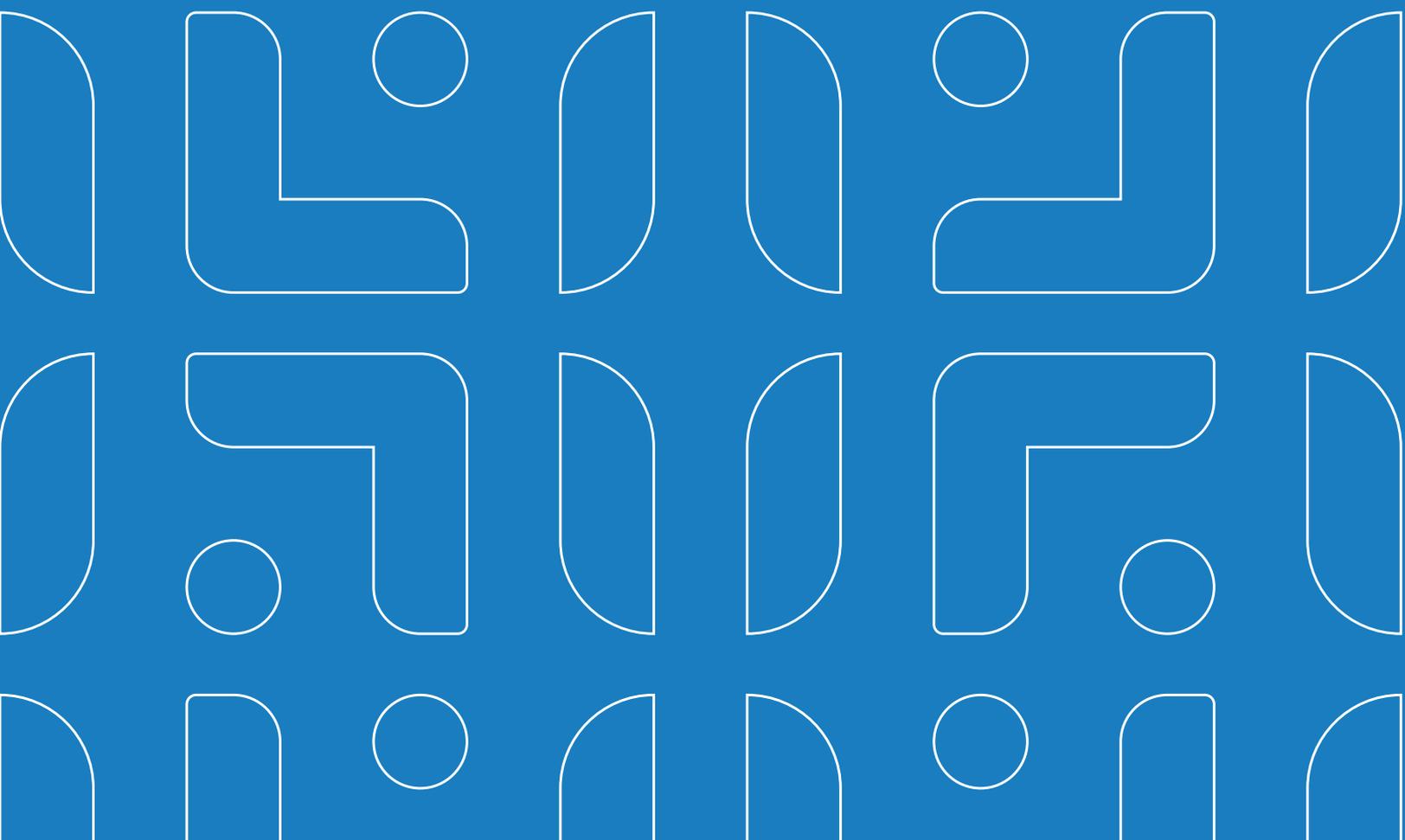


MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA



LCA comparativo en distintos escenarios del edificio NZEB El Salvador, estimación de CO₂ para el desempeño térmico

<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8522>

G. Morales¹, A. Palacios¹, S. Menjívar¹, L. Rodríguez², L. Martínez³, R. Ariza³, J. Ramos⁴

¹Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador

²Departamento de Organización del Espacio, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador

³Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador
⁴Departamento de Mecánica Estructural, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador

E-mail: lrodriguez@uca.edu.sv

Resumen – El reciente informe del IPCC 2023 reitera que los seres humanos son responsables del calentamiento global durante los últimos 200 años, provocando un aumento de la temperatura de 1,1 °C por encima de los niveles preindustriales, así como un aumento en la demanda energética, la cual puede evitarse con opciones de mitigación disminuyendo su uso en todos los sectores, especialmente en el de la edificación. Una de las opciones es el diseño bajo en concepto NZEB como ha sido el caso del laboratorio construido en el campus de la UCA, empleando estrategias de eficiencia energética pasivas y activas, estudiando la interacción entre los sistemas constructivos y el ahorro energético. Uno de los objetivos de investigación del proyecto NZEB El Salvador, era estudiar el desempeño térmico de distintos escenarios constructivos, por tanto, se presentan los resultados del análisis de ciclo de vida (ACV) de tres propuestas de sistemas constructivos populares en El Salvador, regulados por el marco normativo nacional, comparándolos con la línea base de su funcionamiento actual, a través de 3 herramientas de cálculo iterativas: Estructural, térmico y estimación de huella de carbono, logrando encontrar importantes hallazgos sobre cómo los sistemas vernáculos cumplen el estándar NZEB.

