bases teóricas son la física de los edificios y la termodinámica; es capaz de simular el comportamiento energético de un edificio en un entorno específico y determinar su consumo energético. Utiliza un enfoque de elementos finitos para calcular el intercambio de calor y la distribución de la temperatura en el interior del edificio. También utiliza una variedad de algoritmos y modelos para simular el comportamiento de los sistemas de climatización y de iluminación, así como para calcular el consumo energético. Los resultados de las simulaciones pueden incluir información sobre el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, la distribución de la temperatura y la humedad en el interior del edificio, entre otros (US Department of Energy 2014; 2021).

Para realizar las simulaciones, e^+ requiere datos de entrada como: 1. Características climáticas, como datos meteorológicos para simular las condiciones climáticas externas del entorno, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la radiación solar. Con esos datos calcula el intercambio de calor entre el edificio y el entorno. 2. Geometría del edificio, requiere información sobre la geometría del edificio, como la forma, el tamaño, la orientación y la ubicación geográfica, con ella calcula la exposición solar del edificio y la distribución de la temperatura en el interior del edificio. 3. Características de los materiales de construcción como, las características físicas (densidad, espesor, textura, color, entre otros) y propiedades térmicas de los materiales de construcción (conductividad térmica, la capacidad calorífica, entre otros); con esa información calcula el intercambio de calor entre el edificio y el entorno. 4. Sistemas de climatización e iluminación, demanda la información sobre los tipos de sistemas de climatización y iluminación utilizados en el edificio, como el tipo de equipo, la capacidad y el rendimiento, con ello simula el comportamiento de los sistemas y calcula el consumo energético de los mismos (US Department of Energy 2021; 2014).

En resumen, e^+ puede calcular el intercambio de calor entre el edificio y el entorno, la distribución de la temperatura y la humedad en el interior del edificio, y el consumo energético. Adicional efectúa otros cálculos como las emisiones de gases de efecto invernadero (impacto ambiental). El programa interactúa con múltiples programas

incluidos los de interfaz gráfica como ya se describió en la Tabla 5 acápite 3 del capítulo anterior.

Caracterización de la interfaz gráfica y los plugins

La interfaz gráfica seleccionada fue SketchUp en alianza con los plugins OpenStudio o SgSave. SketchUp es un software de modelado 3D utilizado para crear diseños de arquitectura, ingeniería y construcción. Se basa en un sistema de componentes y herramientas intuitivas que permiten crear modelos en 3D de forma rápida y eficiente. Plugins como OpenStudio o SgSave pueden ser instalados en SketchUp. En la actualidad, SketchUp requiere comprar una licencia, pero las versiones antiguas como SketchUp Home 2017 siguen siendo gratuitas y pueden ser usadas con los plugins, adicional la versión reciente de SketchUp permite el uso libre del software por un mes.

OpenStudio es un software libre y de código abierto que fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) en colaboración con un consorcio de empresas, organizaciones y universidades líderes en la industria de la construcción sostenible. Proporciona herramientas para modelar, analizar y optimizar el rendimiento energético de edificios. Está diseñado para ser utilizado por ingenieros, arquitectos y otros profesionales de la construcción, posee motores de cálculo como e^+ , Radiance, OpenFOAM, que le dan un modelado de simulación energética más avanzado. OpenStudio mediante su plugin se integra con SketchUp, lo que permite integrarse durante la elaboración de los modelos 3D de edificios creados en SketchUp, exportarlos y utilizarlos como base para las simulaciones energéticas. OpenStudio convierte los datos gráficos en información numérica que puede utilizar e^+ para simular el rendimiento energético. Así mismo, puede convertir los resultados numéricos del cálculo como, el consumo de energía, la eficiencia energética del edificio, entre otros, en resultados gráficos y numéricos.

SG SAVE es un simulador avanzado de certificación energética española, desarrollado por el equipo de Simulación Energética del Grupo empresarial SAINT-GOBAIN,³⁵ con el objetivo de proporcionar una herramienta eficiente y accesible para el cálculo y certificación energética de edificios españoles. Funciona integrándose con SketchUp para analizar la eficiencia energética de un modelo de edificio mediante

³⁵ Es un grupo empresarial especializado en servicios de ingeniería y consultoría en el ámbito de la eficiencia energética y el desarrollo sostenible, en Barcelona, España.

simulaciones energéticas avanzadas de edificios. El plugin permite realizar verificaciones en cumplimiento a la norma española CTE-HE y CTE-HE1. Es una herramienta eficaz para la certificación y análisis energético de edificios que combina la potencia gráfica de SketchUp, la transcripción de lenguaje gráfico a numérico de OpenStudio con algoritmos avanzados de simulación energética.

A diferencia de OpenStudio, SG SAVE posee plantillas como, tipo de familias de materiales de construcción y cargas energéticas para las viviendas, permite la simulación de edificios de uso residencial y posee algunas ventajosas herramientas de graficación del edificio, que agilizan el prediseño y diseño del modelo energético, ahorrando tiempo y recursos informáticos. La instalación de los programas es fácil, rápida y no ocupa mayor espacio de almacenamiento del computador.

2. Simulaciones energéticas

En simulación energética se analiza un modelo energético. Un modelo es una representación simplificada y abstracta de un sistema o proceso que se utiliza para estudiar y comprender cómo funciona, predecir su comportamiento y tomar decisiones informadas. Un modelo puede ser una representación en papel, un dibujo, un esquema, un diagrama, una simulación o un sistema matemático (Eley 2016). Para esta investigación un modelo o modelo energético será también un prototipo, que represente de forma simplificada y abstracta un edificio (convencional y NZEB) para evaluar su eficiencia energética y su potencial de producción de energías renovables.

La simulación se realizó en las coordenadas geográficas, latitud -0,15, longitud -78.48 y elevación 2812 msnm.

2.1. Objetivos de la simulación

En esta investigación la simulación tiene por objetivo estimar el aporte de la eficiencia energética pasiva. Por tanto, la posible ganancia por eficiencia energética activa en las cargas eléctricas quedó al margen de esta simulación, las cargas impuestas a los prototipos EdR y NZ son iguales y ya están mejoradas. Es decir, los prototipos EdR se simulan con mejoras en la eficiencia energética activa, para disminuir posibles incertidumbres en los aportes de la eficiencia energética pasiva de los NZ, por posibles aportes relacionados a la mejora de la eficiencia energética activa y que afecten a la

medida real efectiva de ganancia por concepto de casa pasiva. Se recuerda que los prototipos EdR aunque representen a la vivienda de construcción convencional, en esta investigación son también prototipos de referencia para medir la eficiencia energética pasiva de los prototipos NZ.

En esta investigación se analiza los prototipos NZ desde el concepto de casa pasiva y el consumo de energía eléctrica, queda al margen de esta investigación otros análisis de formas de energía como por ejemplo energía en forma de calor. La dotación de energías renovables es a partir de fotovoltaica para producir energía eléctrica, el calentamiento de agua sanitarias con otras formas de energía, por ejemplo, mediante calor, no se exploraron. Se considera que existen tecnologías más eficientes en este ámbito como la energía solar térmica, pero al ser una fuente de energía por calor, estuvo fuera del rango de análisis de esta tesis.

2.2. Prototipos EdR

En esta investigación la simulación energética contempló, las sombras urbanas generadas por edificios adyacente y árboles. Se inicia con la graficación de la geometría en 3 dimensiones en SketchUp con la interacción de los plugins SG Save y OpenStudio. En cuanto a la geometría, para todos los prototipos EdR, se utilizó una medida media de apertura o huecos de fachadas en función de un análisis de planos de vivienda que se comercializan en Quito. No se realizaron particiones interiores³⁶ horizontales (en planta) en EdR-1, EdR-2 y EdR-3, se trabajó únicamente con medidas espaciales volumétricas de la envolvente como ancho, largo, si se efectuaron las particiones verticales. Para EdR-10 si se realizaron particiones interiores horizontales para delimitar al interior del edificio de 42 apartamentos, el criterio de la partición fue similitud de zona térmica³⁷ y por apartamentos. No se realizó mejora alguna a la envolvente de los prototipos de referencia, solo se estimó una mejor disposición urbana (orientación) de los prototipos EdR-2, EdR-3 y EdR-10 de acuerdo a las orientaciones recomendadas (Sentido norte – sur, lado más largo de la edificación rectangular). La orientación del prototipo EdR-1 sobre la longitud más larga de la fachada es (este-oeste) (Tabla 13).

³⁶ Elemento que divide el interior del edificio en áreas distintas y autónomas, de manera vertical u horizontal (paredes, suelos y techos).

³⁷ Espacio formado por uno o varias áreas en los que la temperatura, los servicios y usos, pueden considerarse idénticas.

2.3. Prototipos NZ

Para los prototipos NZ, se trabajó con la misma geometría de los prototipos EdR, y se inició mejorando la envolvente.

Para la aislación térmica, los huecos de fachadas fueron determinados en función del balance térmico de cada prototipo, determinados a través de procesos optimización manual en combinación con la herramienta “pon huecos a las fachadas” por porcentajes de SG Save. Se eliminaron puentes térmicos de juntas entre elementos constitutivos (cubierta, paredes y piso) y huecos de fachadas (ventanas y puertas exteriores), no se evitaron puentes térmicos por fisuras o mala práctica constructiva debido a que estos tipos de puentes térmicos, si bien son comunes en el medio, no son palpables, ni se evitan en una simulación sino en la fase de construcción.

Para efectos de este estudio el límite del sistema de construcción es el prototipo NZ (demanda y generación de energía en el sitio), dentro de los límites de construcción el NZ consume su producción de energía renovable cogenerada en el sitio y exporta los excedentes de producción de energías renovables de vuelta a la red pública. Los objetivos impuestos son: lograr el balance neto ZEB (sistema de ponderación generación/cargas), no superar el EUI mayor a 24 kBTU/pie² al año y no superar la demanda de energía del prototipo de referencia (prototipos ER). Para ello, se comparan las demandas y generaciones ponderadas³⁸ para verificar si se alcance o no el saldo cero netos y se mide la demanda de energía con el EUI bajo máximo admisible, así como también se comparan las demandas de energía entre los prototipos ER y NZ según corresponda su número de piso y área.

2.4. Energías renovables

Dentro de la simulación está incluido el cálculo de dotación de energía eléctrica a partir de la generación de electricidad a través de explotación de energía renovable solar fotovoltaica en el sitio, no se exploró otras formas de energía renovable, en función de la dimensión de la investigación, siendo idóneas para los NZEB en Quito tecnologías como la solar térmica para el calentamiento de aguas sanitarias, que podrían explorarse en otras investigaciones.

³⁸ El termino ponderado hace alusión al sistema de ponderación que se le ha asignado al NZEB.

La demanda inicial de energía se estimada dentro de una plantilla de calculo que predefine/asume un consumo mínimo por unidad de metro cuadrado, que posterior iguala con el área del prototipo y muestra valores ideales de consumo en ese prototipo de referencia. La demanda de energía es el resultado de la sumatoria de todas las cargas de energía individuales que presente el modelo. Para la estimación de cargas de energías por calentamiento de agua, el programa calcula el uso de la energía considerando el clima y las ganancias de calor de las instalaciones de agua que tenga en modelo.

Adicional se realizó un ejercicio de dotación de energía eléctrica renovable a los vehículos eléctricos particulares de la vivienda.

Las políticas actuales energéticas apuntan hacia la dotación de energía eléctrica para vehículos, siendo ya posible cargar el vehículo eléctrico desde una toma en las viviendas. El objetivo es constatar si la producción de energía en sitio abastece una posible necesidad de abastecimiento de energía a los vehículos dentro de la vivienda, la estimación contempló un vehículo por vivienda unifamiliar, siendo mayor la exigencia de carga en este aspecto para el bloque de apartamentos. El método de estimación se basó en un estudio sobre el consumo de combustibles de los vehículos de categoría M1 de uso frecuente y común en las familias ecuatorianas (Lima Oyola y Gálvez Sandoval 2016), para la estimación de consumo de vehículos eléctricos se consideró la medida de uso ya establecida para los vehículos a combustión y lo que estipulan los catálogos comerciales de vehículos eléctricos en el mercado nacional en cuanto a consumo y rendimiento.

Para la optimización de los modelos NZEB, a fin de generar un balance de calor cercano a cero, la simulación contempló dos medidas para conseguir el mejor rendimiento energético. La primera fue la aplicación porcentual gradual de ventanas en función a la demanda de calefacción y refrigeración. Una vez que se tuvieron valores cercanos a cero en la demanda de calefacción y refrigeración se observó que las ventanas este y oeste no aportan mayormente al rendimiento energético, pero si las ventanas norte y sur. Para lograr el balance anual energético, el aporte de energía del sol debe ser equilibrada y constante. Por tanto, las ventanas norte y sur tienen una ganancia solar constante a lo largo de todo el año, pero no en la misma proporción, ya que el movimiento del sol por una oblicuidad elíptica de $23^{\circ}26'29''$ es seis meses hacia el hemisferio norte y seis meses en el hemisferio sur. Las simulaciones se hicieron a -0.15 latitud sur, con lo cual las ventanas norte y sur deben equilibrar la carencia directa del sol alrededor de seis meses y el -0.15 de la latitud. Para ello y en segunda instancia, una vez determinado los porcentajes de las ventanas de cada modelo, se efectuó una pequeña variación, entre un 1 y 5 % entre las

ventanas norte y sur. Por ejemplo, para el modelo NZ-1 dentro del 23 % de ventanas en las fachadas norte y sur se modificó dentro de ese porcentaje un rango de 1 al 5 %, es decir, entre las ventanas norte (22,75 y 22,95 %) y sur (23,25 y 23,05%) con la finalidad de lograr un balance de calor cercano a cero. El -0.15 latitud determina que la fachada norte recibirá un poco más de sol al año de forma directa que la fachada sur, por tanto, el criterio adoptado fue suplir esa pérdida aparente de energía solar anual de la fachada sur generando un mayor porcentaje de apertura en las ventanas sur, en relación con las ventanas norte.

