

Análisis de Ciclo de Vida del Edificio NZEB El Salvador, Modelo Base para Calcular Huella de Carbono

Carlos González, Rafael Javier, Raquel Rodríguez, Lizeth Rodríguez
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas

00002815@uca.edu.sv, 00007914@uca.edu.sv, 00010815@uca.edu.sv,
lrrodriguez@uca.edu.sv

Asesoría: Luis Martínez, Arturo Cisneros, Ronald Panameño, Oriol París

Abstract – El análisis de ciclo de vida es un proceso objetivo que busca evaluar las cargas ambientales asociadas con los productos, procesos o actividades, en este caso con aquellos impactos generados por todo el ciclo de vida de un edificio, desde la extracción de materias primas, la fabricación de materiales y la construcción de éste, hasta su etapa operativa y su disposición final, de esta forma, funciona como una retroalimentación al proceso de diseño y construcción de edificios y determina una mejor elección de materiales y sistemas constructivos.

El presente artículo resume los hallazgos encontrados al implementar un análisis de ciclo de vida, ACV, en un edificio de cero energía neta ubicado en El Salvador, dentro del campus de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, con el fin de determinar los impactos de carbono y energéticos que éste genera, haciendo énfasis en sus sistemas constructivos, materiales y sus etapas a lo largo del ciclo de vida, mediante dos metodologías de ACV, una de simulación con el software SimaPro, con enfoque de la cuna a la tumba (cradle-to-grave), y otra con una tabla interactiva y compuesta para el cálculo de los impactos incorporados del edificio, con enfoque de la cuna a la puerta (cradle-to-gate).

Palabras claves – Análisis de ciclo de vida en edificios, edificios cero energía neta, impactos energéticos de edificios, huella de carbono de edificios, simulación de ciclo de vida.

I. INTRODUCCION

Curran (2008), conforme a la norma ISO 14040 establece que, el análisis del ciclo de vida tiene visión holística de las interacciones ambientales que cubre una gama de actividades, desde la extracción de materias primas y la producción y distribución de energía, hasta el uso, la reutilización y la disposición final de un producto y que es una herramienta relativa destinada a la comparación y no a la evaluación absoluta, lo que ayuda a los responsables de la toma de decisiones a comparar los principales impactos ambientales al elegir entre alternativas.

A. Etapas del ciclo de vida de un edificio

El ciclo de vida de un edificio está compuesto por cuatro etapas, la producción, la construcción, la etapa operativa, y la disposición final.

La etapa de producción inicia con la extracción de materias primas, el transporte de éstas hacia centros de producción, seguido de la fabricación de materiales de construcción o, siendo el caso, la reutilización de materiales de construcción previamente fabricados.

La etapa de construcción abarca desde la distribución de los materiales al sitio y la realización de todo el ensamblaje del edificio.

La etapa operativa consta todo el periodo desde la finalización de la construcción hasta el final de la vida útil. En esta etapa se incluyen todos los servicios y mantenimientos necesarios durante la vida útil del edificio.

La etapa de la disposición final, inicia posteriormente a terminar la vida útil del edificio. Son creados escenarios de disposición final, donde luego del desensamble o demolición del edificio se puede optar por la reutilización, reciclaje o depósito de los desechos en vertederos (Figura 1).

B. Fases del Análisis de Ciclo de Vida

Según Muralikrishna & Manickam (2017) un estudio de análisis del ciclo de vida consta de cuatro fases: el objetivo y alcance, el análisis de inventario, el análisis de impactos y la interpretación (Figura 1).

El objetivo y alcance, se establece el propósito de la evaluación y se toman decisiones sobre los detalles del sistema del producto que se está estudiando (Curran, 2016) son aspectos muy importantes de la metodología ACV porque es donde se determina el enfoque exacto a seguir, en esta etapa se abarca el establecimiento de la unidad funcional, los límites del sistema de estudios, la especificidad del proceso o de los datos, la selección de indicadores de impactos y los factores de caracterización. Tanto el objetivo como el alcance pueden ser retroalimentados en cualquier fase del ACV mientras se recopilan datos y se revela nueva información.

El análisis de inventario se define, según la norma ISO 14041,

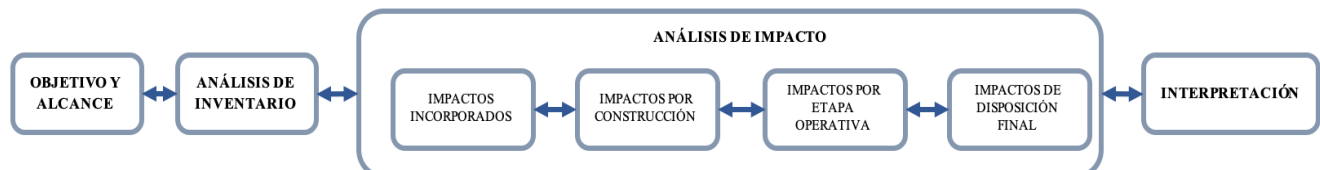


Figura 1. Etapas de la metodología de ciclo de vida. Elaboración propia basada en Chau et al, (2015).

como la fase que involucra la compilación y cuantificación de entradas y salidas para un producto a lo largo de su ciclo de vida. Los datos deben estar relacionados con la unidad funcional definida durante el objetivo y alcance.

En el análisis de impacto se tiene como objetivo comprender y evaluar la magnitud y la importancia de los posibles impactos ambientales del sistema estudiado. Para la caracterización, en función de los objetivos que se definen inicialmente, se seleccionan las categorías de impacto ambiental. La caracterización tiene como objetivo cuantificar los posibles impactos relacionados con cada categoría seleccionada debido a los flujos identificados en el sistema del productos (Capaz & Seabra, 2016).