Palabras Clave – construcción, energía, estructura, huella de carbono

Abstract – The recent IPCC 2023 report reiterates that humans are responsible for global warming over the past 200 years, causing a rise temperature of 1.1°C above pre-industrial levels, as well as an increase in energy demand, which can be avoided with mitigation options, reducing its use in all sectors, especially in the building sector. One of the options is the design based on the NZEB concept, as it has been the case of the laboratory built on the UCA campus, using passive and active energy efficiency strategies, studying the interaction between construction systems and energy savings. One of the NZEB El Salvador project research objectives, was to study the thermal performance of different construction scenarios, therefore, the present work presents the results of the Life-cycle assessment (LCA) in three proposals for popular construction systems in El Salvador, regulated by the national regulatory framework, comparing them with the baseline of its current operation, through 3 iterative calculation tools: structural, thermal and carbon footprint estimation, managing to find important findings on how vernacular systems meet the NZEB standard.

Keywords – carbon footprint, construction, energy, structure

I. INTRODUCCIÓN

Con la creciente demanda energética y la implementación de marcos normativos internacionales que regulan y miden la eficiencia e impactos ambientales de este recurso, se ha generado mayor conciencia sobre el valor del recurso energético, incentivando la búsqueda de soluciones sostenibles que reduzcan las emisiones e impactos ambientales en el sector de la construcción. Esto ha sido posible gracias al desarrollo en los últimos años de investigaciones que permiten llevar a cabo proyectos sostenibles y más eficientes, siendo el caso del laboratorio construido en el campus de la UCA bajo el concepto NZEB [1]. Junto con la construcción del edificio se han desarrollado investigaciones que se han tomado como línea base para el desarrollo de este trabajo. Es gracias a estos esfuerzos realizados que se ha explorado la metodología y procesos interdisciplinarios que implican desarrollar un edificio NZEB en el trópico [2] así como estimar su huella de carbono y el análisis del ciclo de vida [3][4] [5].

Para llevar esto a cabo se utilizan herramientas de investigaciones previas que facilitan estimar el impacto directo de los materiales de la construcción en 2 parámetros: energía contenida y CO₂ equivalente incorporados en el ciclo de vida, estos valores son brindados por el inventario ICE [6], así como estándares de eficiencia energética que brinda la normativa americana a través de la ASHRAE 90.1 [7] con el fin de evaluar los sistemas constructivos más utilizados en El Salvador que son mampostería de concreto con refuerzo integral y mamposterías confinadas de arcilla y suelo cemento.

Es así como se comprobaron las cualidades, y capacidades de los sistemas vernáculos salvadoreños de optar por cumplir el estándar NZEB, definiendo los tratamientos que serán necesarios para cumplir dicho estándar, y la viabilidad de esta práctica.

II. METODOLOGÍA

Al abordar una nueva propuesta constructiva, implica un proceso iterativo de múltiples especialidades que sigue el siguiente proceso:

- I) Predimensionado Estructural
- II) Modelo Energético
- III) Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

En el proceso metodológico se consideró la línea base NZEB El Salvador como apertura a una nueva investigación con el planteamiento de una pregunta investigativa “¿qué sucedería si se aplica el concepto NZEB a los sistemas vernáculos de El Salvador? Para encontrar una respuesta a esta interrogante, se seleccionaron tres sistemas constructivos normados, modelados y puestos a prueba bajo tamiz de normativas nacionales e internacionales hasta llegar finalmente al análisis comparativo ACV (fig. 1). El proceso se describe a continuación:

A. Etapa I: predimensionado estructural

En la primera etapa se creó una herramienta de cálculo estructural para responder a los requerimientos sismorresistentes salvadoreños de la Norma Especial para el Diseño y Construcción de Viviendas [8], la Norma Técnica para el Diseño por Sismo [9], el Informe Técnico Suelo Cemento TAISHIN [10], cargas estimadas del Reglamento para la Seguridad Estructural de 1996 [11], y la Norma para el Diseño y Construcción Estructural de Mampostería [12], los siguientes tres sistemas constructivos de mampostería populares en El Salvador que se evaluaron fueron:

1. NZEB-LB: línea Base. Madera aserrada
2. NZEB-BH: bloque de concreto con refuerzo integral
3. NZEB-MLA: ladrillo de arcilla confinado
4. NZEB-MLC: ladrillo de suelo cemento confinado

En el desarrollo de la herramienta, se comprobaron los siguientes requerimientos:

- Esfuerzo sísmico reducido
- Esfuerzo sísmico largo
- Carga gravitacional axial
- Predimensionamiento de viga doblemente empotrada.

