

ANÁLISIS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DURANTE EL CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DE UN EDIFICIO DE ESCALA MEDIA EN VENEZUELA

Máximo Enrique Cerón Rodríguez

Sector de Historia y Crítica, Facultad de Arquitectura y Urbanismo,

Universidad Central de Venezuela

maximoceron.fau.ucv@gmail.com

RESUMEN

La presente ponencia determina la influencia de los materiales de construcción en el ciclo de vida de consumo energético y de emisiones de CO₂ de un edificio en Venezuela. Los resultados de consumo energético y de emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida del edificio son determinados por tres factores fundamentales: energía y emisiones de CO₂ incorporada de los materiales, transporte y funcionamiento del edificio. El primer factor, tema central del presente trabajo, determina el consumo energético y las emisiones de CO₂ emitidas durante el proceso de producción de los materiales (desde la extracción de materia prima hasta su eventual reciclaje-reuso). Se diseñó un edificio institucional de 2.629 m² en El Tocuyo. Se analizaron, mediante simulaciones, cuatro soluciones constructivas con diversos materiales: concreto-cemento, madera, metal y materiales de la región. Fueron diseñados para tener un consumo energético y emisiones por funcionamiento similar, de manera que la diferencia de estos valores durante el ciclo de vida sea la energía y emisiones de CO₂ incorporada y transporte de los materiales. Se determinó que el consumo energía y emisiones de CO₂ incorporada representa alrededor del 30% del total; el transporte no llega a 1% y el resto es por funcionamiento.

Palabras clave: energía y emisiones de CO₂ incorporada, consumo energético y emisiones de CO₂, materiales de construcción.

INTRODUCCIÓN

La presente ponencia busca determinar la influencia de los materiales de construcción en un edificio de escala media en la ciudad de El Tocuyo, estado Lara, analizando las tres fases fundamentales del ciclo de vida de consumo energético y de emisiones de CO₂ del mismo, energía y emisiones de CO₂ incorporada de los materiales, energía y emisiones de CO₂ por transporte y energía y emisiones de CO₂ por operación del edificio (electricidad, agua, climatización, elementos mecánicos y otros servicios).

El primer factor, tema central del presente trabajo, definido como *energía y emisiones de CO₂ incorporadas* (inicial y recurrente) determina el consumo energético y las emisiones de CO₂ emitidas por el proceso de producción de los materiales de construcción (desde la extracción de materia prima hasta su eventual reciclaje-reuso).

Para realizar una comparación, fueron aplicados al edificio cuatro paquetes de materiales de construcción diferentes: concreto-cemento, madera, metal y una serie de materiales locales a los cuales se le aplicaron simulaciones de consumo y emisiones a través de software especializados. Estos edificios fueron diseñados para tener un mismo rendimiento energético operacional, de manera que la diferencia de consumo energético y emisiones de CO₂ total sea producto de la energía y emisiones de CO₂ incorporadas.

Contaminación y consumo energético

El dióxido de carbono (CO₂) es considerado el principal gas de efecto invernadero; más de la mitad de las emisiones de estos gases son CO₂ y la mayoría de emisiones de origen humano proviene del uso de energía.

En 2006 se produjeron 28.758 billones de toneladas de CO₂, mientras que en 2011 se emitieron 31.639 billones de toneladas de CO₂ (10% más que en 2006). Para 2035 se estima que la producción de este gas será 36% más (EE.UU. Administración de Información de Energía, Internacional Energy Outlook, 2011). Seguidamente, se estima que el consumo mundial de energía crecerá en 53% de 2008 a 2035.

Por otro lado, la construcción representa alrededor del 10% del producto interno bruto de cada país. Los edificios en todo el mundo, directamente o indirectamente, son responsables del 30% del consumo de materias primas, 40% de la energía consumida, 35% de la producción de CO₂, 40% de los residuos municipales y 16% del consumo de agua y productos químicos (U.S. Green Building Council, 2006).

Análisis de ciclo de vida (ACL) en la construcción

Los edificios pasan por muchas etapas a lo largo de su vida útil, los cuales no son particularmente simples para analizar desde el punto de vista ambiental. Desde su concepción inicial hasta el reciclado final, reutilización o demolición, se debe tomar en cuenta toda una serie de procesos. Estos incluyen “el transporte al sitio, instalación y la construcción, el uso durante el tiempo de vida de la construcción o estructura, reparaciones, mantenimiento y renovación, demolición o desmantelamiento al final de la vida, el transporte para la reutilización y el reciclado o eliminación” (Cole y Kernan, 1996). En resumen, se requiere un ACV completo si se quiere evaluar correctamente a fondo el impacto ambiental de un edificio.