Finalmente, la interpretación del ciclo de vida es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, verificar y evaluar la información de los resultados del análisis de inventario y la evaluación de impactos. Esta fase es un conjunto de conclusiones y recomendaciones para el estudio.

C. Tipos de análisis de ciclo de vida en edificios

Existen diferentes tipos de análisis que son una forma simplificada del ACV, con un enfoque específico según sea el objetivo de la investigación, dos variantes de estos enfoques son: el análisis de ciclo de vida energético (Life Cycle Energy Assessment, LCEA) y el análisis de ciclo de vida huella de carbono (Life Cycle Carbon Emission Assessment, LCCO₂A).

- 1) *Análisis de ciclo de vida energético*: es un análisis que no analiza todos los insumos del ciclo de vida, sino que se enfoca en la aportación de recursos energéticos en cada una de las fases del ciclo de vida.
- 2) *Análisis de ciclo de vida huella de carbono*: en un análisis enfocado solamente en la emisión de CO₂ equivalente, que se genera en cada una de sus fases, para lograr determinar la cantidad de emisiones de un edificio a lo largo de su ciclo de vida.

D. Edificios Cero Energía Neta y el NZEB El Salvador

Un edificio cero energía neta (net zero energy building, NZEB) es una edificación altamente eficiente, energéticamente diseñada bajo procesos de simulación, que integra energía renovable, para que el consumo energético anual de la edificación sea inferior o igual a la generación anual de energía en el sitio (Marínez et al, 2019).

El proyecto de investigación “Edificio de Cero Energía Neta en El Salvador”, tiene el objetivo de comprobar la capacidad de un edificio de generar la energía que éste debe consumir para su funcionamiento, teniendo un balance igual a cero anualmente. El edificio denominado Laboratorio NZEB El Salvador, el primero en Centroamérica, que cuenta con un área de aproximadamente 100 m² y un vehículo eléctrico alimentado de energía generada por el edificio, requirió un diseño participativo e interdisciplinario, una construcción con materiales que, según simulaciones energéticas realizadas en la etapa de diseño, responden a necesidades de eficiencia energética, una instrumentación y medición del edificio y sus consumos de forma diaria (Martínez & Rodríguez, 2019). El proceso integrativo e interdisciplinar consta de tres fases:

- 1) *Proceso de verificación*: toma en cuenta los requerimientos del propietario, que alberga el estudio del sitio, el planteamiento de un anteproyecto de diseño que genera un modelo base, que luego se ve retroalimentado por las bases del diseño, que cuenta con normativas tanto internacionales o nacionales.
- 2) *Proceso iterativo de optimización*: inicia con el proceso de simulación energética, seguido de la simulación de iluminación y de flujo de aire, para este proceso de simulación, en el caso del edificio NZEB El Salvador se realizaron numerosas iteraciones para lograr llegar a un modelo de carga optimizado que da paso al cálculo del potencial de energía renovable.
- 3) *Documentos contractuales*: donde se incluyen planos constructivos, especificaciones técnicas, programación de obras, presupuesto y permisos de construcción que abren paso a la construcción de la edificación que posteriormente, durante la etapa operativa del edificio, se realizarán mediciones energéticas para controlar y estudiar los consumos y generaciones que el edificio produce.

Una parte fundamental para la realización del análisis del ciclo de vida de este edificio son las mediciones energéticas realizadas durante todo el año 2019, ya que, permite conocer cuál es el consumo que este edificio realmente tiene y la cantidad de energía que genera, es así, como permite una mayor exactitud con los resultados provenientes del análisis del ciclo de vida ya que no se está haciendo uso de datos hipotéticos de simulación, sino, de datos del edificio en un año de uso.

E. Bases para el Análisis de Ciclo de Vida del edificio NZEB El Salvador

TABLA I
SISTEMAS CONSTRUCTIVOS Y GRUPOS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Grupos de sistemas constructivos (para metodología de simulación)		Sistemas constructivos (para metodología de cálculo)	
FUN	Fundaciones	FUN	Fundaciones
PPN	Paredes primer nivel	PPN	Paredes primer nivel
ENT- GRA	Entrepiso y gradas	ENT	Entrepiso
		GRA	Gradas
PSN	Paredes segundo nivel	PSN	Paredes segundo nivel
TECH	Estructura de techo, cubierta y cerchas	CER	Cerchas
		EST- TEC	Estructura de techo
		CUB	Cubierta
IN-HID	Instalaciones hidráulicas	IN-HID	Instalaciones hidráulicas
		AAS	Aparatos y accesorios sanitarios
IN-ELE	Instalaciones eléctricas	IN-ELE	Instalaciones eléctricas
IN- MEC	Instalaciones mecánicas	IN-MEC	Instalaciones mecánicas
ACAB	Acabados en piso y paredes	AC-PI	Acabados en pisos
		AC-PA	Acabados en paredes
PUE- VEN	Puertas y ventanas	PUE	Puertas
		VEN	Ventanas
FOTV	Paneles fotovoltaicos	FOTV	Paneles fotovoltaicos

1) Sistemas constructivos del edificio NZEB El Salvador

Teniendo en consideración la complejidad del edificio NZEB El Salvador se dividió en sistemas constructivos (Tabla I), basados en los conjuntos de elementos que conforman una unidad con un objetivo constructivo, ya sea estructural, cerramiento, o como aislamiento térmico. Siendo éstos, dieciséis: fundaciones, paredes de primer nivel, entepiso, gradas, paredes de segundo nivel, cerchas, estructura de techo, cubierta, instalaciones hidráulicas, instalaciones eléctricas, instalaciones mecánicas, acabados en pisos, acabados en paredes, puertas, ventanas y finalmente, los aparatos y accesorios sanitarios.