El procedimiento llevado a cabo se resume en los siguientes pasos:

1. Estimación o asignación de cargas a la edificación, que será la carga actuante a resistir.
2. Cálculo de la fuerza resistente gracias al aporte de paredes en los distintos ejes, primero en X y luego en Y, que será la fuerza resistente.
3. Aplicación de factores normativos tanto en carga actuante como fuerza resistente.
4. Comparación de esfuerzos asegurando que la fuerza resistente siempre sea mayor o igual a la carga actuante.
5. En el caso del predimensionado de la viga principal de carga, se estima el peralte con base en los aportes del área de las varillas de acero sometidas a un esfuerzo de flexión en rango elástico.

B. Etapa II: modelo energético

Para el desarrollo de este modelo se realizó en dos partes, la primera es el cálculo de la transmitancia de los diferentes componentes de la envolvente del edificio, considerando los nuevos sistemas constructivos planteados, partiendo de la línea base NZEB con el sistema actualmente construido de estructura de madera de 12 cm con aislamiento interno de poliuretano.

Se obtuvieron los valores de conductividades térmicas del Catálogo de elementos constructivos del CTE [13], así como el ASHRAE *handbook* 2013 capítulo 26 [14] asumiendo las resistencias en serie, debido a esto se emplean los espesores de materiales y sus conductividades térmicas para obtener el valor de transmitancia del conjunto de elementos que conforman la envolvente. Mientras que la segunda parte es un estudio comparativo de consumos energéticos, esto a través de simulaciones energéticas en el programa Design Builder de todos los sistemas constructivos, teniendo los valores de transmitancia como entrada de datos en el programa, se busca estar bajo el estándar máximo de transmitancia por elemento que brinda la normativa ASHRAE-90.1 [7].

C. Etapa III: análisis de ciclo de vida

Para llevar a cabo este análisis se ha hecho uso de un modelo de cálculo y metodología con la base de datos abierta ICE de la Universidad de Bath, Reino Unido [6], teniendo un enfoque *cradle-to-gate*. En esta etapa se desglosa el volumen de obra del edificio que está compuesto de 9 sistemas para cada una de las 3 alternativas constructivas planteadas, seleccionando el factor ICE (Carbon and Energy Inventory), una vez completado el desglose, se analizaron los resultados de carbono incorporado en las etapas del ciclo de vida, así como pesos por sistema constructivo y las respectivas comparaciones entre las alternativas.

El análisis de ciclo de vida se consideró bajo el enfoque *cradle-to-cradle*, tomando en cuenta factores de circularidad desarrollados por el Marco Europeo de sostenibilidad Level(s).

Las etapas de ciclo de vida analizadas según la Norma ISO 14044 fueron:

- A1-A3 materiales (impactos incorporados EC)
- A4-A5 construcción
- B1 operatividad
- B2-B5 mantenimiento
- C1-C3 fin de vida
- D (B1) operatividad evitada
- D (C1-C3) EC evitado