El ACV es una metodología analítica que proporciona una herramienta apropiada para evaluar el desempeño ambiental de un edificio mediante la adopción de una perspectiva sistemática a lo largo de su ciclo de vida, desde la cuna hasta la tumba. La explicación de la metodología ACV se establece en las normas internacionales de la serie ISO 14040. Consta de cuatro pasos analíticos diferentes: una definición del objetivo y el alcance, la producción del inventario del ciclo de vida (ICV), la evaluación del impacto y la interpretación de los resultados.

Para las etapas de la vida de un edificio, entre la concepción inicial y el reciclaje o disposición final, el alcance de esta evaluación se reduce a las siguientes cuatro etapas principales:

- La producción inicial y el transporte de los materiales de construcción.
- El funcionamiento del edificio.
- Producción recurrente y el transporte de los materiales de construcción que serán remplazados durante el ciclo de vida del edificio.
- Reciclaje de los materiales de construcción.

De todas las etapas de la vida del edificio, la energía y las emisiones de CO₂ durante la construcción y demolición son normalmente descuidadas y no contabilizadas dentro del total de consumo de energía y las emisiones de CO₂ de los edificios durante el ciclo de vida (Cole y Kernan, 1996). Esto se debe a que este cálculo es mucho más complicado, ya que hay muchos otros factores a considerar que están más allá del diseño, directamente relacionados con la técnica de la construcción y la técnica de la demolición del edificio en sí y el lugar donde se lleva a cabo.

15

Consumo energético y emisiones de CO₂ por funcionamiento

La energía por funcionamiento de los edificios es la energía necesaria para la climatización, iluminación de espacios interiores y exteriores, equipos de electrónicos y otros servicios. Esto varía considerablemente con los patrones de uso del edificio, el clima y la estación, y la eficiencia de los edificios y sus sistemas (Cole y Kernan, 1996).

El uso de energía en el funcionamiento del edificio es el mayor responsable del consumo de energía del ciclo de vida. Es mucho mayor que la energía de la construcción, la energía incorporada inicial, la energía incorporada recurrente y la energía demolición, añadidos todos juntos.

Estos estudios demuestran que durante el ciclo de vida del edificio, esta etapa tiene el mayor peso del consumo de energía y las emisiones de CO₂, y que representa, en la mayoría de los casos, un aproximado de 80% de la energía consumida y las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida del edificio.

Energía y emisiones de CO₂ incorporadas

Los edificios están contruidos con una variedad de materiales de construcción, cada uno de los cuales consumen energía y emiten CO₂ a lo largo de su etapa de fabricación. La energía se consume en diversos procesos de construcción de un edificio durante la fase de pre-construcción: extracción de materias primas, transporte, producción e instalación, así como su desmontaje, fase posterior a la construcción, tales como la renovación y rehabilitación de algunos materiales de construcción. La energía consumida y las emisiones de CO₂ producidas en estas etapas del ciclo de vida de un edificio se interpretan colectivamente como la energía y las emisiones de CO₂ incorporadas.

Potencial de fin de vida (PFV)

Esta etapa es la última del ciclo de vida del edificio. Hasta hace pocos años, el ciclo de vida de un edificio se veía como una herradura, que comienza con la extracción de materias primas para la fabricación de materiales de construcción y termina con la demolición de este. El sistema de herradura se debe cerrar para convertirlo en un sistema circular, donde los materiales de construcción puedan y deban ser reciclados para así reducir el consumo de materias primas. Algunos materiales pueden ser reciclados directamente en el mismo producto para su reutilización; otros se pueden reconstituir en otros productos utilizables.

METODOLOGÍA

El proyecto es un archivo histórico y el centro de investigación en la ciudad de El Tocuyo, estado Lara. El edificio se divide en tres bloques importantes: un primer bloque para el archivo de documentos y objetos, un área de restauración y salas de investigación; un segundo bloque consta de las áreas administrativas y auditorios; y, por último, un tercer bloque de residencias para investigadores.

Cuatro paquetes de materiales de construcción se aplicaron al diseño arquitectónico, predominantemente sobre la base de concreto-cemento, madera, metal y un grupo de materiales locales. Todas las conclusiones de esta ponencia son producto del análisis y discusión de los resultados obtenidos en la evaluación realizada en cada uno de estos cuatro edificios.