2) Consideraciones para la etapa operativa

Dentro de la etapa operativa, se tomarán en cuenta dos elementos específicos: el mantenimiento, tanto el tratamiento de maderas expuestas como el retoque de pintura paredes, y el consumo y generación energética anual. La vida útil del edificio se ha asumido de 50 años para realizar los cálculos necesarios para sus mantenimientos, establecidos cada 4 años, y consumo y generación de energía.

Dentro de los mantenimientos se incluyen aquellos para maderas expuestas, donde se utilizan tratamientos de bajo VOC contra xilófagos, sellante e impermeabilizante, tinte y barniz, y el retoque de pintura de paredes interiores y exteriores.

Para el consumo y generación energética del edificio se retoman datos de mediciones realizados por alumnos egresados de ingeniería (Figura 2), donde se muestran los datos de marzo a diciembre del 2019, el dato de enero y febrero 2019 está promediado entre los datos de marzo, abril y mayo, ya que este período de tiempo fue de calibración de instrumentos. Igualmente, se asume que la energía consumida en el edificio durante todo el año es totalmente generada por los paneles solares, la cual es significativamente mayor que la energía consumida por el edificio, esta energía residual es inyectada a la red de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, lo cual, como resultado, sostiene una disminución de la utilización de la energía de la red de suministro externa.

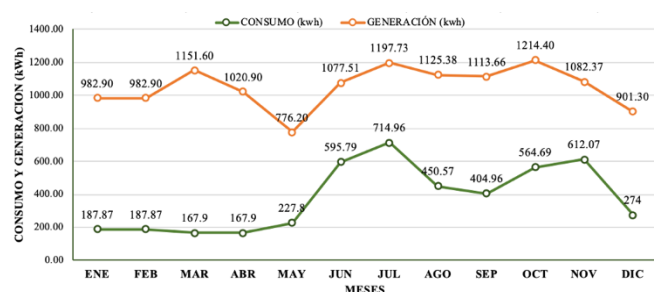


Figura 2. Gráfica de consumos energéticos (kW.h) en un año. Elaboración propia basada en Hernández et al, (2019) y Funes et al, (2019).

El consumo anual del edificio NZEB, según las mediciones realizadas en el 2019, es de 4,556.37 kW.h, mientras que la generada es de 12,626.85 kW.h, si se asume la vida útil del edificio de 50 años, el total de energía consumida sería de 227,818.67 kW.h y energía generada sería de 631,342.50 kW.h, que es casi 3 veces la energía consumida.

3) Posibles escenarios de disposición final

Finalizada la vida útil del edificio, se plantean alternativas para el manejo y tratamiento de los componentes, estas alternativas dependerán de las condiciones técnicas y ambientales del contexto, así como de las características y especificaciones de los elementos a tratar, pudiendo tener entre las alternativas, la deposición en un relleno sanitario de los componentes residuales, la reutilización de los elementos manteniendo su valor constructivo o útil, sin ser subutilizados, elementos de madera tratada convertidos en leña o madera para encofrados; o el reciclaje de objetos mediante algún proceso que involucra una transformación que invierte energía extra, por ejemplo el fundido de los componentes metálicos para su transformación en elementos nuevos; estas alternativas siendo efectivas luego de un proceso de demolición o desmontaje del edificio.

En el escenario #1, se toma un proceso de desensamble en la cual no es prioridad la integridad de sus partes o la separación de sus materiales, ya que todos los residuos del edificio resultantes de este proceso, son trasladados al relleno sanitario para llevar a cabo los procesos necesarios para su desecho.

En el escenario #2, se toma en cuenta la posibilidad del edificio a someterse a un proceso de desmontaje con la estrategia de incrementar la posibilidad de recuperación de sus sistemas constructivos y materiales, y que pueda optimizarse el proceso de reciclado y/o reutilización de los residuos, siendo posible debido a las tecnologías de prefabricación constructiva en el edificio.

Teniendo esto en cuenta, se generó un análisis sobre la posibilidad de reciclaje o reúso que un material posee basado en estudios (Asam, 2007 e ITeC, 2020), con esto, se calcula el porcentaje total del edificio que se podría reciclar (47%), reusar (23%) o desechar con destino final un relleno sanitario (30%).

II. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El análisis de ciclo de vida en esta investigación se lleva a cabo por medio de dos metodologías con distinto alcance e inventario, la primera de éstas se denomina metodología de cálculo, la cual posee un enfoque cradle-to-gate, centrado en los materiales utilizados para la construcción del edificio y el impacto incorporado que su utilización aporta, la segunda metodología, denominada de simulación, tiene un enfoque cradle-to-grave, que cambia el enfoque de los materiales para centrarse en identificar las etapas de ciclo de vida que generan más impacto, mediante ambas metodologías se analiza con especial énfasis; el impacto en la huella de carbono e impacto energético del edificio.

A. Metodología de Cálculo para el ACV

El objetivo del análisis del ciclo de vida por método de cálculo es conocer los impactos energéticos y de carbono equivalente generados por los materiales de construcción y el proceso constructivo, incluyendo los residuos de materiales y el transporte de éstos al sitio, por medio de una metodología que hace uso de una herramienta de cálculo que consiste en una tabla interactiva que da como resultado los impactos y la distribución por materiales y sistemas constructivos. El alcance de análisis del ciclo de vida por metodología de cálculo se basa en la visión cradle-to-gate, es decir, cuna a la puerta, tomando en cuenta desde la extracción de materias primas y fabricación de materiales hasta el momento de la construcción y la entrega de la obra completa.