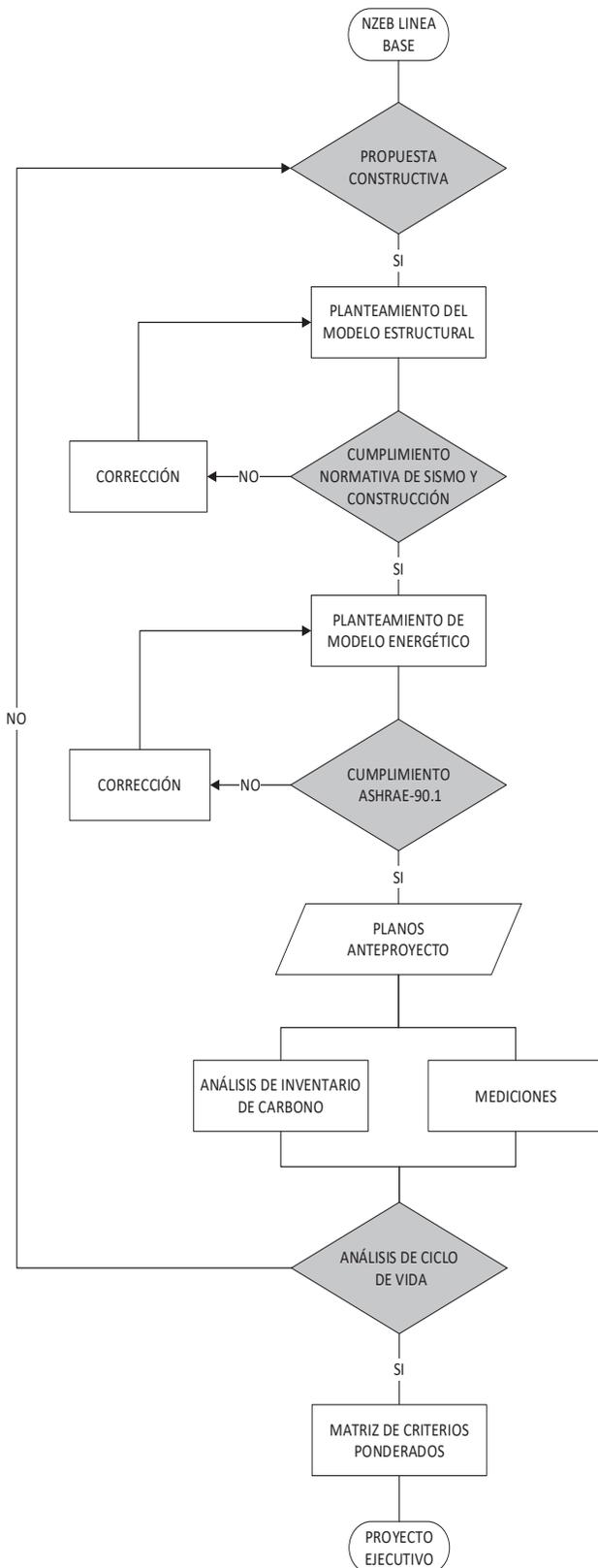


Fig. 1 Esquema metodológico

III. RESULTADOS

A. Cálculo de predimensionado estructural

El primer sistema fue el de bloque de concreto con refuerzo integral en las celdas, dando como resultado de los cálculos, una separación máxima de 60 cm entre llenos, cumpliendo las relaciones de esfuerzos para el sistema (fig. 2).

Carga sísmica en el eje X:
 Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 $20307.56 \text{ Kgf} \leq 23092.78 \text{ Kgf}$

Carga sísmica en el eje Y:
 Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 $20307.56 \text{ Kgf} \leq 25527.49 \text{ Kgf}$

Resistencia axial en pared crítica:
 Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 $6.04 \text{ kgf/cm}^2 \leq 10.8 \text{ kgf/cm}^2$

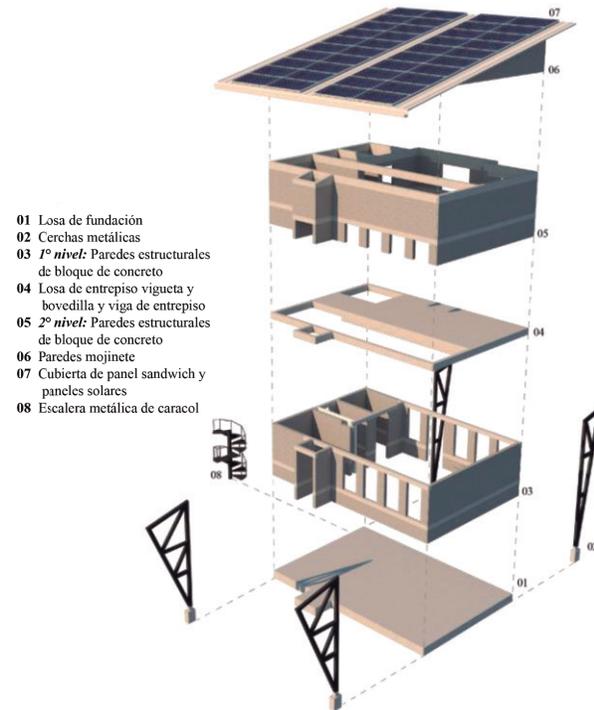


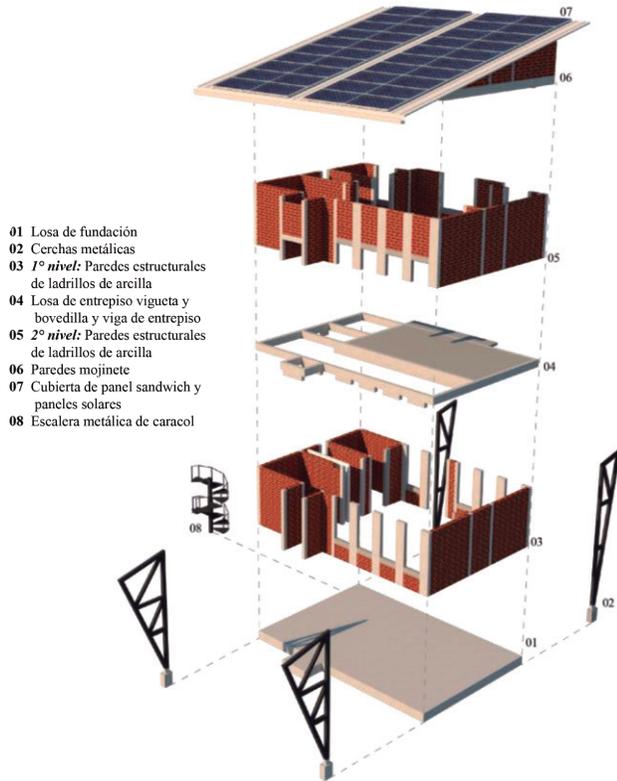
Fig. 2 Axonométrico de sistema constructivo de bloque de concreto