Con el fin de hacer un análisis más profundo fueron estudiados los componentes del edificio por separado. Todos los componentes arquitectónicos utilizados para la construcción del edificio se dividen en cinco categorías principales: estructura, fachadas exteriores, diseño de interior y ventanas-puertas y las celosías. Todos los materiales que fueron seleccionados para ser analizadas en esta investigación forman parte del mercado nacional.

La estructura de todas las soluciones es la misma: hormigón armado. Solo las losas de entepiso tienen diferentes soluciones.

Proyecto

El edificio se emplaza en una parcela de 3.532 m², junto con uno de los edificios más antiguos del país, y que actualmente se encuentra 80% destruido, las ruinas de Belén. Fue sede del primer hospital del país. Los terremotos que sacudieron la ciudad solo dejaron en pie la capilla del hospital y otras paredes. Fue construida en 1625 con el nombre de “Nuestra Señora de Belén”. Además de la capilla, tenía dos habitaciones, dos salas (una para hombres y otra para mujeres), una enfermería y un depósito.

El edificio cuenta con 2.629 m² y posee área de archivo de objetos, de documentos, área de restauración, oficinas administrativas, auditorios y salas para *workshop* y, finalmente, una residencia para investigadores. Todos estos espacios son articulados por un patio central, que relaciona directamente el edificio nuevo con el edificio existente, dándole así la mayor importancia al mismo. El esquema de diseño utilizado es el de la casa colonial: el “patio” como espacio público articulador de los volúmenes; además, permite una circulación de viento y entradas de luz natural. La circulación horizontal alrededor el patio busca rescatar el “corredor” tradicional.

El acceso principal al edificio busca rescatar la idea del zaguán como espacio de transición entre el exterior y el interior, a través de un espacio a doble altura, y con muro cortina se puede visualizar el patio central desde la calle que busca integrar el edificio a la ciudad.