Conclusiones del capítulo tercero

La metodología empleada tiene un solo objetivo, determinar si efectivamente los prototipos planteados como NZEB cumplen o no su estatus con las medidas de eficiencia energética adoptadas en un clima como Quito. Para ello, en primer lugar, se caracterizan los distintos elementos que intervienen en el límite del sistema constructivo del prototipo convencional y NZEB conforme al método planteado por Sartori et al., el prototipo convencional tiene una función principal y es la de ser un prototipo de referencia en la medida de eficiencia energética pasiva al prototipo NZEB. En segundo lugar, se caracterizan los cuatro prototipos de NZEB, manteniendo similitud formal con el prototipo de referencia, realizando en las simulaciones solo procesos de optimización de la arquitectura, y reduciendo pérdidas y ganancias de calor a través de un porcentaje acorde de ventanas.

Los programas para la simulación se eligieron en función a la efectividad (resultados altamente confiables), accesibilidad (código abierto) y fácil operatividad (amigable) con los profesionales competentes en el diseño de espacios.

La simulación se inicia con los prototipos convencionales como modelos de referencia. Luego sobre la base de los prototipos convencionales se simulan los prototipos NZEB, se optimiza el diseño con criterios de eficiencia energética pasiva a través del uso de materiales con alta resistencia térmica, reducción de puentes térmicos y el equilibrio de las ganancias y pérdidas de calor a través de las ventanas. Los resultados obtenidos permiten iniciar la discusión en el siguiente capítulo.

Capítulo cuarto

Resultados y discusión

Este capítulo se discuten los resultados obtenidos de las simulaciones descritas en la metodología del capítulo anterior, delineadas por la hipótesis: ¿Cuál es el potencial de la estrategia NZEB para controlar y disminuir las emisiones de GEI del sector residencial en la ciudad de Quito?

Se dividen los resultados en dos etapas, se inicia con el análisis de resultados preliminares, que son los obtenidos de las simulaciones de los prototipos convencionales, posteriormente se presentan los resultados de la simulación de los NZEB, y se realiza la comparación con el edificio de referencia (prototipo convencional). Se discuten los resultados obtenidos a partir de la imposición o meta puesta para alcanzar un NZEB en Quito.

1. Resultados

La Tabla 14 muestra los resultados obtenidos de los 8 modelos energéticos, recopila los principales hallazgos encontrados mediante las simulaciones. Se clasificó la información en una sola tabla con la finalidad de tener los resultados obtenidos juntos y poder contrastar entre los distintos valores posteriormente en la sección de discusión.

La fila prototipo contiene el nombre de cada modelo energético, donde EdR es el prototipo convencional, NZ es el prototipo NZEB y los números en ambos prototipos son el número de pisos que tiene cada modelo. La fila sistema constructivo presenta las características de la envolvente de cada modelo. Donde C es el modelo con el sistema constructivo convencional de hormigón armado, mampostería bloque ligero de cemento, losa entrepiso de hormigón y vidrio simple 4mm. AT1 significa, aislamiento Térmico 1, y corresponde al sistema constructivo de un NZEB con fachada de doble hoja, aislamiento de 4 cm, vidrio doble. AT2 significa, aislamiento térmico 2, y corresponde al sistema constructivo NZEB de fachada ventilada con vidrio aislante. La fila Lado Norte y Sur, describe las dimensiones longitudinales-perpendiculares al eje norte y el eje sur, expresadas en metros. La fila Lado Este y Oeste, describe las dimensiones longitudinales-perpendiculares al eje este y el eje oeste, expresadas en metros.

Tabla 14

Resultados Totales de las simulaciones EdR y NZ

Prototipo	EdR-1	NZ-1	EdR-2	NZ-2	EdR-3	NZ-3	EdR-10	NZ-10
Sistema constructivo	C	AT2	C	AT2	C	AT1	C	AT1
Lado Norte y Sur (m)	6,30	6,30	8,00	8,00	8,00	8,00	35,00	35,00
Lado Este y Oeste (m)	7,90	7,90	6,00	6,00	7,00	7,00	18,00	18,00
Número de pisos	1	1	2	2	3	3	10	10
Ventanas (%)	16	23	30	19	30	23	40	23
Demanda de calefacción (Kwh·year)	1.953	25	2.572	50	4.469	553	9.658	-
Demanda de refrigeración (Kwh·year)	-	3	-	-	-	11	789	-
Demanda total por climatización (Kwh·year)	1.953	28	2.572	50	4.469	564	10.447	-
Compacidad	0,62	0,62	0,91	0,91	1,11	1,11	3,31	3,31
Ganancias de calor (Kwh·year)	167,36	178,12	51,06	286,21	193,71	143,83	81,34	99,99
Pérdidas de calor (Kwh·year)	-203,09	-185,07	-148,80	-298,06	-214,18	-144,72	-152,36	-98,74
Balance de calor (Kwh·year)	-35,73	-6,95	-97,74	-11,85	-20,47	-0,89	-71,02	1,25
Energía primaria para agua caliente (kWh·year)	5.792	2.036	5.839	3.903	7.361	3.900	6545	4.825
Equipos electrónicos e iluminación (kWh·year)	1.334	1334	2.778	2.778	4.916	4.916	172.000	172.000
Vehículos (kWh·year)	33.436	29.160	33.436	29.160	33.436	29.160	1.337.440	1.166.400
Total demanda de energía (kWh·year)	7.126	3.376	8.617	6.681	12.277	8.816	178.545	176.825
Energía Renovable en el sitio (kWh·year)	-	11.427,78	-	11.136,11	-	12.994,44	-	138.052,78

C = Sistema constructivo convencional: hormigón armado, mampostería bloque ligero de cemento, entrepiso hormigón armado y vidrio simple 4mm

AT2 = Aislamiento Térmico 2: fachada ventilada con vidrio aislante.

AT1 = Aislamiento Térmico 1: Fachada de doble hoja; aislamiento de 4 cm; vidrio doble.

EdR significa edificio de referencia, el número representa a cada tipo de edificio residencial.

Nota: altura de piso a techo es de 3m, altura de piso a cielo falso 2.5m, en todos los prototipos.

Elaboración propia

La fila Ventanas es el área de ventanas con respecto a la pared donde se emplaza, expresada en porcentaje en proporción a la pared donde se inserta, por ejemplo, si el área de una pared mide 100 m^2 y la ventana 20 m^2 , el porcentaje del área de la ventana con respecto a la pared sería el 20 %.

La fila de la demanda de calefacción, es la energía requerida para calentar el espacio interior por enfriamiento, expresada en kWh al año, equivale a la incomodidad por frío. La fila de la demanda de refrigeración, es la energía necesaria requerida para enfriar el espacio interior por sobrecalentamiento, expresada en kWh al año, equivale a la incomodidad por calor.

La fila de la demanda total por climatización es la suma entre la demanda de calefacción y la demanda de refrigeración, expresada en kWh al año. La fila de compacidad es la relación entre el volumen de aire interior del edificio dividida para la suma de las áreas de cada superficie de la envolvente térmica exterior, el objetivo es medir el nivel de compacidad del modelo. La fila de ganancias de calor, es la suma de todas las ganancias por flujo de calor hacia el interior del modelo, expresadas en kWh al año. La fila de pérdidas de calor, es la suma de todas las pérdidas de calor desde el interior del modelo, expresadas en kWh al año.

La fila de balance de calor, es la cantidad producto de la resta entre las pérdidas de calor y las ganancias de calor, expresadas en kWh al año, las ganancias se dan mayoritariamente mediante las ventanas, pero cuando la apertura es mayor al óptimo requerido no aporta ganancias sino pérdidas de calor. La ventilación y la infiltración del aire también generan pérdidas de calor.

La fila energía primaria para agua caliente, describe la demanda de energía que se requiere para calentar el agua al interior, expresada en kWh al año. La fila de equipos electrónicos e iluminación es la sumatoria de todas las cargas eléctricas por concepto de dotación de energía a equipos e iluminación, expresada en kWh al año. La fila vehículos contiene la demanda de energía de los vehículos expresada en kWh año, para los prototipos EdR la demanda se estimó en función del consumo de energía anual promedio de un auto a combustión interna y para los prototipos NZ se estimó la demanda de energía requerida promedio al año por los vehículos eléctricos

La fila total demanda de energía, es la sumatoria de todas las cargas eléctricas del modelo energético, expresada en kWh al año, incluye las cargas de iluminación, equipos electrónicos y energía primaria para agua caliente. La fila energía renovable en el sitio,

indica la cantidad de energía producida por cada prototipo NZ, generada mediante energía solar fotovoltaica sobre la cubierta, expresada en kWh al año.

2. Discusión de los resultados

2.1. Modelos EdR

Los resultados indican que los modelos EdR si presentan demandas de energía por refrigeración y calefacción, mismas que reflejan el grado de incomodidad térmica que se presenta al interior de las viviendas convencionales de Quito. En comparación con los modelos NZ las demandas de energía por climatización son significativas. Al relacionar la demanda anual de energía por climatización con el área de construcción de cada modelo, el EdR-1 presenta el valor más alto con 39,24 kWh/m² al año, mientras que el modelo EdR-10 tiene el valor más bajo con 1,66 kWh/m² al año. Una de las razones por las que el modelo EdR-1 consume más energía que el modelo EdR-10 son las ganancias y pérdidas de calor. Al analizar las ganancias y pérdidas de calor respecto al área de superficie, el modelo EdR-1 presenta alrededor de 260 y 168 veces más de ganancias y pérdidas de calor que el modelo EdR-10, respectivamente. Este factor se relaciona con el porcentaje de ventanas, ya que el EdR-10 tiene un 40 % de ventanas y el EdR-1 tiene un 16 %. Sumado a la compacidad, el modelo EdR-1 tiene una compacidad de 0,62 y en oposición el modelo EdR-10 tiene 3,31. Además, la orientación del modelo EdR-1 no fue la óptima, fue el único de los modelos que se mantuvo con el lado el largo perpendicular al eje este-oeste, y en oposición EdR-10 tiene una orientación donde aprovecha mayormente la energía solar de mejor manera al calentar la cara más larga de la fachada todo el día de cara al sol (lado el largo perpendicular al eje norte-sur), lo cual le ayuda a mantener un equilibrio térmico. Se realizó una estimación de gasto de vehículos a combustión a fin de contrastar con la estimación de energía eléctrica para vehículos eléctricos, hallando que el cambio de la tecnología en cuanto al rendimiento del vehículo es similar, solo se logra una pequeña reducción de consumo con el cambio de tecnología. El beneficio radica en el uso de energías limpias.

2.2. Modelos NZ

En esta sección se discuten los resultados que permiten verificar el cumplimiento de rendimiento energético de un NZEB.

EUI bajo máximo admisible & demanda de energía

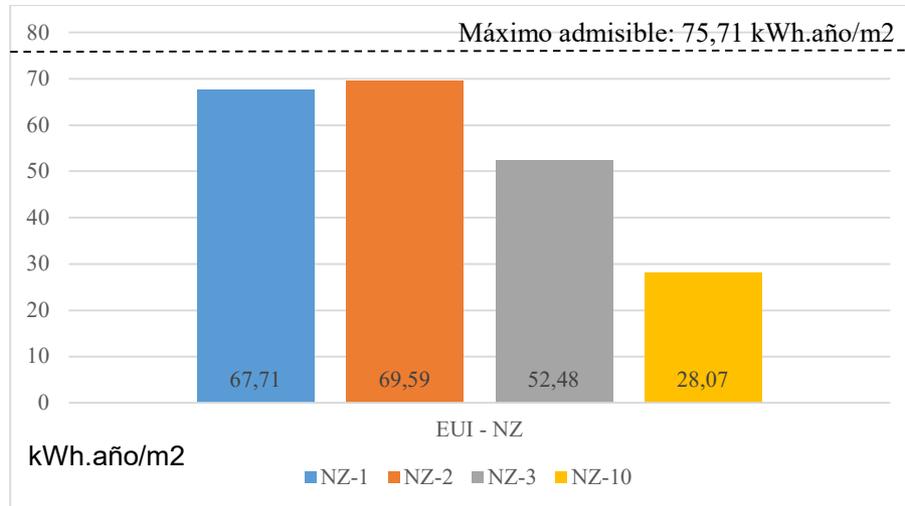


Figura 13: Verificación del EUI bajo máximo admisible
Elaboración propia

Uno de los objetivos trazados para verificar si se cumple con la especificación de edificio de alto rendimiento energético, es comparar el EUI bajo máximo admisible planteado por ASHRAE con el EUI de los prototipos NZEB. Se calculó el EUI para cada modelo con la demanda total de energía dividida para el área de construcción. En la Figura 13 los resultados muestran que todos los modelos NZ cumplen con este requisito.