El segundo sistema es de ladrillo de arcilla confinado entre marcos estructurales de concreto reforzado, cumpliendo los requerimientos normativos considerando las propiedades del ladrillo de arcilla. (fig. 3)

Carga sísmica en el eje X:
 Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 $19218.06 \text{ Kgf} \leq 20814.09 \text{ Kgf}$

Carga sísmica en el eje Y:

Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 19218.06 Kgf \leq 22887.28 Kgf
 Resistencia axial en pared crítica:
 Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 4.56 kgf/cm² \leq 4.8 kgf/cm²



- 01 Losa de fundación
- 02 Cerdas metálicas
- 03 1º nivel: Paredes estructurales de ladrillos de arcilla
- 04 Losa de entrepiso vigueta y bovedilla y viga de entrepiso
- 05 2º nivel: Paredes estructurales de ladrillos de arcilla
- 06 Paredes mojinete
- 07 Cubierta de panel sandwich y paneles solares
- 08 Escalera metálica de caracol

Fig. 3 Axonométrico de sistema constructivo confinado de ladrillo de arcilla

El tercer sistema es una variación del segundo, siendo ladrillo de suelo cemento confinado entre marcos estructurales de concreto reforzado, diferenciándose por propiedades de resistencia y peso diferentes debido a la densidad de los ladrillos. (fig. 4)

Carga sísmica en el eje X:
 Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 19926.23 Kgf \leq 20814.09 Kgf

Carga sísmica en el eje Y:
 Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 19926.23 Kgf \leq 22887.28 Kgf

Resistencia axial en pared crítica:
 Fuerza actuante \leq Fuerza resistente
 4.58 kgf/cm² \leq 4.8 kgf/cm²

- 01 Losa de fundación
- 02 Cerdas metálicas
- 03 1º nivel: Paredes estructurales de ladrillo de suelo cemento
- 04 Losa de entrepiso vigueta y bovedilla y viga de entrepiso
- 05 2º nivel: Paredes estructurales de ladrillo de suelo cemento
- 06 Paredes mojinete
- 07 Cubierta de panel sandwich y paneles solares
- 08 Escalera metálica de caracol

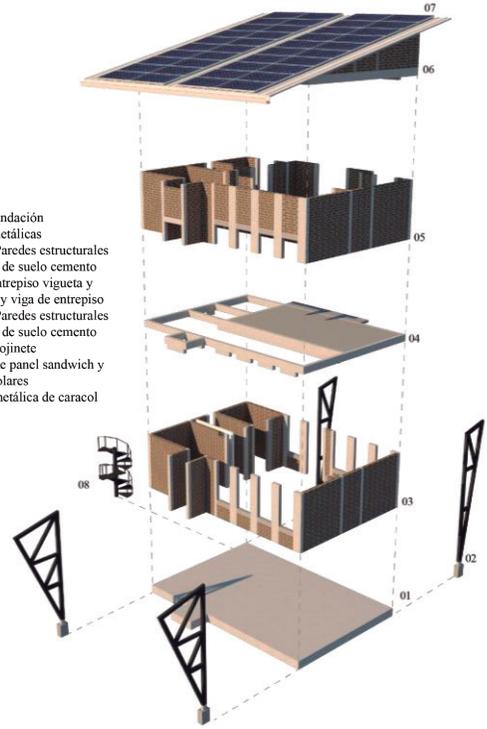


Fig. 4 Axonométrico de sistema constructivo confinado de ladrillo de suelo cemento.

B. Cálculo de modelo energético

Se dan a conocer los resultados de los cálculos realizados de los distintos componentes de la envolvente, donde solo las paredes estructurales son el elemento que varía en los distintos sistemas constructivos, el cual se puede corroborar que no se cumple el estándar energético por sí mismos, es por ello que se plantearon alternativas con diferentes aislantes hasta cumplir el estándar de la normativa ASHRAE 90.1 [7], siendo las propuestas de aislamiento más eficientes, las de lana mineral, y fibra de vidrio.