17

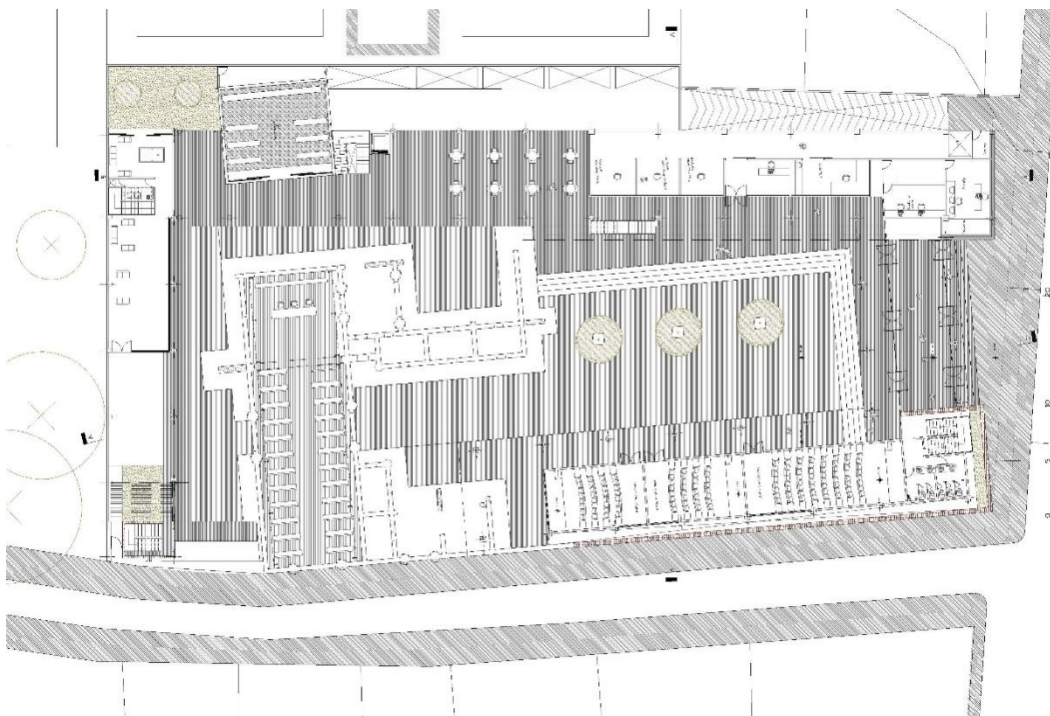


Figura 1. Planta baja

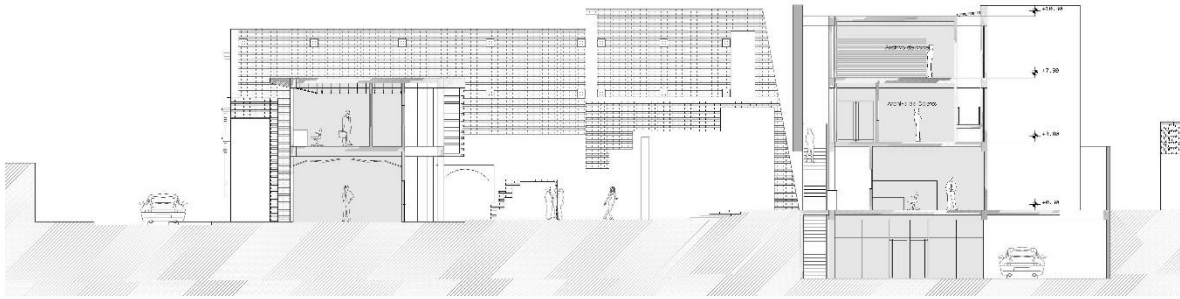


Figura 2. Sección A-A': relación entre volúmenes a través del patio central

El diseño arquitectónico está basado en el máximo rendimiento energético, usando diversas estrategias, las cuales pueden ser mostradas en otra ocasión, visto que el tema central de esta ponencia no es el proyecto arquitectónico en sí.



Figura 3. Renders fachada sur y patio del edificio de concreto-cemento

Consumo energético y emisiones de CO₂ por funcionamiento

Se realizó una simulación de rendimiento energético para evaluar el consumo de energía y emisiones de CO₂ por funcionamiento de cada edificio. Los cuatro edificios fueron diseñados para tener consumos energéticos similares, para que de esta manera las diferencias en el desempeño final de los cuatro edificios sean producto de la energía y las emisiones de CO₂ incorporadas de los materiales utilizados en cada edificio.

La simulación energética se llevó a cabo con el software Design Builder, mientras que las simulaciones de energía y las emisiones de CO₂ incorporadas de los materiales fueron realizadas con el software CES: Eco-audit.

Energía y emisiones de CO₂ incorporadas

Es fundamental para llevar a cabo un ACV tener un inventario de ciclos de vida de diferentes materiales de construcción. Esto trata de la recopilación de datos para cada material (unidad de proceso) con respecto a todas las entradas y salidas de flujo de energía y la masa pertinentes, así

como los datos sobre las emisiones al aire, agua y tierra. El software CES: Eco-audit es una herramienta desarrollada en la Universidad de Cambridge y Granta Design por el profesor Mike Ashby y sus colegas. Parte del software es una base de datos para los materiales de construcción. Permite, además, calcular consumo y emisiones por extracción de materia prima, composición, procesamiento, uso, transporte y eliminación de los materiales de construcción.

Cuadro 1. Resumen metodología

Energía (GJ)		Emisiones CO ₂ (t CO ₂)	
Consumo operacional anual	a	Emisiones operacionales anual	a
Consumo operacional durante el ciclo de vida (60 años)	b = a . 60	Emisiones operacionales durante el ciclo de vida (60 años)	b = a . 60
Energía incorporada inicial (incluye transporte)	c	Emisiones incorporadas inicial (incluye transporte)	c
Energía incorporada recurrente (incluye transporte)	d	Emisiones incorporadas recurrente (incluye transporte)	d
Energía incorporada total	e = d + c	Emisiones incorporadas total	e = d + c
Consumo durante el ciclo de vida	f = b + e	Emisiones durante el ciclo de vida	f = b + e

RESULTADOS

Consumo energético y emisiones de CO₂ operacional

El cuadro 2 muestra el resultado de los análisis de energía y emisiones de CO₂ por funcionamiento de los distintos edificios.