Los elementos que se tienen en consideración dentro del análisis de inventario son aquellas entradas que permitan generar el análisis de ciclo de vida entre ellas: las dimensiones, cantidades, densidades y masas de los materiales, la base de datos, que en el caso se empleó el Inventario de Carbono y Energía (ICE) de la Universidad de Bath, Reino Unido, y finalmente las distancias entre el sitio de construcción y los proveedores de materiales.

Debe considerarse que dentro del edificio NZEB El Salvador existen distintos sistemas constructivos, que tienen como tecnología constructiva base, la madera, que pueden compararse con otras tecnologías constructivas, por lo tanto, existe la posibilidad de generar unidades funcionales que permitan la comparación de estos sistemas constructivos (Tabla II).

Para calcular estos impactos se tomó como base el plan de oferta que es la base presupuestaria y parte de los documentos contractuales. La tabla está organizada por sistemas constructivos que a su vez, están desglosados en elementos y materiales constructivos que los conforman, en ella se encuentran las dimensiones, es decir, longitudes, áreas y volumen que en conjunto con la densidad se calcula la masa de los materiales que se multiplica por el factor ICE y de esta forma se encuentra el impacto tanto energético como de carbono.

La siguiente parte de la tabla, se clasifican por materiales, para conocer los totales de impactos por materiales de cada sistema constructivo.

TABLA II
UNIDADES FUNCIONALES PARA ACV CON METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Sistemas constructivos (para metodología de cálculo)		Unidades Funcionales	
FUN	Fundaciones	m ³	m ³ de fundaciones
PPN	Paredes primer nivel	m ²	m ² de paredes en nivel uno
ENT	Entrepiso	m ²	m ² de entrepiso
GRA	Gradas	m ²	m ² de huella de gradas
PSN	Paredes segundo nivel	m ²	m ² de paredes en nivel dos
CER	Cerchas	m ²	m ² de cercha estructural
EST-TEC	Estructura de techo	m	m de estructura de techo primaria
CUB	Cubierta	m ²	m ² de cubierta de techo
IN-HID	Instalaciones hidráulicas	m	Longitud de tubería hidráulicas
IN-ELE	Instalaciones eléctricas	m	Longitud de tubería eléctricas
IN-MEC	Instalaciones mecánicas	TR	Toneladas de refrigeración
AC-PI	Acabados en pisos	m ²	m ² de revestimiento de piso
AC-PA	Acabados en paredes	m ²	m ² de acabado en paredes
PUE	Puertas	m ²	m ² de puertas
VEN	Ventanas	m ²	m ² de ventanas
AAS	Aparatos y accesorios sanitarios	U	Unidad sanitaria

B. Metodología de simulación para el ACV

El objetivo del análisis del ciclo de vida por método de simulación es conocer los impactos energéticos y de carbono equivalente generados durante todo el ciclo de vida del edificio, desde la extracción de materias primas, fabricación y construcción hasta la etapa operativa y la disposición final, por medio del uso de

un software especializado para la simulación del ciclo de vida, teniendo en cuenta la energía empleada tanto en la construcción como en la etapa operativa, los transportes y los distintos materiales que componen sistemas constructivos, además de los escenarios posibles de disposición final, todo esto con el fin de conocer la etapa que genera mayor impacto durante el ciclo de vida del edificio asumiendo una vida útil de 50 años, donde se considerarán mantenimientos y consumo energético de esta etapa.

El alcance de análisis del ciclo de vida por metodología de simulación se basa en la visión cradle-to-grave, es decir, puerta a tumba, teniendo en cuenta los impactos desde la extracción de materias primas, fabricación de materiales, construcción, etapa operativa y disposición final, sin embargo, para la disposición final se simuló dos escenarios, solamente en el escenario 2 la “tumba” puede ser considerada “cuna”, ya que se incluye reciclaje y reúso.

Para el análisis de inventario se tienen en consideración la masa de materiales, materiales compuestos, formados por uno, dos o más materiales simples, muestras de materiales, que facilitan el ingreso en el software de simulación, transporte hacia el sitio, energía empleada durante la construcción, la matriz energética local, fichas técnicas del proceso de construcción de los sistemas constructivos, que son la base de esta metodología ya que sistematizan y resumen toda la información necesaria para generar la simulación, se necesitan también las mediciones energéticas, los escenarios de desensamble y de disposición final, además, dentro del software, fue necesario seleccionar una base de datos, la empleada es la Ecoinvent 3.

En el caso de la unidad funcional para toda una edificación al tener un conjunto complejo de materialidades y sistemas constructivos con distintas características, las cuales se deben tener en cuenta al momento de generar una comparación válida y justificada, no es posible que ésta sea por peso, puesto que es un único parámetro objetivo de análisis, debido a las múltiples prestaciones y características de los sistemas que componen un edificio.

Así mismo, la transmitancia no es un parámetro de análisis objetivo que se trata de un sólo plano perpendicular sino de un volumen compuesto por planos. Por lo tanto, en el análisis de ciclo de vida del edificio NZEB El Salvador se ha considerado como unidad funcional a la superficie en m² de construcción que contempla el edificio.