Balance de calor

El balance de calor es una de las medidas obligatorias de todo edificio de energía cero o ZEB, el ideal es que la diferencia entre pérdidas y ganancias de calor se aproximen a cero. En la Figura 14 se muestran el balance de calor de los prototipos NZEB. Las ganancias de calor son de color azul y se ubican sobre la línea del eje horizontal 0. Las pérdidas se presentan en color naranja y se ubican bajo la línea horizontal 0. El balance de calor se calculó restando las pérdidas de calor a las ganancias de calor. Para lograr un

NZEB se requiere que este balance sea cero. El procedimiento para obtener NZEB requiere de iteraciones manuales, por lo que es aceptable un margen de desbalance.

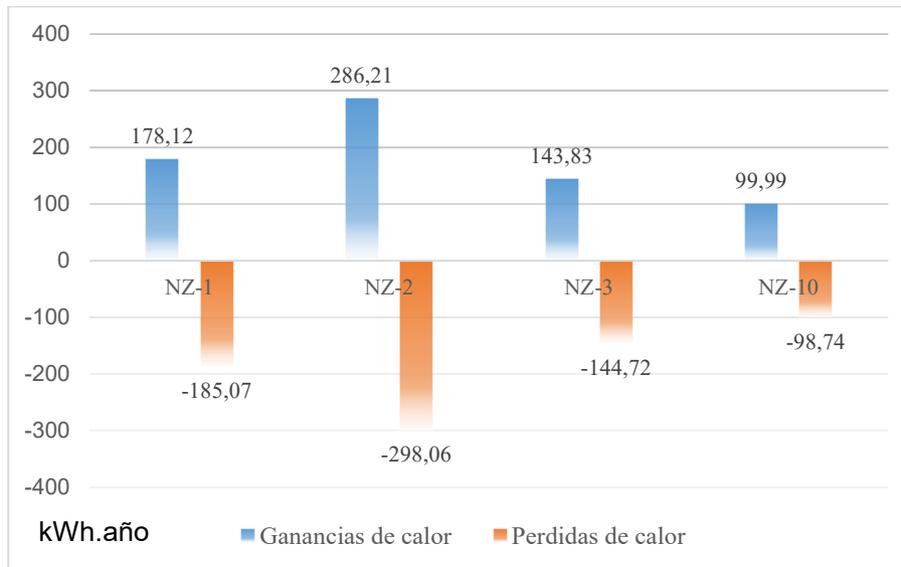


Figura 14: Balance de calor NZEB
Elaboración propia

Es importante destacar la incidencia que tiene el balance de calor en el rendimiento energético de un NZEB, si se compara el balance de calor con los resultados obtenidos para la estimación de EUI bajo máximo admisible, se observa que a medida que un modelo se acerca a un balance de calor cercano a cero como NZ-10 (1,25) el EUI es más bajo (28,07 kWh.año/m²), mientras que el balance de calor es menos cercano a cero como NZ-2 (-11,85) el EUI es más alto (69,59 kWh.año/m²) (Figura 14). Por tanto, lograr la mejor optimización de un modelo energético, requiere lograr un balance de calor igual a cero en los prototipos.

Otro aspecto que se observa, es la relación entre las ganancias/pérdidas de calor. En el balance de calor, si un modelo genera más pérdidas que ganancias de calor (NZ-3, -0,89) tienden a presentar un mayor EUI (52,48 kWh.año/m²) que un modelo donde la ganancia de calor es mayor que la pérdida (NZ-10, 1,25) presenta un EUI más bajo (28,07 kWh.año/m²) (Figura 14), aunque las diferencias sean mínimas y aparentemente NZ-3 tenga el mejor valor numérico de balance de calor, aunque negativo. Tener un mínimo saldo y que este sea positivo influye en un mejor rendimiento energético como NZ-10 que es el único que tiene un saldo positivo cercano a cero.

Otro aspecto a resaltar son los huecos de las fachadas de los modelos NZ, en tres de los cuatro modelos se tiene un 23 % de huecos en fachada (Tabla 14) y se logra mantener un rango de balance de calor anual, lo que pudiera indicar que entre un 20 % a 25 % de huecos en fachadas son suficientes para aprovechar las ganancias solares en la ciudad de Quito, mas no es algo que se pueda afirmar con entera certeza, se necesitaría un numero de muestras mayor, destacando en este punto, solo la coincidencia del 23 %. A mayor o menor porcentaje se generan pérdidas de calor o ganancias solares que desequilibran el balance térmico del modelo, sin embargo, se requieren mayores análisis para reforzar esta hipótesis, que escapan del campo de estudio, quedando solo evidencia en los resultados de las simulaciones.

Eficiencia energética pasiva en función del edificio de referencia (EdR)

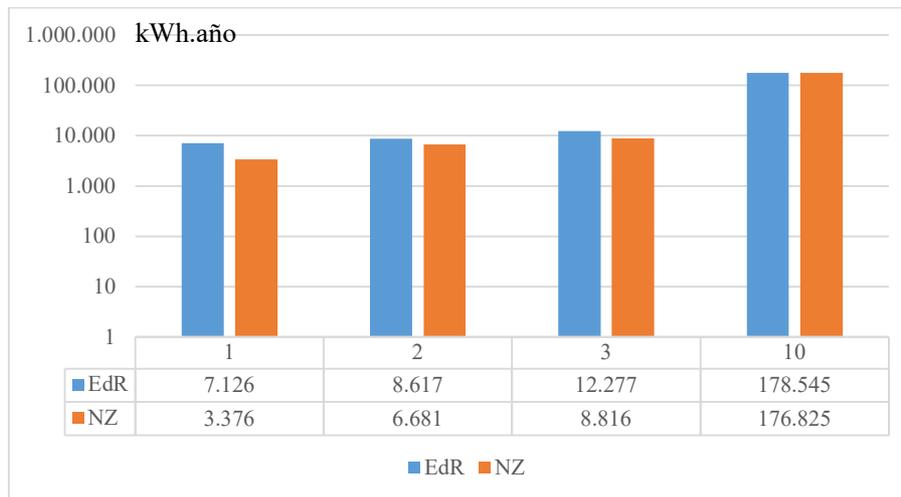


Figura 15: Aporte de Eficiencia energética pasiva
Elaboración propia

Esta forma de medir la eficiencia energética fue planteada por Sartori et al. y radica en comparar las demandas de energía con un edificio de referencia. El edificio de referencia fue cada uno de los modelos EdR. La mayor ganancia en eficiencia energética pasiva, la tuvo el modelo NZ-1 con un 52,62 %, y la menor ganancia lo obtuvo NZ-10 con 0,96 % (Figura 15). estos resultados discrepan de los resultados obtenidos en el balance de calor, y podría deberse a que EdR-10 presento un mejor desempeño dentro de todo el grupo de modelos analizados de modelos EdR. Por tanto, al aplicar mejoras a la envolvente del modelo NZ-10, no presenta mayor desempeño.

Las mejoras a la envolvente de los modelos NZ en relación a EdR, hacen que la demanda de energía para calentar el agua sanitaria, la calefacción y la refrigeración de los modelos NZ se reduzcan significativamente. El porcentaje de ventanas de los modelos EdR no son óptimos, producen pérdidas y ganancias de calor heterogéneas, que generan desequilibrio en el balance de calor. La justa medida de aperturas de ventanas de los modelos NZ en conjunto con las mejoras a la envolvente generan un mejor desempeño energético en los modelos.

Los aportes a la eficiencia energética pasiva se reflejaron en la disminución de la demanda de energía para calentamiento de agua sanitaria, calefacción y refrigeración. Sin embargo, en esta investigación no se consideró la reducción de calefacción y refrigeración, ya que los modelos EdR tratan de representar a las viviendas tipo de la ciudad, mismas que en la mayoría no hacen uso de calefacción y refrigeración, pero estos resultados si permiten percibir el malestar térmico al interior. Con ello, las ganancias de la eficiencia energética pasiva para los modelos NZ-1, NZ-2, NZ-3 y NZ-4 son del 52,62, 22,47, 28,19 y 0,96 % respectivamente, con respecto a sus modelos de referencia. Si se promedian solo las cargas de los tres modelos EdR y NZ 1,2 y 3 y se restan entre sí, la ganancia por eficiencia energética pasiva es del 32,64 %.

Balance Neto ZEB

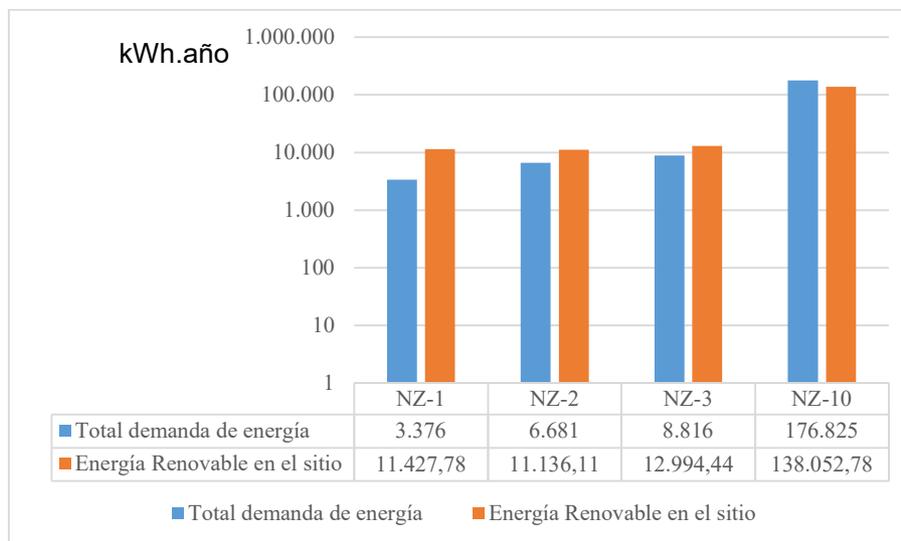


Figura 16: Cogeneración energía renovable en el sitio vs demanda total de energía de NZ
Elaboración propia

Para verificar el método de Sartori et al. se efectúa el balance neto ZEB entre la generación de energía en el sitio y la demanda total de energía. La cogeneración de energía renovable en el sitio se dio mediante energía solar fotovoltaica sobre la cubierta con una ocupación del 85 % del área de cubierta, la producción de energía eléctrica fotovoltaica fue de 231 kWh.año/m². NZ-1, NZ-2, NZ-3 alcanzan a cubrir su demanda anual de energía con la cogeneración de energía solar fotovoltaica en el sitio sobre la cubierta (Figura 16).

Intuitivamente se deduce que a medida que se incrementa el número de pisos la capacidad del sistema de cogeneración se reduce, porque la demanda de energía aumenta sobre una misma área de cogeneración (fotovoltaica sobre cubiertas). Por lo tanto, el NZ-10 no alcanza a cubrir toda la demanda de energía con su propia producción, requiriendo cubrir alrededor del 22 % de su demanda con energía de la red eléctrica pública. Sin embargo, NZ-10 ha mostrado rendimientos óptimos, en el EUI bajo como máximo estimado. La mejora en su envolvente redujo la demanda por climatización y calentamiento de agua, pero no fue significativo, en comparación al resto de modelos. En la estimación de balance de calor logró el segundo mejor desempeño con un valor cercano a cero (1,25), aunque al ser el único modelo con saldo positivo le falta tener el EUI más bajo de todos los modelos.

En los tres modelos NZ-1, NZ-2 y NZ-3 (Figura 16) se tiene excedentes de producción de energía de 8.052, 4.455 y 4.178 kWh.año respectivamente. En porcentaje equivale a 70,46, 40,01 y 32,16 % respectivamente. Si se suman toda la generación de energía fotovoltaica de los 3 modelos NZ-1, NZ-2 y NZ-3 y se restan todas las cargas de los tres modelos se tendría el excedente promedio de 16.685 kWh.año, con una estimación promedio porcentual de excedentes de 46,92 %.

Con estos resultados, se analiza la posibilidad de utilizar los excedentes de producción de energía renovable en la dotación de energía eléctrica para la carga de vehículos eléctricos. El consumo estimado de un vehículo eléctrico fue de 29.160 kWh.año y con los excedentes de producción de energía se alcanzaría a cubrir la demanda de carga de vehículos eléctricos del 27,61, 15,28 y 14,33 %, respectivamente. Estos resultados reflejan que el excedente de producción es significativo, pero el aporte hacia otros sectores emisores de GEI como el sector transporte es mínimo con la demanda actual de uso de vehículo particular.

Un detalle importante en el análisis de energía, es el uso real que se le daría o tendría la energía eléctrica renovable solar fotovoltaica producida. Durante el día, el sol

casi siempre está presente, afectado regularmente por sombras de nubes, que en este estudio si se consideraron, la demanda de energía en el día queda prácticamente cubierta, más la demanda de energía en la noche, no. Un NZEB no usa baterías, porque la base sobre la cual se desarrolla el concepto de energía neta cero también es generar un balance o saldo entre la energía exportada e importada, o la energía entregada y recibida. Durante el día, el edificio exportaría los excedentes de energía a la red eléctrica urbana y en la noche se conectaría a la red eléctrica urbana. Por tanto, si tendrían importaciones de energía, pero las mismas no superarían a las exportaciones, porque quedarían cubiertas por los excedentes de producción. En los 3 modelos NZ la exportación de energía sería mayor que la importación.