19

 Cuadro 2. Resultados de consumo energético y emisiones de CO₂ operacional anual y durante el ciclo de vida

	Energía operacional		Emisiones CO ₂ operacional	
	Annual Life-cycle		Annual Life-cycle	
	GJ/año	GJ	T.CO ₂ /año	T.CO ₂
Edificio concreto				
Total:	1.027,6	61.656,6	73,4	4.402,2
Total /m ² :	0,39	23,4	0,028	1,68
Edificio madera				
Total:	994,6	59.674	70,8	4.249,8
Total /m ² :	0,38	22,8	0,026	1,62
Edificio metal				
Total:	1.016,6	60.996	72,2	4.333,8
Total /m ² :	0,39	23,4	0,027	1,65
Edificio materiales locales				
Total:	955,3	57.315	67,8	4.069,8
Total /m ² :	0,36	21,6	0,025	1,55
Área neta:	2.629,4 m²			

Los resultados de consumo energético van desde 955,3 GJ/año en el edificio de materiales locales hasta 1.028,6 GJ/año en el edificio de concreto. Esta gama representa una pequeña diferencia de 7%. Por otro lado, los resultados de emisiones de CO₂ van desde 67,8 t.CO₂/año hasta 73,4 t.CO₂/año; esta diferencia representa un incremento de 8,3%.

Energía y emisiones de CO₂ incorporadas

El cuadro 3 muestra el resultado de los análisis de energía y emisiones de CO₂ incorporadas de los distintos edificios. El total de energía incorporada se calcula sumando la energía incorporada inicial y recurrente (incluido el transporte) con el mismo sistema utilizado para el total de las emisiones de CO₂ incorporadas durante el ciclo de vida de los edificios (60 años).

Cuadro 3. Resultados de consumo energía y emisiones de CO₂ incorporadas
(Incluye transporte)

	Incorp. inicial		Incorp. recurrente		Incorp. total
	Energía y CO ₂		energía y CO ₂		energía y CO ₂
Edificio concreto					
Energía incorporada:	9.230	68%	4.630,9	32%	13.661,1
Energía incorporada/m ² :	3,5		1,7		5,2
Emisiones CO ₂ incorporada:	730	70%	310,5	30%	1.040,4
E. CO ₂ incorporada /m ² :	0,28		0,12		0,4
Edificio madera					
Energía incorporada:	10.470,1	78%	2.989,9	22%	13.460
Energía incorporada/m ² :	4		1,1		5,1
Emisiones CO ₂ incorporada:	827,4	84%	153,2	16%	980,5
E. CO ₂ incorporada /m ² :	0,31		0,06		0,37
Edificio metal					
Energía incorporada:	16.722	58%	11.937,5	42%	28.659,5
Energía incorporada/m ² :	6,4		4,5		10,9
Emisiones CO ₂ incorporada:	1.391,3	67%	700	33%	2.091,3
E.CO ₂ incorporada /m ² :	0,53		0,27		0,8
Edificio materiales locales					
Energía incorporada:	9.616,1	62%	5.887,6	38%	15.503,7
Energía incorporada/m ² :	3,7		2,2		5,9
Emisiones CO ₂ incorporada:	1.056,2	66%	553,7	34%	1.610,3
E.CO ₂ incorporada /m ² :	0,4		0,21		0,61
Área neta:	2.629,4 m ²				

20

Energía y emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida de los edificios

El cuadro 4 muestra el resultado de los análisis de energía y emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida de los distintos edificios.

Cuadro 4. Resultados totales de consumo energía y emisiones de CO₂

Energía consumida total emisiones CO ₂ total		
	GJ	T.CO ₂
Edificio concreto		
Total:	75,317.7	5,442.6
Total /m ² :	28.6 GJ/m ²	2.1 t.CO ₂ /m ²
Edificio madera		
Total:	73,133.6	5,230.6
Total /m ² :	27.8 GJ/ m ²	2 t.CO ₂ /m ²
Edificio metal		
Total:	89,655.5	6,425.1
Total /m ² :	34,1 GJ/ m ²	2.4 t.CO ₂ /m ²
Edificio materiales locales		
Total:	74,975.7	5,833.4
Total /m ² :	28.5 GJ/ m ²	2.2 t.CO ₂ /m ²
Área neta:	2.629,4 m ²	

DISCUSIÓN

Luego de obtener los resultados del análisis energía y emisiones de CO₂ incorporadas de los materiales de construcción, se seleccionaron los materiales con los menores valores para así realizar un quinto edificio, el cual llamaremos low energy.