En el caso del edificio NZEB El Salvador, cuenta con 100m² y los impactos ambientales que se considerarán son los de calentamiento global, con el factor de caracterización del potencial de calentamiento global en unidades de kg CO₂e y toneladas CO₂e (kilogramos de dióxido de carbono equivalente y toneladas de dióxido de carbono equivalente) y el consumo de recursos energéticos, con el factor de caracterización de cantidad de energía consumida con las unidades de MJ y GJ (Megajoules y Gigajoules).

Para realizar la simulación del ciclo de vida del edificio NZEB El Salvador, se utilizó la versión académica del software SimaPro, que se especializa en modelar ciclos de vida para productos y ejecutar análisis de los ciclos de vida para determinar su impacto ambiental, así por medio del análisis determinar cuáles son los materiales o etapas del ciclo de vida que más aumentan el impacto ambiental.

III. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

A. Resultados del ACV con Metodología de Cálculo

De los impactos incorporados de los materiales, cabe destacar que la extracción de materias primas y la producción de poliuretano, aluminio, madera, tratamientos para madera y acero estructural, representan más de un 70% del impacto energético del edificio (Figura 3), sin embargo, al hacer la comparativa con la masa que estos materiales tienen dentro del edificio se muestra que el poliuretano (1.86% de la masa total), el aluminio (1.13% de la masa total), los tratamientos para madera (1.31% de la masa total) y el acero estructural (3.60% de la masa total) conforman menos del 8% de la masa total de la edificación con una relación de 76.18 GJ por tonelada, 10.2 veces mayor al impacto por tonelada de la madera, que conforma más del 20% de la masa total y posee una relación, impacto sobre masa, de 7.48 GJ por tonelada.

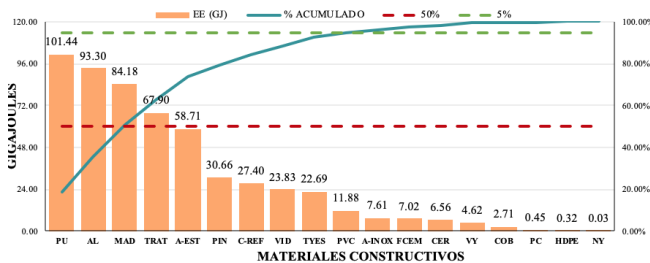


Figura 3. Gráfica de Impactos energéticos de materiales. Elaboración propia.

En cuanto al impacto de carbono, la extracción de materias primas y la producción de madera, aluminio, acero estructural, poliuretano y concreto reforzado, representan más de un 70% de este (Figura 4), sin embargo, al hacer la comparativa con la masa que estos materiales tienen dentro del edificio se muestra que el acero estructural (3.60% de la masa total), el poliuretano (1.86% de la masa total) y el aluminio (1.13% de la masa total), conforman menos del 7% de la masa total de la edificación, teniendo una relación de impacto por tonelada, de 4.14 toneladas de CO₂, siendo 29.50 veces mayor al del concreto reforzado, el cual representa más del 55% de la masa total y posee un impacto de 0.14 toneladas de CO₂ por tonelada de masa; En el caso de la madera, que posee una masa de más del 20% del total del edificio y un impacto de 0.59 toneladas de CO₂ por tonelada de masa, resultando 4.21 veces mayor al impacto por tonelada del concreto.

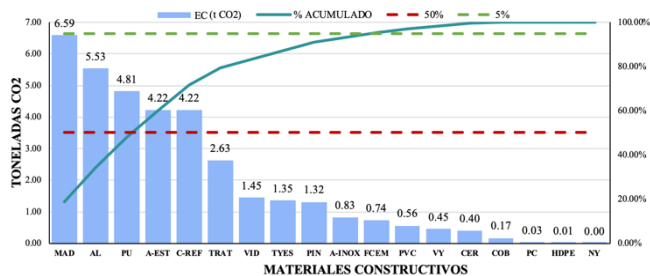


Figura 4. Gráfica de Impactos de carbono de materiales. Elaboración propia.

Al realizar un análisis de la comparación del impacto energético y de carbono equivalente por la masa de los materiales incluidos en

el edificio, se observa que el impacto no es directamente proporcional a la masa del material, donde materiales como el concreto reforzado, con una masa equivalente a más del 55% de la masa total, solo genera un 4.90% del impacto energético y un 11.69 % del impacto de carbono equivalente, mostrando que un material con peso significativo no llega a generar la mayor parte de los impactos, mientras que materiales como el poliuretano representa un 1.86% de la masa total y genera un 18.12% del impacto energético y un 13.33% del carbono equivalente, siendo un porcentaje de impacto hasta 9 veces mayor que el porcentaje de la masa, de igual forma hay materiales cuyo impacto es proporcional a su masa, como el caso de la cerámica, tablayeso y el fibrocemento

Por otro lado, Haciendo una comparativa entre el factor ICE (Inventario de Carbono y Energía) y el impacto de los materiales empleados en el edificio, es posible observar que la relación entre estos dos elementos, al igual que la relación entre masa e impacto, no es directamente proporcional, pues materiales como el nylon que posee el segundo factor ICE más grande entre todos los materiales empleados solamente representa un 0.01% de impacto, tanto energético como de carbono equivalente, y materiales como la madera que posee el tercero de los factores ICE más pequeños entre los materiales empleados, genera un impacto que equivale al 15.04% del impacto energético y 18.27% del impacto de carbono equivalente.

Teniendo en cuenta las unidades funcionales de la metodología de cálculo, se establecen los resultados según éstas en la Tabla III.