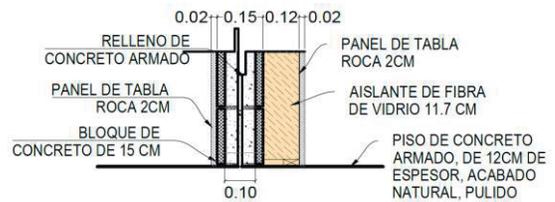


Fig. 5 Detalle de aislante fibra de vidrio en hormigón

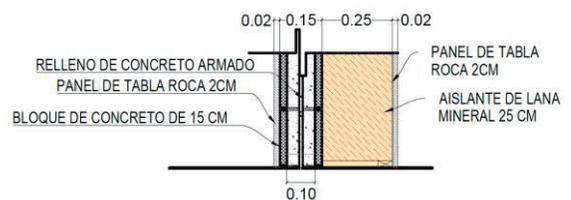


Fig. 6 Detalle de aislante lana mineral en hormigón

Se puede observar en la figs. 5 y 6 una sección tipo de los diferentes aislantes, donde se obtuvo un mejor resultado en todos los sistemas con espesores de 11.7 cm para fibra de vidrio y 25 cm para lana mineral. Bajo esta metodología se hicieron los mismos análisis para los sistemas constructivos de arcilla y suelo cemento. La tabla 1 es un resumen de la herramienta con los espesores de aislantes, conductividades, y los datos que se obtuvieron mediante el simulador Design Builder de los consumos energéticos al año (kW.h/m²) en cada sistema, así como la consecuente comparación al aumentar los consumos respecto a la línea base en valor absoluto y porcentual. Se puede observar que todos los sistemas constructivos con aislante de fibra de vidrio son los que dan un resultado de menor consumo energético al año, combinado con el menor espesor de aislante necesario, a pesar de esto, no se alcanza la misma eficiencia energética de la línea base demostrada en trabajos anteriores [2].

Tabla 1. Tabla resumen de comparación energética por sistema de envolventes

Familia	Nomenclatura	Espesor del aislante (cm)	Conductividad aislante k(m2.K)/W	Consumo (kW.h)/m ² al año	Aumento de consumo respecto a línea base (%)
NZEB-LB	1-NZEB-LB	0,12	0,04	287,65	0
NZEB-BH	3-NZEB-BH-01	25	0,04	298,77	3,87%
	4-NZEB-BH-02	11,7	0,04	298,76	3,86%
	5,2	0,04	298,75	3,86%	
NZEB-MLA	7-NZEB-MLA			299,54	4,13%
	8-NZEB-MLA-01	25	0,04	298,77	3,87%
	9-NZEB-MLA-02	11,7	0,12	298,76	3,86%
NZEB-MLC	10-NZEB-MLC		0,04	300,13	4,34%
	11-NZEB-MLC-01	25	0,04	298,77	3,87%
	12-NZEB-MLC-01	11,7	0,12	298,76	3,86%

C. Cálculo de huella de carbono

Se presentan a continuación los resultados del cálculo del impacto EC (Embodied Carbon) que es CO₂e equivalente para los nueve componentes que conforman los sistemas constructivos del edificio de la línea base de NZEB El Salvador y las 3 alternativas estudiadas. (fig. 7). Los resultados han sido graficados considerando el aislamiento de lana mineral en las 3 alternativas.

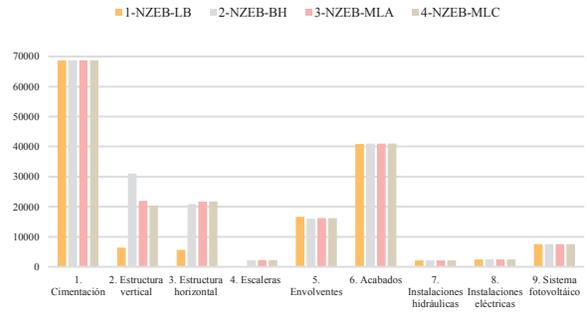


Fig. 7 Carbono incorporado (kg CO₂e) de la línea base y las 3 versiones con aislante de lana mineral

Puede observarse en la fig. 8 que la versión 2-NZB-BH que corresponde a la modulación con bloques de concreto es el edificio con mayor carbono incorporado, esto es debido a que este sistema constructivo incorpora mayor concreto al tener llenos de celdas en ambos ejes a cada 60 cm.

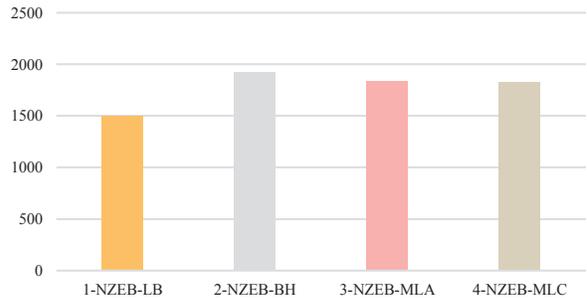


Fig. 8 Total de carbono incorporado en la línea base y las 3 versiones del edificio (kgCO₂e/m²) con aislante de lana mineral

En la fig. 9 se observa como la etapa A1-A3 del ACV [15] que corresponde a la etapa de producto en el ciclo de vida del edificio es la que tiene mayor carbono incorporado.