21

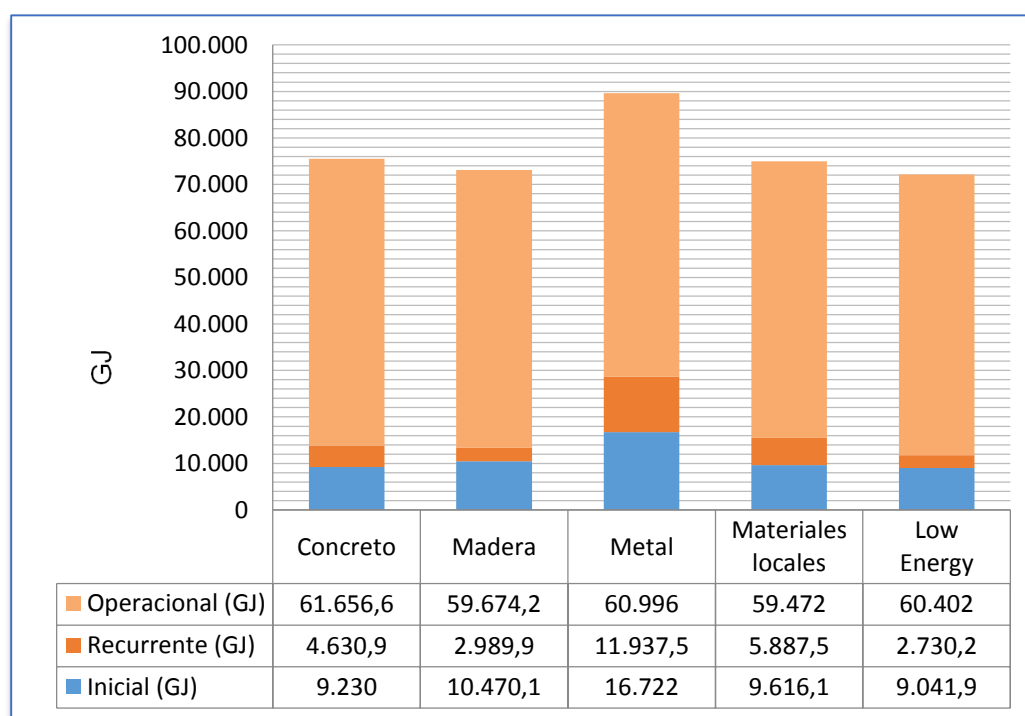


Figura 4. Energía consumida durante el ciclo de vida del edificio

El edificio low energy, efectivamente, tiene el consumo total de energía más bajo durante el ciclo de vida del edificio, 72.174,1 GJ (27,4 GJ/m²) seguido, con resultados muy similares, por el edificio de madera y edificios de materiales locales con 73.134,2 GJ y 74.975,6 GJ (27,8 y 28,5 GJ/m²), respectivamente. Posteriormente, el edificio de concreto-cemento es cuarto con 75.517,5 GJ (28,7 GJ/m²) y el edificio de metal, que representa el consumo de energía más alta, con 89.655,5 (34,1 GJ/m²)

Los 60 años de operación del edificio de metal genera 68% del consumo total de energía durante el ciclo de vida de este, mientras que en el edificio low energy este valor representa 84%. El promedio de dicho consumo es 79% en los cinco edificios. La energía incorporada total de los materiales de construcción representa 16%, mientras que en el edificio de metal representa 32%.