TABLA III
RESULTADOS SEGÚN UNIDADES FUNCIONALES PARA ACV CON
METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Sistemas constructivos (para metodología de cálculo)	UF	Impactos kgCO ₂ e	Impactos MJ	
FUN	Fundaciones	m ³	353.70	2,323.23
PPN	Paredes primer nivel	m ²	38.80	676.37
ENT	Entrepiso	m ²	108.71	1,563.68
GRA	Gradas	m ²	41.23	706.88
PSN	Paredes segundo nivel	m ²	35.72	640.86
CER	Cerchas	m ²	97.40	1,603.45
EST-TEC	Estructura de techo	m	18.67	317.39
CUB	Cubierta	m ²	35.67	681.95
IN-HID	Instalaciones hidráulicas	m	2.88	59.56
IN-ELE	Instalaciones eléctricas	m	2.26	41.97
IN-MEC	Instalaciones mecánicas	TR	158.68	1,597.84
AC-PI	Acabados en pisos	m ²	14.16	145.78
AC-PA	Acabados en paredes	m ²	1.92	39.87
PUE	Puertas	m ²	93.37	1,557.07
VEN	Ventanas	m ²	140.80	2,358.94
AAS	Aparatos y accesorios sanitarios	U	91.08	1,523.75

B. Resultados del ACV con Metodología de Simulación

Haciendo énfasis en los impactos de carbono equivalente de las etapas del ciclo de vida, considerando ambos escenarios de disposición final, la etapa que genera mayor impacto es la etapa de extracción y fabricación de los materiales constructivos, destaca también la etapa operativa al generar créditos, que permiten reducir el impacto total del edificio, la diferencia entre los escenarios

radica en la disposición final, donde dependiendo del destino de los residuos, el impacto que puede llegar a generar esta etapa, se traduce en un aumento de más del 125% del impacto generado en las etapas anteriores (impactos incorporados, por construcción y etapa operativa) o una generación de créditos que permiten reducir poco más del 4% del impacto de las etapas anterior (Figura 5).

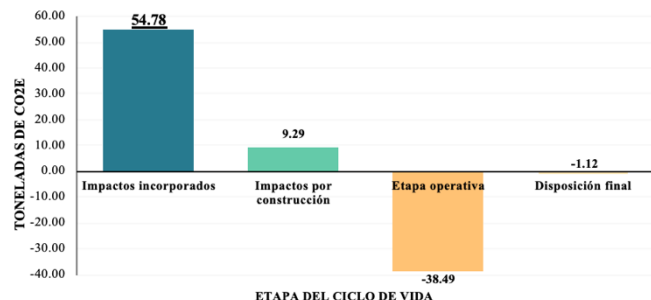


Figura 5. Gráfica de Impactos de carbono equivalente del ciclo de vida, escenario de disposición final 2. Elaboración propia.

Mientras en los impactos energéticos de las etapas del ciclo de vida, considerando ambos escenarios de disposición final, las tendencias se mantienen igual que en el impacto de carbono equivalente, donde el impacto es generado mayormente por los impactos incorporados de los materiales, y la etapa operativa genera créditos que permiten reducir el impacto total, nuevamente la diferencia de los escenarios se observa en la disposición final, donde en este aspecto el escenario de disposición final 1 llega a aumentar poco más de un 4% el impacto generado por las etapas anteriores, mientras el escenario de disposición final 2 contribuye a reducir 145% del impacto que se genera en las etapas anteriores, por la tanto este segundo escenario llega a compensar todo el impacto generado en las etapas anteriores (Figura 6). Gracias a las características deconstructivas con madera.

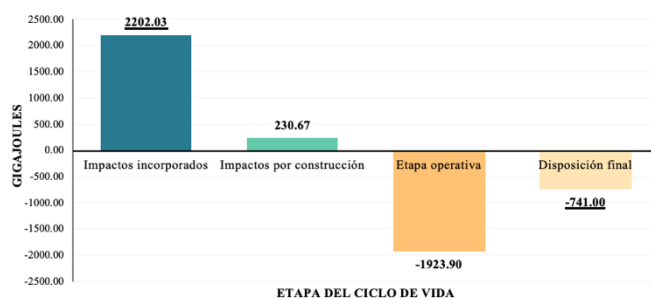


Figura 6. Gráfica de Impactos energéticos del ciclo de vida, escenario de disposición final 2 (GJ). Elaboración propia.

Se tiene como resultado del método de simulación que los impactos incorporados de carbono equivalente del edificio son 54.78 toneladas de CO₂ equivalente, este impacto es equiparable al que genera la producción de 2,148 bolsas de cemento de 42.5 kg, pues según datos de LaFarge Holcim Foundation (2018) que indican que en 2018 en la producción de una tonelada de cemento ocasionaban un impacto de 0.60 toneladas de CO₂ equivalente.

En cuanto a los impactos de carbono equivalente generados, por todo el ciclo de vida del edificio NZEB, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, en este caso tomando como referencia el escenario más desfavorable por generar mayor

impacto, con un resultado de 58.48 toneladas de CO₂ equivalente, lo cual es comparable al impacto que se generaría si se recorrieran 3 veces, ida y vuelta, los 48,000 Km de la carretera Panamericana desde Valparaíso, en Chile, hasta Fairbanks, en Alaska, Estados Unidos.

Teniendo en cuenta la unidad funcional, que para la metodología de simulación son los m² de construcción del edificio, se establecen los resultados tanto energéticos como de carbono en la Tabla IV.