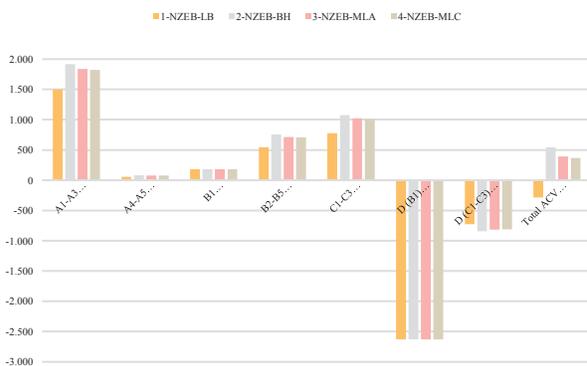


Fig. 9 Huella de carbono (kgCO₂e/m²) de las etapas de ciclo de vida de la línea base y las 3 versiones del edificio

IV. DISCUSIÓN

Al comparar la fig. 7 y la fig. 10 se observa que el impacto de carbono incorporado no es directamente proporcional al peso del edificio.

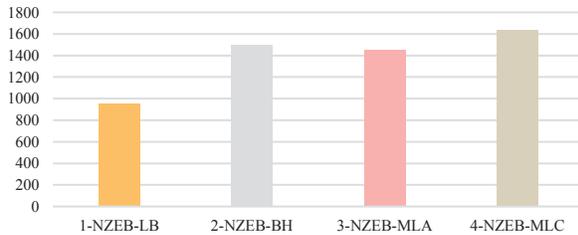


Fig. 10 Peso total de la línea base y las 3 versiones del edificio con lana mineral (kg/m²)

Por otra parte, al hacer un análisis comparativo entre la selección de aislante de lana mineral con un espesor de 25 cm y la fibra de vidrio con un espesor de 11.7 cm, considerando sus factores ICE (fig. 11) y (fig. 12) se puede observar que el edificio con aislante de fibra de vidrio, tiene un porcentaje de impacto mayor, a pesar de tener un espesor menor, que el porcentaje obtenido con el aislante de lana mineral que tiene un espesor del doble aproximadamente según tabla 2.

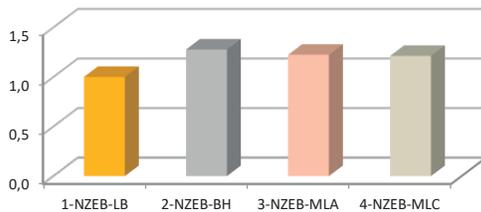


Fig. 11 Relación proporcional de carbono incorporado entre la línea base y las propuestas con aislante lana mineral

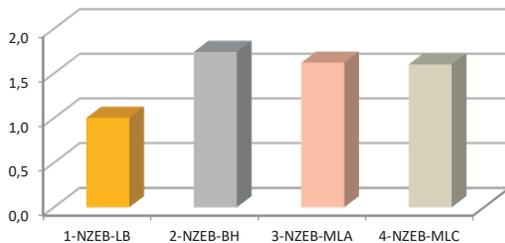


Fig. 12. Relación proporcional de carbono incorporado entre la línea base y las propuestas con aislante de fibra de vidrio

Tabla 2. Relación proporcional de carbono incorporado entre la línea base y las propuestas con aislante de lana mineral, y las propuestas con aislante de fibra de vidrio

Edificio /Etapas	A1-A3	A1-A3
	proporción lana mineral (propuesta/línea base)	proporción fibra de vidrio (propuesta/línea base)
1-NZEB-LB	1.00	1.00
2-NZEB-BH	1.27	1.74
3-NZEB-MLA	1.22	1.62
4-NZEB-MLC	1.20	1.60

V. CONCLUSIONES

A pesar de que la radiación solar en el trópico favorece la generación energética, la eficiencia energética se ve comprometida debido dada la ganancia de calor interna con los sistemas constructivos estudiados como propuesta, por lo tanto se ha demostrado que al cumplir la normativa estructural, por sí solos los sistemas estructurales de mampostería no permiten desempeños térmicos que aseguren el estándar NZEB, por lo que es necesario considerar aislamiento térmico que a la vez, tienden a aumentar el carbono incorporado del edificio.

Los resultados muestran tabla 2 que el valor del carbono incorporado aumenta entre 20 % y 27 % al utilizar aislante de lana mineral, mientras que al utilizar el aislante de fibra de vidrio tabla 3, a pesar de tener un espesor menor de 11.7 cm vs 25 cm en lana mineral, hay un aumento del 75 % de carbono incorporado respecto a la línea base, lo que demuestra el impacto del aislante de fibra de vidrio y como no siempre los menores espesores y por ende menor peso, implica menor carbono incorporado.