Conclusiones del capítulo cuarto

La aplicación de los distintos métodos de medida para verificar el cumplimiento de un NZEB, enriqueció en entendimiento acerca del comportamiento de los modelos NZEB. El primer método aplicado fue el de Eley (2016), mediante el contraste del EUI bajo como máximo admisible para un clima C3 como el de Quito, en la categoría de apartamento. Los resultados sitúan a NZ-10 como el mejor en eficiencia energética, al no presentar mayores demandas de energía y requerir 28,07 kWh.año/m², la mayor demanda de energía la tuvo el EdR-2 con 69,59 kWh.año/m². El balance de calor estimado para medir el equilibrio energético de los modelos, constató que el equilibrio más cercano lo obtuvieron NZ-3 y NZ-10 con -0.89 y 1.25 kWh.año, respectivamente. El mayor desbalance lo presentaron NZ-1 y NZ-2 con -6.95 y -11.85 kWh.año, respectivamente.

Sin embargo, al estimar con el método propuesto por Sartori et al. los rendimientos de los edificios cambian dramáticamente, el NZ-10 no cumple las exigencias de dotación de energía renovable en el sitio. La dotación de energía fotovoltaica por generación en sitio sobre la cubierta, restringe su capacidad de producción, cuando se podría aprovechar su amplia área de fachadas para alcanzar a cubrir la demanda, pero en la actualidad el rendimiento de fotovoltaica en fachadas no es significativo, seguramente se mejorará la tecnología y en un futuro cercano se podrá aprovechar las fachadas de los edificios para suministrar de energía al edificio. En cuanto a la medida de eficiencia energética en relación al edificio de referencia, también se observa que las mejoras aplicadas al modelo NZ-10 no representan ganancias sustanciales a la eficiencia energética pasiva, se deduce que esto se debe a que el edificio ER-10 presentó el mejor desempeño dentro de su

categoría EdR, el 40 % de apertura de ventanas le permite tener un margen de ganancias de calor significativas, con respecto a los demás modelos.

Los modelos NZ-1, NZ-2 y NZ-3 si cumplen las condiciones de Sartori et al. (2012) para ser un NZEB por la relación entre cargas/generación, más si se estima que NZ-10 pudiera suplir el faltante de energía renovable por generación fuera de sitio, también cumpliría. Los cuatro modelos NZ cumplen el requisito de EUI bajo como máximo admisible.

Los excedentes de producción de energía renovable promedio de los tres modelos de NZ son cercanos al 50 %, pero no alcanzan para cubrir una demanda supuesta por carga de vehículos eléctricos, solo cubren un promedio de 19,07 % de la demanda de los vehículos eléctricos. En un futuro esto se podría mejorar al reducir el uso del vehículo particular con la mejora de los sistemas de transporte público y seguridad ciudadana. Las ganancias promedio por concepto de casa pasiva estuvieron sobre el 30 %.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Todo lo analizado llama a la acción. La ágil respuesta que generen los distintos sectores hacia la mitigación del CCA conllevará a mejores resultados en la tarea conjunta de mitigar el CCA. Desde las ciudades la rápida acción hacia cero netos de carbono implica que, desde ya el desarrollo cotidiano de las actividades urbanas, limiten emisiones. Desde el sector de edificios, la rápida acción hacia cero netos, implica que los edificios nuevos limiten sus emisiones en la fase de diseño y fase operativa, mientras se desarrolla la industria necesaria para tener un parque inmobiliario de cero carbonos netos.

El estado del arte resaltó el potencial de la arquitectura vernácula y destacó como idóneo bajo nuestro contexto la implementación de la estrategia NZEB para Quito. Dada la amplitud que presenta el tema, se limitó el análisis energético solo de electricidad a partir de fuentes renovables, y a los aportes de la eficiencia energética pasiva o criterios de casa pasiva en nuestro clima, a través de simulaciones energéticas de los prototipos.

Los hallazgos más significativos de las simulaciones se presentan en la eficiencia energética pasiva, la arquitectura por si sola logra un ahorro de energía promedio sobre el 30 %, sumado a la mejora del confort térmico que se traduce en la ausencia y/o reducción de la demanda para calefacción y refrigeración. La producción de electricidad en el sitio por fotovoltaica superó la demanda en tres de los cuatro prototipos simulados, generando un excedente promedio cercano al 50 %, determinando que es posible tener un NZEB en Quito; además, el saldo positivo lo convierte en un NZEB plus o NZEB+, debido a que, su producción de energía sobrepasa su propia demanda de energía.

En cuanto a la disposición del edificio con respecto al entorno construido, se desarrolló mejor cuando las caras más largas de la geometría rectangular se ubicaron paralelo a los ejes norte y sur, por tanto, las mejores fachadas para lograr la eficiencia energética pasiva fueron tanto la fachada norte como la fachada sur. Con respecto a la disposición de las ventanas, se evitó ubicarlas sobre las fachadas este y oeste, por pérdidas y ganancias de calor excesivas, que desequilibraban el sistema energético de los edificios simulados, la proporción de ventanas para los prototipos analizados fue un 23 % de ventanas, siendo determinante para el balance energético observar cuanta energía solar

recibe cada fachada en la latitud de $-0,15$ de Quito, esto generó una variación leve en las aperturas de ventanas entre 1 al 5 %, en las ventanas norte y sur para que se equiparen por igual las ganancias solares en ambos lados, incrementando la dimensión mínimamente hacia la ventana sur. La relación consumo de energía y área de construcción determinó que el EUI necesario para alcanzar la meta de un NZEB si se cumplió en todos los edificios, estuvo por debajo de la medida mínima impuesta en esta investigación de 24 kBtu/sf/yr. Tener un NZEB si es posible en un clima como el de Quito.

Por otra parte, los resultados pueden presentar sesgos, ya que solo se ha evaluado el consumo de energía eléctrica sin considerar más formas de generar energía, y además se excluyó el posible aporte de eficiencia energética activa, a fin de determinar el real aporte del concepto de casa pasiva a la eficiencia energética pasiva que se traduce en un mejor desempeño energético de la arquitectura de los prototipos simulados.

De todo lo analizado, se deriva que un NZEB es un edificio hacia la transición de un parque edificatorio neutro de carbono, si bien su aporte en este sentido es el llamado “balance cero o saldo cero” en exportación e importación de energía de la red pública y carga y producción de energía, conforme avance la tecnología se espera que evolucione hacia edificios cero netos de carbono de por vida.

Recomendaciones

El ejercicio investigativo del presente estudio, permitió palpar múltiples aristas donde se podría intervenir desde la academia, el estado y la sociedad civil.

Por tanto, esta investigación considera oportuno desarrollar nuevos estudios en torno a:

- Realizar análisis de rendimiento energético en otras coordenadas geográficas del país, si bien la gran riqueza y diversidad de pisos climáticos que el país posee, nos permite disfrutar de una infinita variedad de flora, fauna y climas, más se requiere para cada tipo de clima una vivienda distinta que se adapte a un entorno y clima específico, lo cual limita poder generalizar tipos de vivienda a escala nacional.
- Optimización energética de edificios, se recomienda analizar si la radiación es determinante en otros lugares del mundo, puesto que, en Quito, con un clima neutro, privilegiado y estable, muy parecido al clima dado en primavera en latitudes altas y bajas, considerar la radiación solar fue determinante para lograr la optimización del modelo energético.

- La tecnología de los materiales de construcción, se recomienda tomar como punto de partida una fusión de saberes y tecnologías, entre el potencial higrotérmico que brindan los materiales de nuestra arquitectura vernácula como, la tierra, la piedra, la caña, la madera, entre otros y, el ya conocido potencial de resistencia estructural que tienen los actuales materiales usados en la construcción convencional como, hormigón armado, acero, entre otros.

Como se ha citado en la introducción, la falta de materiales e insumos de construcción para NZEB en el país, si bien, genera limitantes para la puesta en escena de un NZEB, esta ausencia puede presentar oportunidades de expansión y crecimiento en la industria de materiales de la construcción. Por consiguiente, es importante en este aspecto, recomendar el desarrollo de nuestra industria y tecnología de la construcción hacia NZEB. Para la arquitectura del edificio, se sugiere tomar como punto de partida una evolución de nuestros propios materiales autóctonos, que poseen grandes propiedades higrotérmicas y fusionar los mismos con los materiales modernos. Por ejemplo, el uso de la tierra, diferentes tipos de maderas o materiales pétreos que poseen una alta masa térmica en combinación con materiales modernos que le brinden tanto, las propiedades térmicas como estructurales necesarias para la puesta en obra dentro de la construcción. La industria tiene un rol transcendental en la reducción de emisiones de GEI desde el sector de la construcción, también se recomienda que sin perder la objetividad en su camino hacia la innovación, maximice la reducción del desperdicio y descarte de elementos y/o materiales de la construcción durante la construcción y vida útil de los edificios, donde por ejemplo, las readecuaciones permitan corregir y reparar solo las piezas de los elementos que requieren ser cambiados, con la meta de tener el mínimo posible de desperdicios, esto se puede lograr mediante la innovación de la industria de la construcción, a modo de ejemplo se cita uno de los ideales anhelados en la construcción como, efectuar cambios mediante piezas prefabricadas tipo lego, que permitan realizar modificaciones al interior de las viviendas con un mínimo de desperdicio y máximo de reutilización. Por consiguiente, desarrollar la industria de autopartes en todo el sector de la construcción.

Siguiendo la misma línea de pensamiento, a nivel institucional, se estima de vital importancia considerar dentro de los códigos de la construcción el empleo de materiales autóctonos de la construcción en la medida posible, pues su potencial higrotérmico y de confort térmico es muy alto; considerando que con esta acción no solo se revalorizan los materiales usados en nuestra arquitectura vernácula, sino que también desde el Estado se

podría incentivar el uso de materiales con menor huella de carbono, y tener otro frente de acción en la lucha contra el CCA. Además, hacia la innovación en la industria de la construcción, hacia una economía circular e industria de autopartes en el sector de la construcción; el acompañamiento institucional es esencial, por citar un ejemplo, solo a nivel de estándares y normalizaciones de los distintos materiales de construcción, la industria requiere límites desde las distintas instituciones pertinentes para mantener fiel la memoria en el tiempo las propiedades físicas y térmicas como, tamaño, textura, color o calidad como resistencia, durabilidad, entre otros.

Se conoce que los edificios generan más emisiones de GEI durante su uso, siendo relevante generar desde el Estado mecanismos de control respetuoso, sobre todo a aquellos edificios que cuenten con certificaciones energéticas, a fin de reducir verazmente las emisiones. En este punto, las instituciones que brindan servicios básicos como electricidad, agua potable, gas y recolección de basura, por ejemplo, podrían brindar controles por cuenta propia o, a través de contratos de prestación de servicio, e incorporar, por ejemplo, dentro de sus actividades, ejercicios de integración social con la comunidad como, visitas técnicas periódicas, panfletos explicativos de como generar ahorro de energía, agua, gas y reciclaje de basura, entre otros.

La construcción de la realidad social se forma día a día, con cada evento, suceso, novedad, entre otros. En escenarios de Cambio Climático Antropogénico se estima a mediano y largo plazo, posibles interrupciones abruptas de esa realidad habitual y cotidiana, por tanto y dentro de lo que compete al presente tema, se considera como ideal que el Estado pueda anticiparse a los hechos, e impulsar el proceso del cambio, mediante incentivos que promuevan la investigación, financiación y explotación de fuentes de energías renovables, el ahorro de energía y la construcción de edificaciones sostenibles.

Los procesos de cambio que la historia registra, siempre han venido de parte del grupo colectivo humano, de las grandes mayorías que tomaron acción ante un hecho o suceso insostenible. Por lo tanto, la presente investigación fue diseñada para toda la colectividad y con énfasis especial en los actores del sector de la construcción, por ello se insta a cada una de las personas inmersas en esta práctica, sea propietario, inversionista, profesional o trabajador de la construcción, a tomar el reto, de mejorar y optimizar los criterios de diseño ya dados en nuestra propia arquitectura vernácula, a fin de fusionar las buenas prácticas de la construcción de nuestros antepasados con la técnica e industria actual del parque de edificios.