TABLA IV
RESULTADOS SEGÚN UNIDADES FUNCIONALES PARA ACV CON
METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Resultados	UF	Impactos kgCO ₂ e	Impactos MJ
Con escenario de disposición final 1	m ² de construcción	548.80	5,290.20
Con escenario de disposición final 2	m ² de construcción	244.60	-2,322.00

IV. CONCLUSIONES

Las conclusiones están basadas en los resultados encontrados en ambas metodologías, tanto por cálculo como por simulación.

Se demuestra que el material que genera mayor impacto energético es el poliuretano, a pesar de poseer una masa equivalente sólo al 1.86% de la masa total, este material es utilizado como aislante térmico en todo el envolvente del edificio y resulta necesario para la eficiencia energética, se ve afectado por poseer uno de los 5 mayores factores de impacto energético, razón de que posea un impacto tan elevado, sin embargo gracias a este material es posible una reducción en el impacto que genera el uso de los sistemas de climatización.

Por otro lado, el uso del material dentro de la edificación o su función dentro de un sistema constructivo, puede justificar el impacto que llegue a generar en el edificio, siendo el caso de algunos materiales y componentes especializados como los paneles fotovoltaicos que presenta uno de los mayores impactos en carbono, sin embargo, contribuye por su generación energética a compensar el impacto total del ciclo de vida de la edificación.

Se debe mencionar que la madera, que fue empleada como material principal para la estructura del edificio, representa el mayor impacto de carbono equivalente, con un 11.24% de la masa total de la edificación, y un factor de impacto de carbono equivalente (ICE) que se encuentra entre los 3 menores de los materiales en general y no se ha considerado el impacto evitado por secuestro de dióxido de carbono, el impacto claramente crece por ser uno de los materiales principales y estar presente en casi la totalidad del edificio, ya que es estructura portante y componente principal de envolvente (fachada). Por otro lado, además de contribuir con el mayor impacto de carbono equivalente, la madera como material, debe ser tratada y mantenida en el proceso de construcción y a lo largo de la vida útil de la edificación, es en este aspecto donde su impacto llega a hacerse 4 veces mayor en carbono equivalente y casi 7 veces mayor en impacto energético.

Cabe destacar que en base a la relación del impacto vs. la masa de los materiales, e impacto vs. el factor ICE del material, se demuestra que tanto la masa como el factor por sí solos no son un indicador del impacto posible que pueda llegar a causar un material, es solo cuando el factor y la masa de los materiales

presente en el diseño se conjuga que se puede determinar el impacto real de cada material empleado.

Es necesario hacer énfasis que sólo desglosando el impacto de la edificación en cada uno de sus sistemas constructivos es posible contrastar el impacto que esta genera, con el impacto de una edificación que posea diferentes tecnologías constructivas, es por esto, que es más acertado la selección de la unidad funcional acorde con sistemas constructivos, más que para la edificación en su totalidad.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que los impactos incorporados, es decir, la etapa de extracción de materias primas y producción de los materiales, generan los mayores impactos, tanto energéticos como de carbono equivalente a lo largo del ciclo de vida del edificio, la selección de los materiales se vuelve una parte crucial para lograr reducir o evitar impactos dentro de una edificación teniendo en cuenta no solamente sus características inherentes sino los mantenimientos que estos materiales necesiten durante su vida útil.

Teniendo en cuenta el tipo de edificación a la cual se ha realizado el ACV, es importante mencionar que el uso de energía renovable como fuente energética de una edificación es fundamental para evitar y compensar impactos generados por otras etapas del ciclo de vida, en el caso del edificio NZEB El Salvador, el enfoque de eficiencia energética en la etapa de diseño, logró reducir el impacto de consumo de energía y compensar los impactos de otras etapas por medio de un superávit de energía renovable producida por los paneles fotovoltaicos.

Finalmente, el hecho de que el diseño del edificio haya sido planteado con elementos prefabricados, que permiten ser montados y desmontados posibilita que los residuos puedan ser separados de mejor forma en los distintos escenarios, estableciendo una reducción de los impactos energéticos y de carbono equivalente en esta etapa final del ciclo de vida, ya que el escenario de disposición es un factor que puede incrementar o compensar el impacto que se genera en el ciclo de vida de una construcción, ya que si se plantean escenarios que incluyan reciclaje o reúso, se estará aplicando la ideología de la economía circular, que genera créditos que ayudan a compensar el impacto, en cambio si se proyectan escenarios con sus desechos a relleno sanitario el impacto incrementará.

V. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones están dirigidas al sector del diseño y construcción, con el fin de lograr una mejora en la toma de decisiones durante el proceso de diseño.

Por lo tanto, habiendo establecido que tanto el aluminio como el poliuretano generan un gran impacto, se deben evaluar alternativas con menor impacto ambiental y que puedan cumplir con las mismas funciones dentro de una edificación.

Cabe destacar que aplicar las unidades funcionales en sistemas constructivos, retroalimenta las etapas de diseño en edificios construidos, y permite la comparación entre tecnologías constructivas para una conformación más adecuada de sistemas constructivos.

Además, teniendo en cuenta que el principal impacto de construcción es generado por los residuos o desperdicios de materiales, impulsar el uso de elementos y diseños modulares que reduzcan el porcentaje de residuos, permitirá que se reduzca el impacto total de esta etapa, al igual que el establecimiento de

escenarios de disposición final con enfoque holístico, integrando el reúso y el reciclaje, a todos los residuos tanto a los del edificio luego del desmontaje como a los de la etapa de construcción, aportaría en una disminución del doble de los impactos del ciclo de vida.

Y finalmente, considerar el diseño del desmontaje de una edificación, puede llegar a incrementar los costos y tiempos de su desmontaje en comparación a una demolición tradicional, sin embargo, este procedimiento facilita la separación de los materiales residuales e incrementa las posibilidades de su reutilización y/o reciclaje, disminuyendo el impacto que puede tener la disposición final.