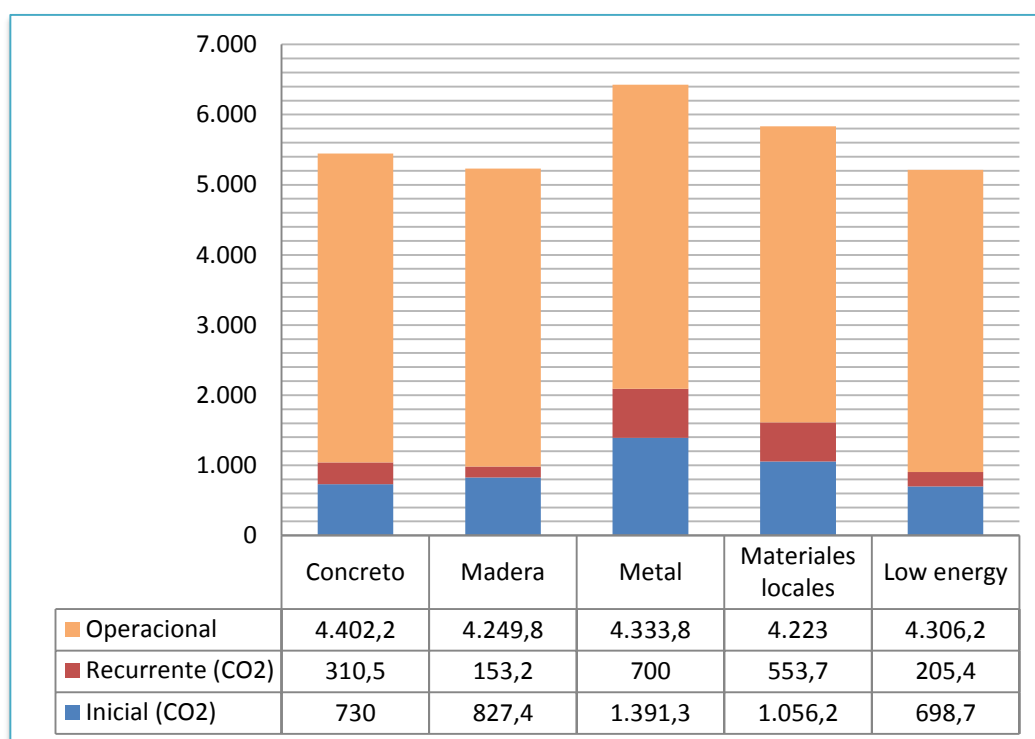


Figura 5. Emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida del edificio

En este caso, el patrón cambia: el edificio low energy posee las menores emisiones de CO₂ totales durante el ciclo de vida del edificio, con 5.210,3 toneladas de CO₂ (2,24 t.CO₂/m²), pero es seguido por el edificio de madera con un resultado similar de 5.230,4 t.CO₂ (2,25 t.CO₂/m²). Posteriormente, el edificio de concreto-cemento y el de materiales locales emiten 5.442,7 y 5.832,9 t.CO₂ (2,34 y 2,5 t.CO₂/m²) y el edificio de metal con 6.425,1 (2,76 t.CO₂/m²)

Por otro lado, cuando se ven las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida de los edificios, los 60 años de funcionamiento del edificio representan 67% de las emisiones totales de CO₂ durante el ciclo de vida del edificio del metal y 83% en el edificio low energy. El promedio es 77% en los cinco edificios. Las emisiones de CO₂ incorporadas representan 17% en el edificio low energy y 29% en el edificio de metal. El promedio es de 23% durante los cinco edificios.

La diferencia entre la alternativa con menor consumo de energía (low energy) y la alternativa con mayor consumo de energía (metal) durante el ciclo de vida del edificio es 17.481,4 GJ (24%). Esta diferencia equivale a 2.982 barriles de petróleo, 417.665 m³ de gas, 237.069 litros de gasolina, 4.855 MWh o, simplemente, 17,4 años de consumo energético por funcionamiento de este edificio.

Para concluir, la diferencia entre la alternativa con menores emisiones de CO₂ (low energy) y la alternativa con mayores emisiones de CO₂ (metal) durante el ciclo de vida del edificio es de 1.214,8 t.CO₂ (23%). Esta diferencia sería equivalente a las emisiones emitidas por un carro pequeño en 8.677.143 km o las emisiones por funcionamiento de este edificio durante 17 años.