Obras citadas

- AEMET, y OECC, eds. 2018. *Cambio Climático: Calentamiento Global de 1,5 °C. Guía Resumida. Informe Especial del IPCC sobre los impactos de un calentamiento Global de 1,5 °C y las Sendas de Emisión relacionadas*. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica.
- Agudo Torrico, Juan. 1999. “Arquitectura tradicional. Reflexiones sobre un patrimonio en peligro”. *PH: Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico* 7 (29): 183–93.
- AIMC Marcas. 2016. “Un día en la vida de los españoles. Datos significativos del estudio”. *Asociación para la Investigación de medios de comunicación*, 1–5. 24 de mayo. https://www.aimc.es/aimc-c0nt3nt/uploads/2016/05/160524_np_aimc_marcas_empleo_del_tiempo.pdf.
- Alelwani, Raed, Muhammad Ahmad, Yacine Rezgui, y Alan Kwan. 2019. “Rawshan: Environmental Impact of a Vernacular Shading Building Element in Hot Humid Climates”. *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, junio, 1–6. doi: 10.1109/ICE.2019.8792589.
- Alvear Calle, Alexandra, Paulo Peña Toro, y Jerko Labus. 2013. “Edificaciones Sustentables: Caso Ecuador”. *Revista Tecnológica ESPOL-RTE* 26 (2): 28–43.
- Alvear Calle, Alexandra, José Hernán Sánchez, Emilia Tapia Abril, y Gabriela Ordoñez Alvarado. 2016. “Declaraciones consensuadas del Seminario-Taller: ‘Arquitectura Sostenible’ Un enfoque sobre estrategias de diseño bioclimático: Caso Ecuador”. *Estoa* 5 (9): 133–49. doi: 10.18537/EST.V005.N009.11.
- Amundsen, Roald, y Colin Archer. 1909. “A Proposed North Polar Expedition”. *The Geographical Journal* 33 (4): 440–56.
- Anderson, Elizabeth P., Clinton N. Jenkins, Sebastian Heilpern, Javier A. Maldonado-Ocampo, Fernando M. Carvajal-Vallejos, Andrea C. Encalada, Juan Francisco Rivadeneira, et al. 2018. “Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams”. *Science Advances* 4 (1): 1–7. doi: 10.1126/sciadv.aao164.
- Attia, Shady. 2012. “A Tool for Design Decision Making: Zero Energy Residential Building in Hot Humid Climates”. Tesis doctoral, Université Catholique de Louvain.

- . 2018. *Net Zero Energy Buildings (NZEB). Concepts, Frameworks and Roadmap for Project Analysis and Implementation*. Oxon: Butterworth-Heinemann.
- Austin, Miguel Chen, Katherine Chung-Camargo, y Dafni Mora. 2021. “Review of Zero Energy Building Concept-Definition and Developments in Latin America: A Framework Definition for Application in Panama”. *Energies* 14 (5647): 1–29. doi: 10.3390/en14185647.
- Banco Mundial. 2022a. “Población, total | Data”. 2022. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>.
- . 2022b. “Población urbana | Data”. 2022. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL>.
- . 2023. “Emisiones de gases de efecto invernadero totales (kt de equivalente de CO2) | Data”. *Banco Mundial*. https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.GHGT.KT.CE?end=2019&name_desc=false&start=1990&view=chart&year=2019.
- Bates, Bryson, Zbigniew W. Kundzewicz, Shaohong Wu, y Jean Palutikof, eds. 2008. *El Cambio Climático y el Agua: Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra: Secretaría del IPCC. <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf>.
- Becchio, Cristina, Paolo Dabbene, Enrico Fabrizio, Valentina Monetti, y Marco Filippi. 2015. “Cost optimality assessment of a single family house: Building and technical systems solutions for the nZEB target”. *Energy and Buildings* 90: 173–87. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.12.050.
- Benchimol, Maíra, y Carlos A. Peres. 2015. “Widespread Forest Vertebrate Extinctions Induced by a Mega Hydroelectric Dam in Lowland Amazonia”. *PLOS ONE* 10 (7): 1–15. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0129818>.
- Blok, Kornelis, y Evert Nieuwlaar. 2021. *Introduction to Energy Analysis*. 3ª ed. New York: Routledge.
- Bobadilla, Ariel, Rodrigo Figueroa, Maureen Trebilcock, Muriel Díaz, Cristián Muñoz, Daniela Besser, María Beatriz Piderit, Freddy Guzmán, y Reinaldo Sánchez. 2012. *Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética de Edificios Públicos*. Santiago de Chile: Instituto de la Construcción.
- Bostancıoğlu, E. 2010. “Effect of building shape on a residential building’s construction, energy and life cycle costs”. *Architectural Science Review* 53 (4): 441–67. doi: 10.3763/ASRE.2009.0040.

- Brucemann, Robert, y Donald Prowler. 1977. "19th Century Mechanical System Designs". *Journal of Architectural Education* 30 (3): 11-5. doi: 10.1080/10464883.1977.10758104.
- Busso, Matías, y Julián Messina, eds. 2020. *La crisis de la desigualdad. América Latina y el Caribe en la encrucijada*. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Buytaert, Wouter, Rolando Céleri, Bert de Bièvre, Felipe Cisneros, Guido Wyseure, Jozef Deckers, y Robert Hofstede. 2006. "Human impact on the hydrology of the Andean páramos". *Earth-Science Reviews* 79: 53–72. doi: 10.1016/j.earscirev.2006.06.002.
- Cangelli, Eliana, y Lukia Fais. 2012. "Energy and environmental performance of tall buildings: state of the art". *Advances in Building Energy Research* 6 (1): 36–60. doi: 10.1080/17512549.2012.671497.
- Celi, Carlos, Juan Carlos Pantoja, Diego Sosa, y Carlos Ayala. 2018. "Vulnerabilidad Sísmica de Quito Ecuador, Fase 1: Curvas de Capacidad de las tipologías estructurales, proyecto GEM-SARA". *Revista PUCE*, nº 106: 41–79. doi: 10.26807/revpuce.v0i106.130.
- CENACE. 2020. *Informe Anual 2020 (parte 1)*. Quito: Operador Nacional de Electricidad. <http://www.cenace.gob.ec/informe-anual-2020/>.
- Çengel, Yunus A, y Michael A Boles. 2008. *Termodinámica*. 6ª ed. México, D.F.: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Centro de Investigación CLAVE. 2018. "Estadísticas de la Feria: Mi casa clave!" *Bienes Raíces Ecuador*, abril. <https://www.clave.com.ec/estadisticas-de-la-feria-mi-casa-clave/>.
- Chandel, S. S., Vandna Sharma, y Bhanu M. Marwah. 2016. "Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65: 459–77. doi: 10.1016/J.RSER.2016.07.038.
- Cohen, I. Bernard. 1943. "Franklin's Experiments on Heat Absorption as a Function of Color". *The University of Chicago Press* 34 (5): 404–7. doi: 10.1086/347857.
- Comisión Europea. 2005. *Cómo hacer más con menos. Libro Verde sobre la eficiencia energética*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.

- . 2022. “La taxonomía verde europea, ¿qué es y por qué es importante?” *Comisión Europea. Representación en España*, enero. https://spain.representation.ec.europa.eu/noticias-eventos/noticias-0/la-taxonomia-verde-europea-que-es-y-por-que-es-importante-2022-01-25_es.
- Cozzi, Laura, Tim Gould, Stéphanie Bouckaert, Christophe Stéphanie, Paweł Olejarnik, Thomas Spencer, Michael Waldron, y Brent Wanner. 2021. *World Energy Outlook 2021*. París: International Energy Agency.
- Dobelsteen, Andy van den, Eric van den Ham, Tess Blom, y Kees Leemeijer. 2019. “Additional information for MOOC, Zero-Energy Design: an approach to make your building sustainable”. *Massive Open Online Course, Tu Delft*. <https://online-learning.tudelft.nl/courses/zero-energy-design/>.
- EC ARCERNNR. 2021. “Resolución Nro. ARCERNNR-013/2021”. *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables*. Tercer Suplemento N° 448 - Registro Oficial. 10 de mayo.
- EC IIGE. 2018. *BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL 2018*. Quito: Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables.
- . 2021. *Balance Energético Nacional 2020*. Quito: Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables.
- EC MIDUVI. 2018. “Eficiencia energética en Edificaciones Residenciales (EE)”. *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)*. Edición Especial No.358 - Registro Oficial. 16 de marzo.
- . 2019. “Reglamento para la validación de tipologías y planes masa para proyectos de vivienda de interés social”. *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*. Acuerdo ministerial No. 0045-19. 26 de febrero.
- . 2020. “Energías Renovables (ER)”. *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)*. Registro Oficial No. 756. 9 de julio.
- EC Secretaría de Ambiente. 2015. “Inventario de la huella de carbono del 2015. Distrito Metropolitano de Quito”. *MDMQ - Secretaria de Ambiente*, 1–52. Accedido 28 agosto de 2022, [http://www.quitoambiente.gob.ec/images/Secretaria_Ambiente/Cambio_Climatico/plan_accion_climatico_quito_2020/Inventario_Huella_de_Carbono_del_Distrito_Matropolitano_de_Quito_Año_2015_Final1\(1\).pdf](http://www.quitoambiente.gob.ec/images/Secretaria_Ambiente/Cambio_Climatico/plan_accion_climatico_quito_2020/Inventario_Huella_de_Carbono_del_Distrito_Matropolitano_de_Quito_Año_2015_Final1(1).pdf).
- Eley, Charles. 2016. *Design Professional's Guide to Zero Net Energy Buildings*. Washington, DC: Island Press.

- ES MITMA. 2022. “Documento Básico HE. Ahorro de energía”. *Código Técnico de la Edificación (CTE)*. 14 de junio, BOE 15/06/2022.
- Esbensen, Torben V , y Vagn Korsgaard. 1976. “Dimensioning of the heat balance and the solar heating system in the zero energy house in Denmark”. *Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering*, 1–13.
- . 1977. “General rights Performance of the zero energy house in Denmark”. *Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering*, 1–9.
- Europa Press. 2016. “7.300 millones de personas viven en el 7,6% de superficie terrestre”. *Europapress*. 19 de octubre. <https://www.europapress.es/ciencia/cambio-climatico/noticia-7300-millones-personas-viven-76-superficie-terrestre-20161019131629.html>.
- Fahimipour, Ashkaan K., Erica M. Hartmann, Andrew Siemens, Jeff Kline, David A. Levin, Hannah Wilson, Clarisse M. Betancourt-Román, et al. 2018. “Daylight exposure modulates bacterial communities associated with household dust”. *Microbiome* 6: 1–13. doi: 0.1186/s40168-018-0559-4.
- Feist, Wolfgang, Rainer Pfluger, y Wolfgang Hasper. 2020. “Durability of building fabric components and ventilation systems in passive houses”. *Energy Efficiency* 13: 1543–59. doi: 10.1007/s12053-019-09781-3.
- Feng, Wei, Qianning Zhang, Hui Ji, Ran Wang, Nan Zhou, Qing Ye, Bin Hao, Yutong Li, Duo Luo, y Stephen Siu Yu Lau. 2019. “A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114: 1–24. doi: 10.1016/j.rser.2019.109303.
- Fernandes, Jorge, Ricardo Mateus, Helena Gervásio, Sandra M. Silva, y Luís Bragança. 2019. “Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance”. *Renewable Energy* 142: 345–63. doi: 10.1016/J.RENENE.2019.04.098.
- Formación Efinovatic. 2019. “Curso Avanzado SG SAVE (OpenStudio - EnergyPlus) (SG SAVE Avanzado)”. *Massive Open Online Course*. <https://formacion.efinovatic.es/>.
- Friedlingstein, Pierre, Michael O’Sullivan, Matthew W. Jones, Robbie M. Andrew, Luke Gregor, Judith Hauck, Corinne le Quéré, et al. 2022. “Global Carbon Budget 2022”. *Earth System Science Data* 14: 4811–4900. doi: 10.5194/ESSD-14-4811-2022.

- Gao, Chao, Martijn J. Booij, y Yue Ping Xu. 2019. “Impacts of climate change on characteristics of daily-scale rainfall events based on nine selected GCMs under four CMIP5 RCP scenarios in Qu River basin, east China”. *International Journal of Climatology*, 1–21. doi: 10.1002/joc.6246.
- Gaudry, Karl-Heinz, Luis Godoy-Vaca, Sebastián Espinoza, Guillermo Fernández, y Andrea Lobato-Cordero. 2019. “Normativas de energía en edificaciones como estrategia de mitigación al cambio climático”. *Avances en Ciencias e Ingenierías* 11 (18): 154–71. doi: 10.18272/aci.v11i2.1285.
- Givoni, Baruch. 1998. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- GlobalABC, IEA, y UNEP. 2020. *GlobalABC Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America 2020-2050: Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector*. París: United Nations Environment Programme.
- Gómez Melgar, Sergio Jesús. 2017. “Contribuciones desde la arquitectura y la ingeniería a los edificios de energía mínima”. Tesis doctoral, Universidad de Huelva. <http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/15590>.
- Gommans, Leonard Johannes Jacobus Henricus María. 2012. “Gebiedsgerichte Energetische Systemoptimalisatie: Een onderzoek naar de mogelijkheden voor een duurzame regionale energietransitie”. Tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Delft. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:a25c434e-c716-4d30-8bae-fc3e8bc35ecd>.
- Harkouss, Fatima. 2018. “Optimal design of net zero energy buildings under different climates”. Tesis doctoral, Universidad de la Costa Azul. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01891916>.
- Heymann, Matthias. 2010. “The evolution of climate ideas and knowledge”. *WIREs Climate Change* 1: 581–97. doi: 10.1002/WCC.61.
- Hidalgo Villacis, César Ernesto. 2018. “Arquitectura bioclimática en el Páramo Andino del Ecuador: Mejora térmica-energética de materiales como envolvente en la vivienda social”. Tesis de fin de Master, Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30663>.
- Hoegh-Guldberg, Ove, Daniela Jacob, Michael Taylor, Marco Bindi, Sally Brown, Ines Camilloni, Arona Diedhiou, et al. 2018. “Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems”. En *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special*

- Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*, editado por Jose Antonio Marengo, Joy Pereira, y Boris Sherstyukov, 175–311. Cambridge, UK: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157940.005.
- Icaza, Daniel, David Borge-Diez, y Santiago Pulla Galindo. 2022. “Analysis and proposal of energy planning and renewable energy plans in South America: Case study of Ecuador”. *Renewable Energy* 182: 314–42. doi: 10.1016/j.renene.2021.09.126.
- IEA. 2021. *Energy Efficiency 2021*. París. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2021>.
- IFC. 2019. *Green Buildings: A Finance and Policy Blueprint For Emerging Markets*. Washington, D.C: International Finance Corporation .
- INEC. 2016. “Encuesta de Edificaciones 2016: (Permisos de Construcción)”. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*, 1–28. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Encuesta_Edificaciones/2016/2016_EDIFICACIONES_PRESENTACION.pdf.
- INER. 2016. *Análisis de oportunidades de investigación, desarrollo e innovación en eficiencia energética y energías renovables en Ecuador: Un enfoque desde el sector académico*. Quito: Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables.
- Ionescu, Constantin, Tudor Baracu, Gabriela Elena Vlad, Horia Necula, y Adrian Badea. 2015. “The historical evolution of the energy efficient buildings”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 243–53. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.062.
- IPCC. 2018. “Summary for Policymakers”. En *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*, editado por Myles R. Allen, Mustafa Babiker, Yang Chen, Heleen de Coninck, Sarah Connors, Renée Dube, Opha Pauline van Diemen, Kristie L Ebi, et al., 1–31. Cambridge, UK: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157940.001.
- . 2021. “Summary for Policymakers”. En *Assessment Report 6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, 1–31. Cambridge, UK: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896.001.