Según la relación proporcional de carbono incorporado entre las propuestas tablas 2 y 3, no hay mucha variación en los resultados, pero con relación a la línea base, las propuestas contemplan un aumento considerable, se infiere por tanto que en la fabricación de los materiales de los sistemas de mampostería hay más energía de transformación de materias primas, por ende. Este hecho plantea la importancia de evaluar el impacto de carbono que genera la industria de la construcción en la fabricación de sus materiales y la posible búsqueda de alternativas o procesos más sostenibles.

El modelo de predimensionado de vigas de concreto que consideró el área de acero, los momentos de flexión, las cargas vivas y muertas, así como el módulo de elasticidad del acero y concreto, reflejan un valor muy cercano al que se obtiene de la simplificación L/12 para vigas de concreto reforzado, por lo que se pudo comprobar que es una aproximación funcional.

Para el análisis de ciclo de vida, se asumió para las propuestas, la misma cimentación y el mismo tipo de acabado en paredes y cubierta, de línea base, pero cabe destacar que en el caso del componente de la estructura vertical, es decir los muros de mampostería, se obtuvo el tercer valor más alto, debido a que los sistemas constructivos propuestos son de muros portantes, demostrando el aumento de impacto que

genera la mampostería en comparación al sistema de madera de la línea base del edificio NZEB, al no ser sistemas prefabricados, que generan mayor desperdicio y que tienen bajo factor de circularidad al final de su ciclo de vida.

REFERENCIAS

- [1] Marszal AJ, Heiselberg P, Bourrelle JS, Musall E, Voss K, Sartori I, et al. Zero energy building—A review of definitions and calculation methodologies. *Energy Build.* 2011; 43: 971-979.
- [2] L. A. Martínez, L. Rodríguez, C. M. Flores, C. A. Cisneros, M. W. Chávez, I. A. Lemus and R. I. Ariza, "On Net Zero Energy Building Design Methodology: A Case Study Examining Learning as Measured by Interdisciplinary Knowledge Acquisition," *Advances in Environmental and Engineering Research*, vol. 4, (1), pp. 1-36, Jan 03, 2023. DOI: 10.21926/aeer.2301001.
- [3] L. Rodríguez, L. Martínez, R. Panameño, O. París, A. Muros, R. Rodríguez, R. Javier and C. González, "LCA of the NZEB El Salvador building, a model to estimate the carbon footprint in a tropical country," *Journal of Cleaner Production*, vol. 408, Jul 01, 2023. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137137>. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137137.
- [4] C. K. Chau, T. M. Leung and W. Y. Ng, "A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings," *Applied Energy*, vol. 143, pp. 395-413, Apr 01, 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.023.
- [5] C. C. Chang, W. Shi, P. Mehta and J. Dauwels, "Life cycle energy assessment of university buildings in tropical climate," *Journal of Cleaner Production*, vol. 239, pp. 117930, Dec 01, 2019. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117930>. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117930.
- [6] G. P. Hammond and C. I. Jones, "Embodied energy and carbon in construction materials," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Energy*, vol. 161, (2), pp. 87-98, May 01, 2008. Available: <https://search.proquest.com/docview/35455268>. DOI: 10.1680/ener.2008.161.2.87.
- [7] Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings I-P Edition. (2013). ANSI, ASHRAE and IES Standard 90.1-2013.
- [8] Norma Especial Para Diseño Y Construcción De Viviendas. San Salvador (1997). Ministerio de Obras Públicas.
- [9] Norma Técnica Para Diseño Por Sismo Y Sus Comentarios. El Salvador (1997). Ministerio de Obras Públicas.
- [10] Mejoramiento de la Tecnología para la Construcción y Difusión de la Vivienda Popular Sismo-Resistente Mampostería de Suelo Cemento Confinada. (Mayo 2013). Available: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14606145/informe-tecnico-suelo-cemento-taishin>.
- [11] Reglamento Para La Seguridad Estructural (1996). Ministerio de Obras Públicas.
- [12] Norma Técnica Para El Diseño Y Construcción Estructural De Mampostería. El Salvador (1994). Ministerio de Obras Públicas.
- [13] Catálogo De Elementos Constructivos Del CTE. (Mar 10). Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción, CEPCO and AICIA.
- [14] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., (ASHRAE), "Heat, air, and moisture control in building assemblies - material properties," in 2021 ASHRAE® Handbook - Fundamentals, I-P Edition ed. Anonymous American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 2021, pp. 1 Available: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpASHRAEZ2/id:kt012MG6N2/ashrae-handbook_fundamentals/ashrae-han-heat-air-moisture?kpromoter==Summon.
- [15] Esquema de Ciclo de Vida- Norma española UNE-EN 15878 (Pág. 22).