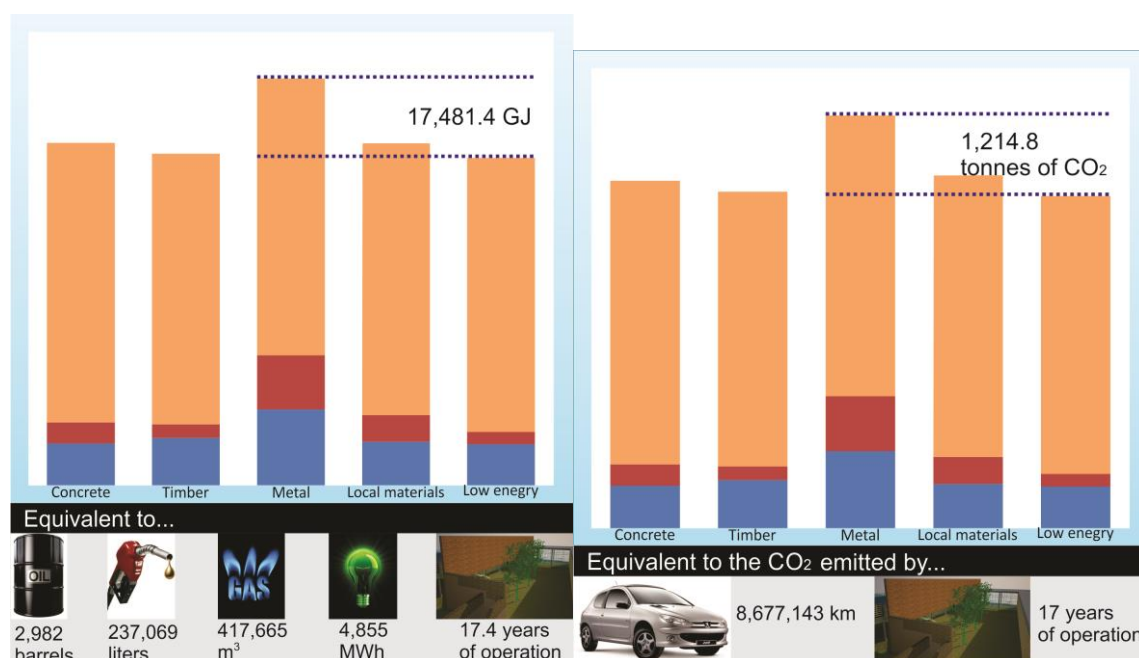


Figura 6. Diferencia entre el edificio con menor impacto ambiental y el edificio con mayor impacto ambiental

CONCLUSIONES

En este trabajo se describe la influencia de los materiales de construcción en el consumo de energía y las emisiones de CO₂ de un edificio institucional de mediano tamaño en Venezuela durante el ciclo de vida de este (60 años). Para lograr este objetivo, fue analizada una gran cantidad de materiales de construcción (concreto-cemento, madera, metal y materiales locales).

El análisis de cada caso de estudio incluye el cálculo del contenido de energía y emisiones de CO₂ incorporados durante el ciclo de vida de los edificios y la energía y las emisiones de CO₂ del potencial de recuperación por reciclaje-reuso al final de su vida útil, además de toda la energía consumida y el CO₂ emitido en el funcionamiento del edificio durante el ciclo de vida.

Los resultados de energía incorporada son bastante parecidos entre los edificios de madera y el concreto-cemento; a su vez, el edificio realizado con materiales locales posee 19% más energía incorporada, mientras que el consumo de los materiales del edificio de metal es 118% más alto. Los resultados de las emisiones de CO₂ incorporadas siguieron la misma tendencia que el consumo energético: el edificio de la madera emite 5,6% menos de CO₂ que el edificio de concreto-cemento, 68,5% menos que el edificio de materiales de construcción local y 116,8% de edificio metálico.

Es evidente que hay una diferencia importante entre las cinco alternativas constructivas, especialmente con respecto a la opción metálica. Por otra parte, la energía y emisiones de CO₂ incorporadas recurrente de los materiales de construcción representan entre 20% y 40% de la energía incorporada total y las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida de los edificios.

Seguidamente, la energía incorporada de los materiales de construcción representa un porcentaje significativo en el consumo total de energía durante el ciclo de vida de los edificios. Para el edificio de concreto-cemento, madera y materiales locales, la energía total incorporada se encuentra entre 17% y 21%, pero para la construcción de metal es 32%. El transporte de materiales de construcción solo representa entre 0,2% y 0,5% del total el consumo de energía.

Comparando con un edificio que hemos llamado low energy, se encontró que la diferencia de energía incorporada entre este edificio y el edificio de metal es de, aproximadamente, la energía necesaria para el funcionamiento de este edificio durante 17,4 años, mientras que la diferencia de las emisiones de CO₂ incorporadas entre el edificio de energía baja y el edificio de metal es de, aproximadamente, el CO₂ emitido por el funcionamiento de este edificio durante 17 años.

24

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente documento en relación con el reciclaje-reutilización de los materiales de construcción, la tasa de recuperación de energía y las emisiones de CO₂ en el edificio de concreto-cemento, low energy y el edificio de materiales locales es, aproximadamente, 26%, mientras que en el edificio de madera es 16%. Finalmente, el edificio de metal tuvo el mayor porcentaje de recuperación de energía y de emisiones de CO₂, con 63%.

REFERENCIAS

Cole, R.J. y Kernan, P.C. (1996). *Life-cycle energy use in office buildings*. United Kingdom.

EIA. U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook (2011). Washington, USA. Extraído el 9 de agosto de 2012 de <http://www.eia.gov/aeo>

World Green Building Council. Extraído el 10 de agosto de 2012 de <http://www.worldgbc.org/>