- Jaysawal, Rajan Kumar, Suprava Chakraborty, D. Elangovan, y Sanjeevikumar Padmanaban. 2022. "Concept of net zero energy buildings (NZEB) - A literature review". *Cleaner Engineering and Technology* 11: 1–16. doi: 0.1016/j.clet.2022.100582.
- Jumbo Olaya, Carolina Isabel, y Adriana Natalia Morales Loor. 2021. "Escenarios críticos de inundación con caudal líquido en la cuenca baja del río Coca y análisis crítico con caudal sólido en los sectores de Toyuca, San Sebastián y La Playita". Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/25228>.
- Kim, Junsik, Dong Kun Lee, Robert D. Brown, Saehoon Kim, Jun Hyun Kim, y Sunyong Sung. 2022. "The effect of extremely low sky view factor on land surface temperatures in urban residential areas". *Sustainable Cities and Society* 80: 1–16. doi: 10.1016/J.SCS.2022.103799.
- Kottek, Markus, Jürgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, y Franz Rubel. 2006. "World map of the Köppen-Geiger climate classification updated". *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3): 259–63. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Lim, Stephen S., Theo Vos, Abraham D. Flaxman, Goodarz Danaei, Kenji Shibuya, Heather Adair-Rohani, Markus Amann, et al. 2012. "A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010". *The Lancet* 380: 2224–60. doi: 10.1016/S0140-6736(12)61766-8.
- Magnani, Corrado, Carolina Mensi, Alessandra Binazzi, Daniela Marsili, Federica Grosso, Juan Pablo Ramos-Bonilla, Daniela Ferrante, et al. 2023. "The Italian Experience in the Development of Mesothelioma Registries: A Pathway for Other Countries to Address the Negative Legacy of Asbestos". *Environmental Research and Public Health* 20 (936): 1–24. doi: 10.3390/IJERPH20020936.
- Majid, Noor Hanita Abdul, Hokoï Shuichi, y Nozomi Takagi. 2012. "Vernacular Wisdom: The Basis of Formulating Compatible Living Environment in Oman". *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 68: 637–48. doi: 10.1016/J.SBSPRO.2012.12.255.
- Martínez, Isidoro. 1992. "Capítulo 11: Difusión térmica y másica". En *Termodinámica básica y aplicada*, 243–68. Madrid: Dossat Editorial S.A.

- Maslin, Mark. 2014. *Climate Change: A Very Short Introduction*. 3^a ed. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows, Jérgen Randers, y William W. Behrens II. 1972. *The Limits to growth: A report The Club of Rome's project on the predicament of mankind*. 5^a ed. Washington, DC: A Potomac Associates Book. Edición de E-Book.
- Miller, Norm G, Dave Pogue, Quiana D Gough, y Susan M Davis. 2009. “Green Buildings and Productivity”. *Journal of Sustainable Real Estate* 1: 65–89. doi: g/10.1080/10835547.2009.12091783.
- Molina, Mario, Jose Sakukhán, y Julia Carabias. 2017. “El cambio climático: causas efectos y soluciones”. Edición de ePUB.
- Montalvo Beltrán, Esteban Mauricio. 2016. “Estudio de factibilidad económica y financiera utilizando tecnología Net Zero Energy para un proyecto de vivienda familiar de clase media urbana en la ciudad de Quito”. Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15285?locale=en>.
- Mora, E., E. Ordoñez, y C. Gómez. 2021. “Structural Vulnerability Assessment Procedure for Large Areas Using Machine Learning and Fuzzy Logic”. *International Review of Civil Engineering* 12 (6): 358–70. doi: 10.15866/irece.v12i6.19265.
- Moya Campaña, Michelle Alejandra. 2021. “Regularización de barrios informales y la incidencia en la calidad de vida. Estudio de caso barrios San Pedro de Monjas y San José Obrero, Distrito Metropolitano de Quito”. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/18570/DISERTACI%c3%93N%20MICHELLE%20MOYA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Musall, Eike. 2015. “Klimaneutrale Gebäude – Internationale Konzepte, Umsetzungsstrategien und Bewertungsverfahren für Null- und Plusenergiegebäude”. Tesis doctoral, Universidad de Wuppertal.
- Musall, Eike, Tobias Weiss, Karsten Voss, Aurélie Lenoir, Michael Donn, Shaan Cory, y François Garde. 2010. “Net Zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects”. *IEA Task 40 / Annex 52*, 1–8. doi: 10.18086/eurosun.2010.06.16.

- Naciones Unidas. 2020. “Cambio climático: el año 2019, el segundo más cálido registrado tras 2016”. *Noticias ONU: Mirada Global Historias humanas*. 15 de enero. <https://news.un.org/es/story/2020/01/1468012>.
- Nagengast, Bernard. 2002. “100 Years of Air Conditioning”. *ASHRAE Journal*, 44–46. http://www.civil.uwaterloo.ca/BEG/Arch673/ASHRAE_Jrnl_History.pdf.
- Nayak, Sridhara, y Tetsuya Takemi. 2020. “Robust responses of typhoon hazards in northern Japan to global warming climate: cases of landfalling typhoons in 2016”. *Meteorological Applications* 27 (5): 1–17. doi: 10.1002/MET.1954.
- ONU Asamblea General. 1987. *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común*. 4 de agosto. A/42/427.
- . 2015a. *Acuerdo de París*. 12 de diciembre. FCCC/CP/2015/L.9.
- . 2015b. *Agenda 2030*. 18 de septiembre. A/70/L.1.
- ONU-HABITAT. 2011. *Las ciudades y el cambio climático: orientaciones para políticas. Informe mundial sobre asentamientos humanos 2011*. Washington, DC: United Nations Human Settlements Programme.
- . 2016. *World Cities Report 2016: Urbanization and Development. Emerging Futures*. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme.
- Ordoñez, Elizabeth, David Mora, y Karl Gaudry. 2019. “Roadmap Toward NZEBs in Quito”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 609 (7): 1–6. doi: 10.1088/1757-899X/609/7/072040.
- Ordóñez, Freddy, Francisco Jácome, Paulo Castro, y Carlos Naranjo-Mendoza. 2019. “Sensitivity analysis of the variables affecting indoor thermal conditions on unconditioned dwellings in equatorial high-altitude regions from an experimentally validated model”. *Advances in Building Energy Research* 15 (4): 442–65. doi: 10.1080/17512549.2019.1582437.
- Palme, Massimo, Andrea Lobato, Andrés Gallardo, R. David Beltran, Juan Castillo, Geovanna Villacreses, y Manuel Almaguer. 2017. *Estrategias para mejorar las condiciones de habitabilidad y el consumo de energía en viviendas*. Quito: Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables.
- Passipedia. 2022. “The world’s first Passive House, Darmstadt-Kranichstein, Germany”. *Passipedia: The Passive House Resource*. Accedido 1 de octubre. https://passipedia.org/examples/residential_buildings/multi-family_buildings/central_europe/the_world_s_first_passive_house_darmstadt-kranichstein_germany.

- Passive House Institute. 2022. “Components Database”. *Passive House Institute*.
Accedido 28 de noviembre. <https://database.passivehouse.com/en/components/>.
- Pérez, Marina. 2014. “Ecoinvolucrate: Alternativa para la sostenibilidad en la Arquitectura”. *Estoa* 3 (5): 29–35. doi: 10.18537/EST.V003.N005.04.
- Pérez Pérez, Marina, y Luis A. Márquez Pérez. 2016. “Ecoinvolucrate, la estrategia de Ecuador para la construcción de edificios de energía casi nula”. Madrid: Ponencia presentada en el III Congreso EECC Edificios Energía Casi Nula, Madrid, 27 de julio.
- Pérez Pérez, Marina, y Andrea Parra. 2017. “Exploración de herramientas para diseño arquitectónico de edificios de bajo consumo energético usuales en el Ecuador”. En *Libro de Comunicaciones y Proyectos: IV Congreso EECN Edificios Energía Casi Nula*, 114–18. Madrid: Editorial Grupo Tecma Red.
- Pérez-Lombard, Luis, José Ortiz, y David Velázquez. 2013. “Revisiting energy efficiency fundamentals”. *Energy Efficiency*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s12053-012-9180-8>.
- Raptis, C. E., M. T.H. van Vliet, y S. Pfister. 2016. “Global thermal pollution of rivers from thermoelectric power plants”. *Environmental Research Letters* 11 (10): 1–9. doi: 10.1088/1748-9326/11/10/104011.
- Rees, Martin. 2018. *En el futuro: Perspectivas para la humanidad*. Barcelona: Editorial Crítica.
- Requena Ruiz, Ignacio. 2011. “Arquitectura adaptada al clima en el Movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960)”. Tesis doctoral, Universidad de Alicante. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/23997>.
- Ribera Arismendi, Marco Octavio. 2018. “Las mega represas no son energía limpia”. *Ecología en Bolivia* 53 (1): 1–6. http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v53n1/v53n1_a01.pdf.
- Ríos, Alberto, Jesús Guamán, y Carlos Vargas. 2018. “Análisis de la Implementación de una Estrategia de Reducción del Consumo Energético en el Sector Residencial del Ecuador: Evaluación del Impacto en la Matriz Energética”. *energía* 15 (1): 98–109 pp. doi: <https://doi.org/10.37116/REVISTAENERGIA.V15.N1.2018.328>.
- Rockström, Johan, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F Stuart Chapin, Eric Lambin, Timothy M Lenton, et al. 2009. “Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity”. *Ecology and Society* 14 (2): 1–32. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>.

- Sadekov, Aleksey Yu, Raja Ganeshram, Laetitia Pichevin, Rose Berdin, Erin McClymont, Henry Elderfield, y Alexander W. Tudhope. 2013. “Palaeoclimate reconstructions reveal a strong link between El Niño-Southern Oscillation and Tropical Pacific mean state”. *Nature Communications* 2013 4:1 4 (noviembre): 1–8. doi: 10.1038/ncomms3692.
- Sartori, Igor, Assunta Napolitano, Anna J Marszal, Shanti Pless, Paul Torcellini, y Karsten Voss. 2010. “Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings”. Ponencia presentada en la 8th International Conference on Solar Energy and Buildings (EuroSun 2010), Graz AT, 28 de septiembre. doi: 10.18086/eurosun.2010.06.21.
- Sartori, Igor, Assunta Napolitano, y Karsten Voss. 2012. “Net zero energy buildings: A consistent definition framework”. *Energy and Buildings* 48: 220–32. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.032.
- Schild, Kai, y Wolfgang Willems M. 2011. *Wärmeschutz Grundlagen – Berechnung – Bewertung*. Berlín DE: Editorial Vieweg+Teubner.
- Shareef, Sundus, y Hasim Altan. 2022. “Urban block configuration and the impact on energy consumption: A case study of sinuous morphology”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 163: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112507>.
- Stahl, W, K Voss, y A Goetzberger. 1994. “The self-sufficient solar house in Freiburg”. *Solar energy* 52 (1): 111–25.
- Steffen, Will, Katherine Richardson, Johan Rockström, Sarah E. Cornell, Ingo Fetzer, Elena M. Bennett, Reinette Biggs, et al. 2015. “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet”. *Science* 347 (6223): 736–46. doi: 10.1126/science.1259855.
- Stern, Nicholas. 2014. “Part II: The Impacts of Climate Change on Growth and Development”. En *The Economics of Climate Change. The Stern Review*, 92–121. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- Thirumalai, Kaustubh, Pedro N. DInezio, Yuko Okumura, y Clara Deser. 2017. “Extreme temperatures in Southeast Asia caused by El Niño and worsened by global warming”. *Nature Communications* 8 (1): 1–8. doi: 10.1038/ncomms15531.
- Torres Balbás, Leopoldo. 1930. *La vivienda popular en España*. Granada ES: Biblioteca ETS Arquitectura.