REFERENCIAS

- [1] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor)," in *Plastics*, 2nd ed. vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.
- [2] Asam, C. (2007). Recycling prefabricated concrete components a contribution to sustainable construction. 2018, de Research in Architectural Engineering Series, Improving the quality of existing urban building envelopes. Structures. IOS Press, Delft University Press, Volume 4, Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/199243285/Quality-of-existing-buildings>
- [3] Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and management in engineering*, 11(3), 241-252.
- [4] Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 29, 394-416.
- [5] Cao, V., Margni, M., Favis, B. D., & Deschênes, L. (2017). Choice of land reference situation in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(8), 1220-1231.
- [6] Capaz, R. S., & Seabra, J. E. A. (2016). Life cycle assessment of biojet fuels. In *Biofuels for Aviation* (pp. 279-294). Academic Press.
- [7] Chang, C. C., Shi, W., Mehta, P., & Dauwels, J. (2019). Life cycle energy assessment of university buildings in tropical climate. *Journal of Cleaner Production*, 239, 117930. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117930
- [8] Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. *Applied Energy*, 143, 395-413. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.023
- [9] Díaz-Segura, M. M. (2016). Evaluación del desempeño ambiental del edificio de residencias estudiantiles del Instituto Tecnológico de Costa Rica en las etapas de producción de materias primas, construcción y ocupación.
- [10] Eberhardt, L. C. M., Birgisdóttir, H., & Birkved, M. (2019). Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly. *Building Research & Information*, 47(6), 666-680.
- [11] Funes, A., Navarrete, C. and Puquirre, J., (2019). Modelado Y Optimización De Un Edificio Cero Energía Neta Y Su Desempeño En Ciudades De La Región Centroamericana. Antiguo Cuscatlán. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
- [12] Glaumann, M., Marique, A. F., Reiter, S., & Rossi, B. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment*, 51, 395-401.
- [13] Harter, H., Singh, M. M., Schneider-Marin, P., Lang, W., & Geyer, P. (2020). Uncertainty analysis of life cycle energy assessment in early stages of design. *Energy and Buildings*, 208, 109635. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109635
- [14] Hernández, F., Lemus, I. and Solano, F., (2019). Medición Y Optimización De Un Edificio Cero Energía Neta En Un Contexto Regional. Antiguo Cuscatlán: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
- [15] Hernandez, P., Oregi, X., Longo, S., & Cellura, M. (2019). Life-Cycle Assessment of Buildings. *Handbook Of Energy Efficiency In Buildings*, 207-261. doi: 10.1016/b978-0-12-812817-6.00010-3

- [16] Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147.
- [17] Jiménez-González, C., Kim, S., & Overcash, M. R. (2000). Methodology for developing gate-to-gate life cycle inventory information. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(3), 153-159.
- [18] Johnson, J. X., McMillan, C. A., & Keoleian, G. A. (2013). Evaluation of life cycle assessment recycling allocation methods: The case study of aluminum. *Journal of Industrial Ecology*, 17(5), 700-711.
- [19] Jrade, A., & Abdulla, R. (2012, October). Integrating building information modeling and life cycle assessment tools to design sustainable buildings. (Vol. 78, p. 29).
- [20] Krishna, I. M., & Manickam, V. (2017). *Environmental management: science and engineering for industry*. Butterworth-Heinemann.
- [21] Llera, E., Zabalza, I., & Valero, A. (2013). Methodological aspects and design implications to achieve life cycle low emission buildings. A case study: LCA of a new university building. *Strojarsstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu*, 55(1), 87-102.
- [22] Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E., & Díaz, S. (2011). Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy (Oxford)*, 36(4), 1900-1907. doi:10.1016/j.energy.2010.03.026
- [23] Martínez, L., Rodríguez, L., Cisneros, C., Flores, C. and Chávez, M., 2019. Edificios de cero energía neta en El Salvador. *El Salvador Ciencia & Tecnología*, (39), pp.8-15.
- [24] Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017). Environmental risk assessment. *Environmental Management*, 135-152.
- [25] Muthu, S. S. (2015). LCA of cotton shopping bags. In *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing* (pp. 283-299). Woodhead Publishing.
- [26] Pan, W., Li, K., & Teng, Y. (2019). Briefing: Life-cycle carbon assessment of prefabricated buildings: Challenges and solutions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Engineering Sustainability*, 172(1), 3-8. doi:10.1680/jensu.17.00063
- [27] Partidário, P ; Martins, P ; Frazão, & R. Life cycle assessment of buildings – A nZEB case using streamline and conventional analysis
- [28] Passer, A., Kreiner, H., & Maydl, P. (2012). Assessment of the environmental performance of buildings: A critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential buildings. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(9), 1116-1130. doi:10.1007/s11367-012-0435-6
- [29] Paya-Marin, M. A., Lim, J., & Sengupta, B. (2013). Life cycle energy analysis of a modular/off-site building school. *Am. J. Civ. Eng. Archit*, 1(3).
- [30] Programa TCQ. módulo gestión medioambiental. Recuperado de <https://itec.es/programas/tcq/gestion-medioambiental/>
- [31] Rodríguez, L. (2019). Análisis comparativo de sistemas estructurales industrializados para edificación vertical a través de parámetros de sostenibilidad Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/166482>
- [32] Yang, X., Hu, M., Wu, J., & Zhao, B. (2018). Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China. *Journal of Cleaner Production*, 183, 729-743.