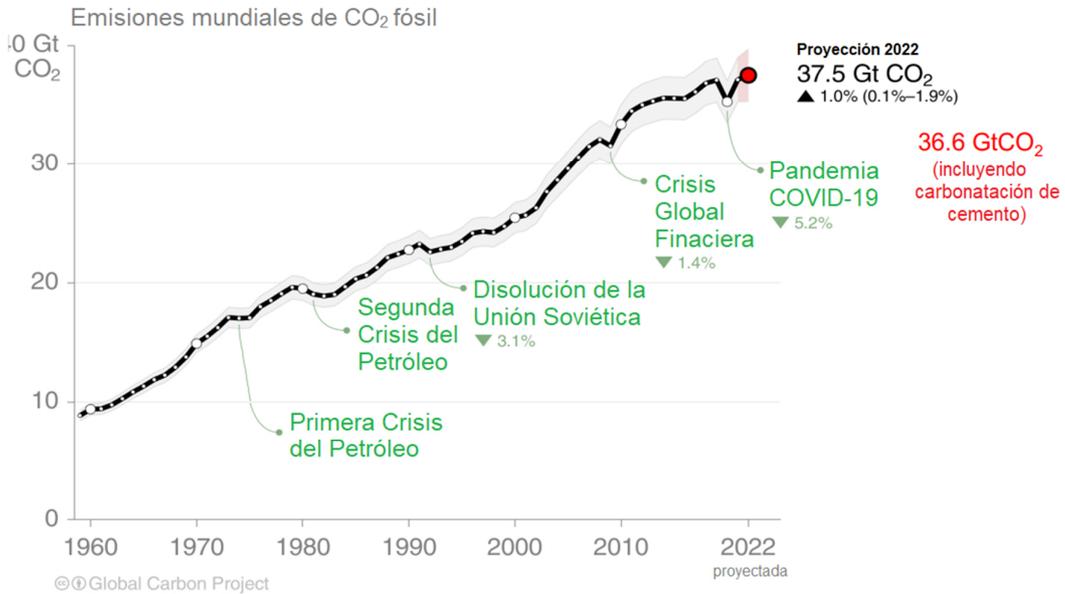
- https://oa.upm.es/34265/1/Vivienda_Popular_Espa%C3%B1a_Completo_Opt_Parte1.pdf.
- Turkle, Sherry. 2009. *Simulation and its discontents*. Bogart US: MIT - Massachusetts Institute of Technology. <https://archive.org/details/simulationitsdis0000unse/page/216/mode/2up>.
- UNEP. 2020. “2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Resumen ejecutivo”. Nairobi.
- . 2022. *Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2022: Hacia un sector de edificios y la construcción con cero emisiones, eficiente y resistente*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- UNEP, y IEA. 2017. “Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector”. *Global Status Report 2017*, 1–48.
- UNEP, y UN-Habitat. 2021. *Global Environment for Cities-GEO for Cities: Towards Green and Just Cities*. Nairobi: United Nations Environment Programme. <https://reliefweb.int/report/world/global-environment-cities-geo-cities-towards-green-and-just-cities>.
- Ureña Moreno, Juan E, Carlos Renato Chávez, y Vicente Parra León. 2019. “La estera andina como aislante para la rehabilitación energética de viviendas rurales en el páramo ecuatoriano.” *Ciencia Digital* 3 (3): 24–37. doi: 10.33262/cienciadigital.v3i3.2.713.
- US Department of Energy. 2014. “EnergyPlus | Department of Energy”. 4 de agosto de 2014. <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/energyplus>.
- . 2021. “EnergyPlus Essentials”. *EnergyPlus Version 9.5.0 Documentation*, 1–57. https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.5.0/EnergyPlusEssentials.pdf.
- Vallejo Carpio, Cristian. 2017. “Análisis de Intensidad Energética para los Sectores de Uso Final de la Economía Ecuatoriana”. *Cuestiones Económicas, Banco Central del Ecuador* 27 (2): 41–69.
- Vliet, Michelle T H van, David Wiberg, Sylvain Leduc, y Keywan Riahi. 2016. “Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources”. *Nature Climate Change*, 1–7. doi: 10.1038/NCLIMATE2903.
- Voss, Karsten, Mark Riley, Andreas Athienitis, Chiel Boonstra, Dru Crawley, Michael Donn, François Garde, Paul Torcellini, y Maria Wall. 2009. “IEA Joint Project:

- Towards Net Zero Energy Solar Buildings (NZEBs)". *IEA SHC Task 40 - IEA ECBCS Annex 52*, 1–15. https://task40.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/task40-Net_Zero_Energy_Solar_Buildings.pdf.
- Wang, Shengwei. 2010. "Introduction to intelligent buildings". En *Intelligent Buildings and Building Automation*, 1–9. Abingdon UK: Spon Press.
- Wells, Louise, Behzad Rismanchi, y Lu Aye. 2018. "A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context". *Energy and Buildings* 158: 616–28. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.055.
- Wieser, Martín, Sofía Rodríguez-Larraín, y Silvia Onnis. 2021. "Estrategias bioclimáticas para clima frío tropical de altura. Validación de prototipo de vivienda. Puno, Perú." *Estoa* 10: 9–19. doi: 10.18537/est.v010.n019.a01.
- Wight, James K, y James G MacGregor. 2016. "Chapter 1: Introduction". En *Reinforced concrete: Mechanics and Design*, 7ª ed., 21–31. Harlow UK: Pearson Education Limited.
- Won, Chung Yeon, SangTae No, y Qamar Alhadidi. 2019. "Factors Affecting Energy Performance of Large-Scale Office Buildings: Analysis of Benchmarking Data from New York City and Chicago". *Energies* 12 (4783): 1–17. doi: 10.3390/EN12244783.
- Wu, Chao, Bin Xu, ShanShan Shi, y Bin Zhao. 2015. "Time-activity pattern observatory from mobile web logs". *International Journal of Embedded Systems* 7 (1): 71–78. doi: 10.1504/IJES.2015.066144.
- Yoshino, Hiroshi, Tianzhen Hong, y Natasa Nord. 2017. "IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods". *Energy and Buildings* 152: 124–36. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.038.
- Yunus Khan, T. M., Manzoore Elahi M. Soudagar, Mithun Kanchan, Asif Afzal, Nagaraj R. Banapurmath, Naveed Akram, Suresh D. Mane, y Kiran Shahapurkar. 2019. "Optimum location and influence of tilt angle on performance of solar PV panels". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 141: 511–32. doi: 10.1007/S10973-019-09089-5.
- Zero Energy Project. 2023. "Zero Energy Homes: Comparable in Cost". *Elemental Green*. Accedido 23 de enero. <https://zeroenergyproject.com/sell/zero-homes-comparable-cost-standard-homes/>.

Anexos

Anexo 1: Histórico de emisiones de GEI a nivel mundial, periodo 1960-2022

Se prevé que las emisiones crezcan un 1 % [0,1 a 1,9 %] en 2022.
El aumento de la tasa se ha desacelerado del 3 % anual en la década de 2000 a alrededor del 0,5 % anual en la última década.



The 2022 projection is based on preliminary monthly data and modelling
When including cement carbonation, projected 2022 fossil emissions reach 36.6 GtCO₂
Source: [Friedlingstein et al 2022](#); [Global Carbon Project 2022](#)

Anexo 2: Emisiones de GEI en Quito - Año base 2015

Sector	Emisiones de GEI.	
	ton. Co2 eq.	%
Residencial - comercial	1.350.443,00	17,772%
Manufactura	635.118,00	8,358%
Energía industrial	2.622,00	0,035%
Agricultura, otras energías	123,00	0,002%
Emisiones fugitivas relacionadas con la energía	-	-
Transporte	3.004.276,00	39,536%
Residuos solidos	765.191,00	10,070%
Aguas residuales	-	-
Procesos industriales y uso de productos	-	-
Agricultura, silvicultura y uso de suelo	1.841.082,00	24,228%
Total	7.598.855,00	100,000%

Fuente: (Secretaria de Ambiente MDMQ 2015)

Elaboración propia

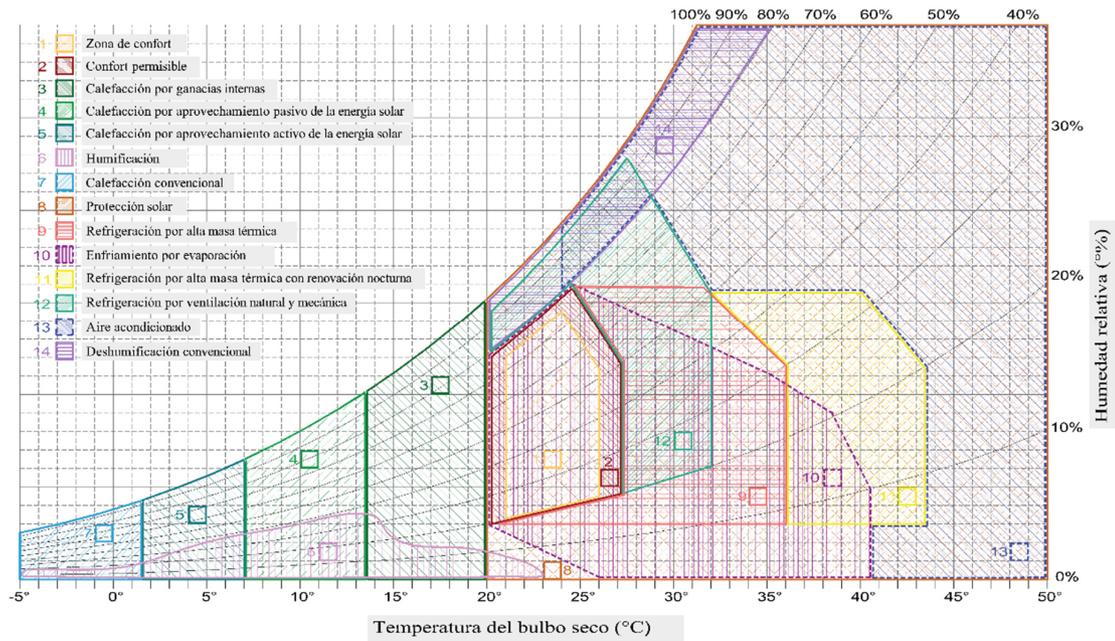
Anexo 3: Consideraciones del medio externo para la eficiencia energética pasiva

Parámetros climáticos	Temperatura	Permite definir los parámetros constructivos en el diseño. Por ejemplo, el uso de elementos de alta masa térmica en los edificios con clima de gran diferencia diurna de temperatura.	
	Humedad	Influye en la sensación térmica y condensación. En climas fríos con alta humedad hay mayor riesgo de condensación de la estructura del edificio.	
	Radiación solar	Permite aprovechar la energía solar en iluminación natural y calor, a la vez que se evita el sobrecalentamiento y deslumbramiento. El análisis de radiación solar en la cubierta del edificio permite una óptima ubicación para paneles solares.	
	Asoleamiento	Las cartas solares ayudan a conocer la trayectoria solar sobre el edificio, el asoleamiento permite elegir las mejores fachadas y aperturas de ventanas que beneficien al edificio energéticamente y evitar sus inclemencias.	
	Vientos predominantes	Brindan enfriamiento al edificio debido al rozamiento del viento en el edificio o mediante la ventilación natural a través de las ventanas, torres de viento, ventilación cruzada, orientación o muros operables. La morfología urbana y la volumetría del edificio se ve favorecida por el viento en zonas climáticas cálidas.	
	Nubosidad	Determina cuanta energía solar llega realmente al edificio. Muy útil para el diseño de energía solar fotovoltaica o térmica solar in situ.	
	Precipitaciones	Define el diseño de la envolvente superior (cubiertas, volados, cunbreros, losas planas y drenajes) e inferior (elevación del piso, muros) de los edificios, para proteger al edificio de la infiltración del agua lluvia al interior. Muy útil para aprovechar los recursos naturales como el agua lluvia o el enfriamiento por evaporación.	
Microclimas	Natural	Suelo	Permite estimar posibilidades de agua subterráneas o geotermia, instalación de bombas de calor doble fase, entre otros.
		Topografía	Influye en la cantidad de radiación que recibe el terreno, la temperatura, sombras adyacentes naturales, viento entre otros.
		Pendiente	Influye en la cantidad de radiación solar que recibe el edificio y en las sombras que se le proyectan en sí.
		Valles	Condicionan la iluminación y radiación solar, la dirección y velocidad de los vientos y el nivel de exposición que tendrá la construcción al viento y las precipitaciones.
		Agua	Cuerpos de agua como mares, lagos, ríos, inciden en la humedad relativa de sitio e incrementan su porcentaje real frente a la media estándar de la ciudad.
		Vegetación	Puede influir en los parámetros climáticos dependiendo de la escala en que esté presente puede crear sombra, disminuir el asoleamiento y la luminosidad de los edificios. aumenta la humedad por evapotranspiración, (modifica la temperatura del aire). La vegetación puede incluirse en el diseño de un edificio aprovechando sus ventajas y la gran variedad de especies existentes.
	Artificial	Núcleos urbanos	Producen modificaciones considerables en el clima circundante como islas de calor, cambio de la dirección del viento, zonas de turbulencia cerca de edificios muy altos, sombreado, inciden en la calidad del aire y agua, y la baja visibilidad.

Fuente: (van den Dobelsteen et al. 2019; Bobadilla et al. 2012; Palme et al. 2017).

Elaboración propia

Anexo 5: Carta psicrométrica de Baruch Givoni



Fuente: (Givoni 1998)

Imagen: Formato AutoCAD³⁹ cortesía de Silvia Pittman⁴⁰

³⁹ Ingrese a https://drive.google.com/file/d/1F8edY0RUPDm_HGYj-4hweqLc4dIXbOrc/view

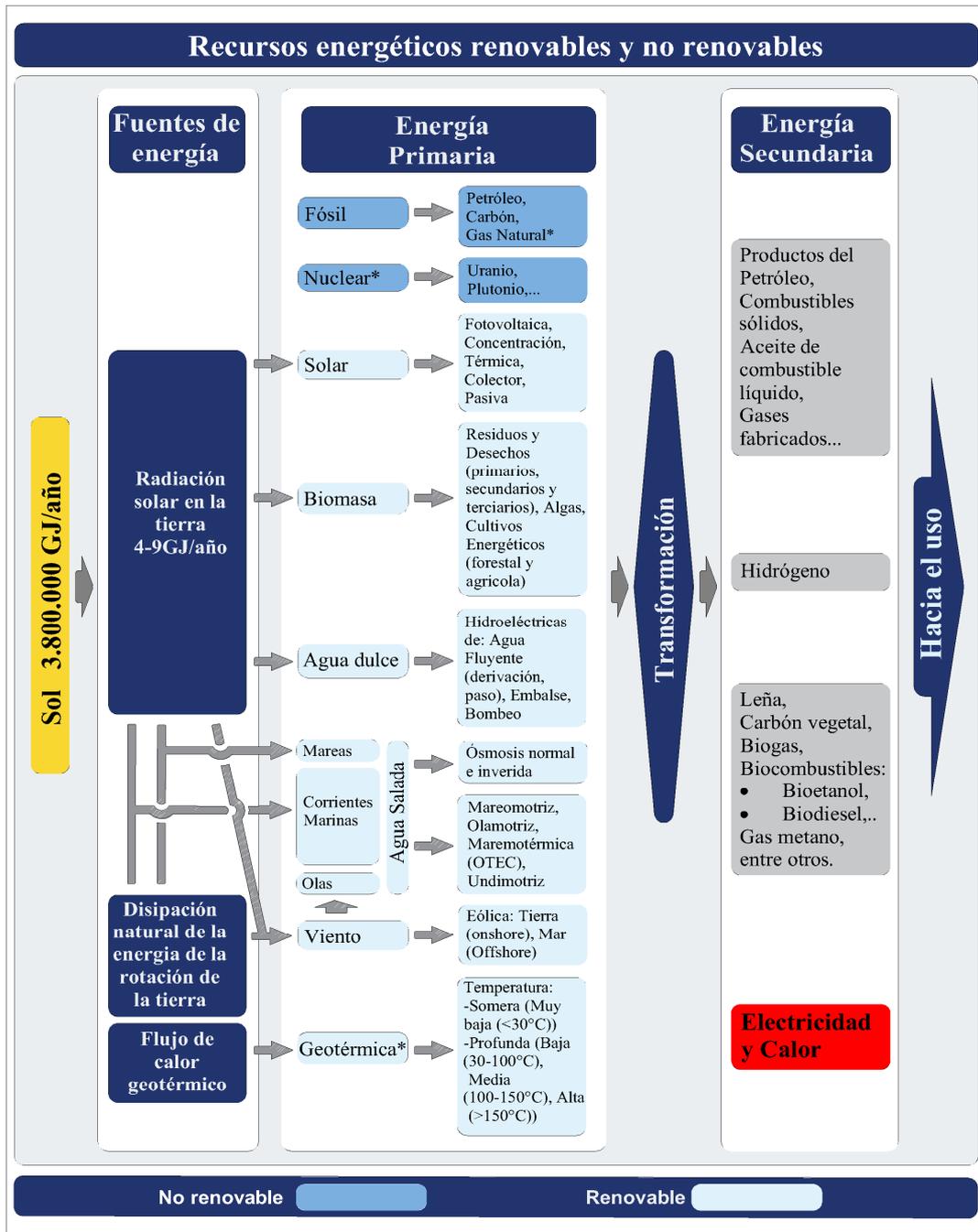
⁴⁰ Ingrese a <https://www.youtube.com/watch?v=MMIrI8YRX58>

Anexo 6: Hacia edificios climáticamente neutros de por vida

Carbono operativo cero netos		Carbono incorporado cero netos		
Definición	Un edificio con cero emisiones netas de carbono es altamente eficiente energéticamente con toda la energía restante de fuentes renovables en el sitio y/o fuera del sitio.		Un edificio de cero emisiones netas de carbono (nuevo o renovado) o un activo de infraestructura es altamente eficiente en el uso de los recursos con la reducción inicial de carbono en la mayor medida posible y todo el carbono incorporado restante reducido o, como último recurso, compensado para lograr cero emisiones netas a lo largo del ciclo de vida.	
	Principios rectores		Principios rectores	
	1. Medir y divulgar el carbono	El carbono es la medida definitiva para rastrear y los edificios deben lograr un balance operativo anual de cero emisiones netas de carbono basado en datos medidos.	1. Prevenir	Evitar el carbono incorporado desde el principio al considerar estrategias alternativas para cumplir la función deseada.
	2. Reducir la demanda de energía	Priorizar la eficiencia energética para garantizar un rendimiento lo más eficiente posible y no desperdiciar energía.	2. Reducir y optimizar	Evaluar cada opción de diseño en términos de reducciones de carbono iniciales y como parte de un enfoque de ciclo de vida completo.
	3. Generar equilibrio a partir de renovables	Abastecer la demanda restante a partir de fuentes de energía renovables, preferiblemente en el sitio, seguido de fuera del sitio, o de compensaciones.	3. Planifica el futuro	Tomar medidas para evitar el carbono incorporado en el futuro durante y al final de la vida útil.
	4. Mejorar la verificación y el rigor	Con el tiempo, se progresará para incluir el carbono incorporado y otras áreas de impacto, como cero aguas y cero desperdicios.	4. Compensación	Como último recurso, el proyecto o las emisiones de carbono compensan el límite organizacional incorporado residual cuando sea posible o si es necesario a través de esquemas de compensación verificados.

Fuente: (UNEP 2020)

Anexo 7: Recursos Energéticos Primarios, Tipos y su Conversión.



Fuente: (Blok y Nieuwlaar 2021; Gommans 2012)
 Elaboración propia

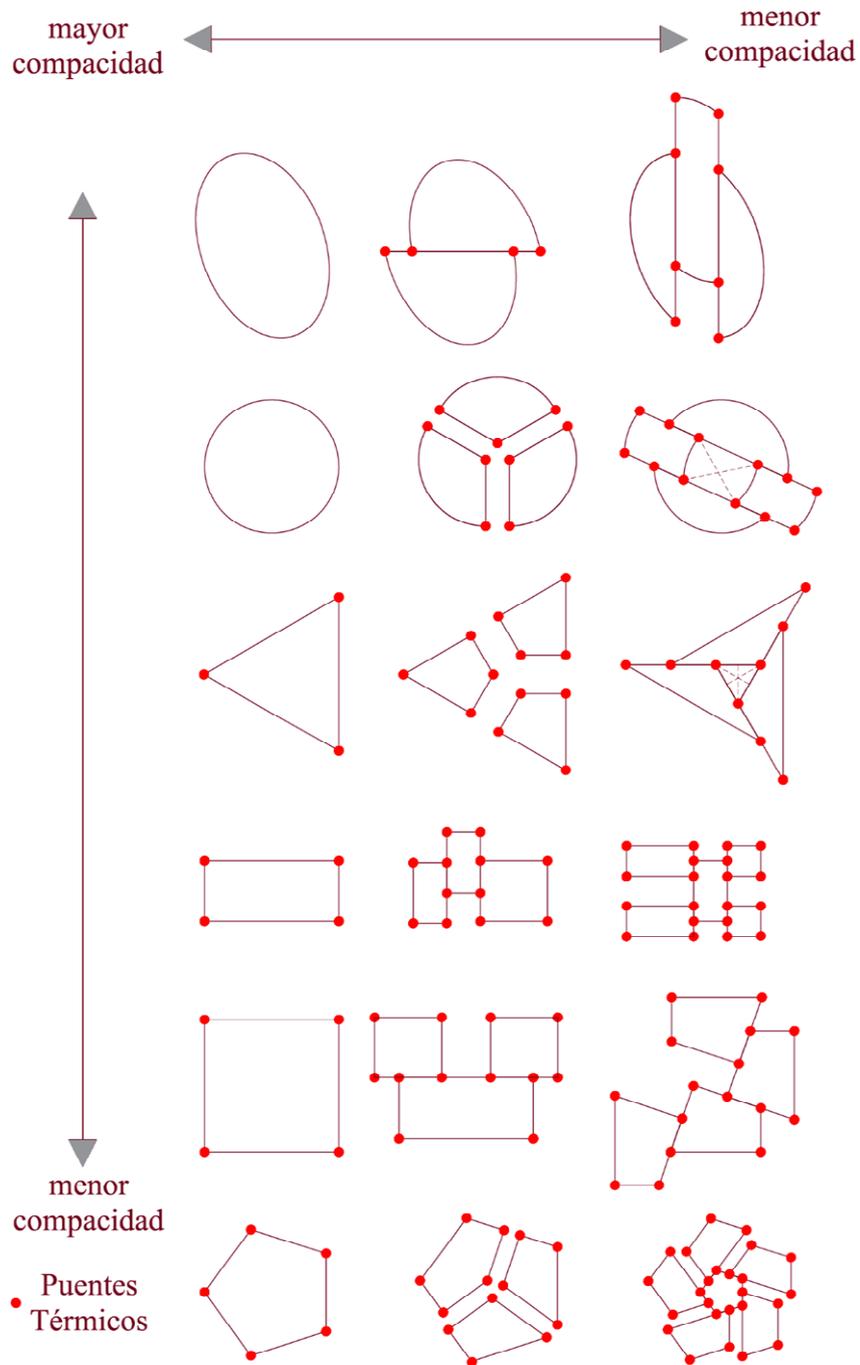
Anexo 8: Principios y requerimientos del Estándar Passive House

Envolvente	Aislamiento térmico	Todos los elementos opacos de la envolvente exterior del edificio deben estar muy bien aislados.	C	
		Pared y cubierta: (<i>U-Value</i>) de 0.15 W/m ² K o inferior (en climas fríos), es decir, admite un máximo de pérdida de 0.15 vatios por cada grado de diferencia de temperatura y por m ² de superficie exterior. Piso: 0.25kWh/m ² o inferior	M	
	Eliminar puentes térmicos	Todas las conexiones y juntas entre elementos y/o materiales generan puentes térmicos por donde el calor fluye del interior hacia el exterior, es necesario evitar se formen los puentes térmicos y/o reducir aquellos que no se puedan evitar.	C	
		Cambios temperatura observados mediante imagen termográfica	M	
	Estanqueidad del aire	Cerramiento del edificio hermético para reducir las infiltraciones incontroladas de aire exterior.	C	
		La medida de hermeticidad del estándar passive house es mediante una presurizada y despresurizada igual a 0.6 del volumen total de aire de la casa por hora durante un BDT a 50 pascales), control de humedad y calidad del aire	M	
	Ventanas de alta prestación térmica	Ventanas de calidad superior con muy baja transmitancia térmica (<i>U-Value</i>) Acristalamiento triple vidrio relleno de argón o criptón para evitar la transferencia de calor Marco de ventana hermético muy bien aislados	C	
		(<i>U-Value</i> 0.80 W/m ² K o inferior y valor de transmitancia solar total $g=50\%$)	M	
	Sistema de servicios	Ventilación doble flujo	Ventilación doble flujo con recuperación de calor por conducción	C
			(75% del calor del aire caliente se transfiere al aire fresco de impulsión mediante un intercambiador de calor) Promedio de renovación total de aire: dos horas	M
Confort térmico		En todas las áreas habitables y en todas las estaciones climáticas.	C	
	No más de 10% de inconfort por sobrecalentamiento	M		
Requisitos energéticos (año)	Calefacción	Menor o igual 15kWh/m ² de suelo habitable neto (suelo considerado como casa pasiva) o 10w/m ² de demanda máxima	M	
	Enfriamiento activo	10w/m ² con tolerancia para des humificación	M	
	aplicaciones domésticas	120 kWh/m ² del suelo reconocido tratado, casa pasiva clásica	M	
<i>M</i> es la forma de medición y <i>C</i> son las características				

Fuente: (Feist, Pfluger, y Hasper 2020; Stahl, Voss, y Goetzberger 1994; Gómez Melgar 2017; Schild y Willems M 2011)

Elaboración propia

Anexo 9: Esquema de geometría en plantas arquitectónicas con mayor y menor compacidad



A medida que la geometría base se fragmenta, aumenta el número de puentes térmicos

Fuente: (Schild y Willems M 2011, 179)
Elaboración Propia

