



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2024,
Volumen 8, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4

ELECCIÓN DE MATERIALES PARA MUROS CONSIDERANDO EMISIÓN DE CO₂, RESISTENCIA TÉRMICA Y PRECIO

**CHOICE OF MATERIALS FOR WALLS
CONSIDERING CO₂ EMISSION, THERMAL
RESISTANCE AND PRICE**

Lorenzo Hernández Aguilar
Universidad Veracruzana, México

Ervin Jesus Álvarez Sánchez
Universidad Veracruzana, México

Rosario Aldana Franco
Universidad Veracruzana, México

José Ricardo Cuesta García
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, México

Alejandro Sánchez Moreno
Universidad Veracruzana, México

René Croche Belin
Universidad Veracruzana, México

Jesús Antonio Camarillo Montero
Universidad Veracruzana, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13336

Elección de Materiales para Muros Considerando Emisión de CO₂, Resistencia Térmica y Precio

Lorenzo Hernández Aguilar¹

lorenhernandez@uv.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0276-9369>

Facultad de Arquitectura Xalapa
Universidad Veracruzana
México

Ervin Jesus Álvarez Sánchez

eralvarez@uv.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0790-0429>

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad Veracruzana
Xalapa, México

Rosario Aldana Franco

raldana@uv.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0503-6024>

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad Veracruzana
Xalapa, México

José Ricardo Cuesta García

jcuesta@cicese.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7074-5962>

CICESE, Departamento de Electrónica y
Telecomunicaciones, Ensenada, Baja
California, México

Alejandro Sánchez Moreno

alejasanchez@uv.mx

<https://orcid.org/0009-0008-8228-4372>

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad Veracruzana
Xalapa, México

René Croche Belin

rcroche@uv.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8540-202X>

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad Veracruzana
Xalapa, México

Jesús Antonio Camarillo Montero

jcamarillo@uv.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3498-9825>

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad Veracruzana
Xalapa, México

¹ Autor principal

Correspondencia: rcroche@uv.mx

RESUMEN

El objetivo principal de la presente investigación consiste en proponer un estudio que permita disminuir el impacto que sobre el medio ambiente generan las edificaciones durante todo su ciclo de vida. El enfoque que se utilizó es de tipo cuantitativo y consiste en aplicar un proceso de optimización a los materiales utilizados en la construcción de muros para carga o divisorios por ser este concepto predominante en las edificaciones, con el fin de elegir los que presenten menor emisión de gases de efecto invernadero (GEI), mayor resistencia térmica y un precio adecuado. Sin embargo, es oportuno mencionar que el presente análisis es aplicable a cualquier tipo de material. Para verificar los resultados se asignan pesos a la función de costo basados en un estudio consciente del impacto que tienen en el ambiente y la sociedad; posteriormente se realizan variaciones porcentuales con el fin de determinar la robustez de la elección. El estudio permite concluir que el objetivo final de reducir el impacto que las construcciones tienen sobre el medio ambiente se cumple y se adapta a cualquier número de variables implicadas.

Palabras clave: arquitectura sustentable, calidad ambiental, medio ambiente, desarrollo sostenible, eficiencia energética

*Artículo recibido 10 julio 2024
Aceptado para publicación: 15 agosto 2024*



Choice of Materials for Walls Considering Co2 Emission, Thermal Resistance and Price

ABSTRACT

The main objective of this research is to propose a study that allows reducing the impact that buildings generate on the environment throughout their life cycle. The approach used is quantitative and consists of applying an optimization process to the materials used in the construction of load-bearing or dividing walls as this concept is predominant in buildings, in order to choose those that present the lowest emission of greenhouse gases (GHG), greater thermal resistance and an adequate price, however, it is worth mentioning that this analysis is applicable to any type of material. To verify the results, weights are assigned to the cost function based on a conscious study of the impact they have on the environment and society, subsequently percentage variations are made in order to determine the robustness of the choice. The study allows us to conclude that the final objective of reducing the impact that buildings have on the environment is met and adapts to any number of variables involved.

Keywords: sustainable architecture, environmental quality, environment, sustainable development, energy efficiency



INTRODUCCIÓN

Con los avances de la medicina la esperanza de vida aumenta significativamente, disminuye la tasa de mortandad y se rompe el equilibrio natural que mantenía el crecimiento poblacional bajo control, los resultados se manifiestan en el crecimiento exponencial de la humanidad, consumo de alimentos, producción e industrialización. Ante esta situación, la ciencia y tecnología tienen que incrementar su actividad generando mayor contaminación y deterioro del medio ambiente.

En los años setenta del siglo XX, surgen las primeras voces de alarma con respecto al crecimiento de la población al considerar que el planeta tiene límites biológicos. En el año de 1979 durante la primera conferencia sobre el clima celebrado en Ginebra, Suiza, se menciona por primera vez el término “Cambio climático” considerándolo como una amenaza real para el planeta (De Vengochea, 2012). Cabe destacar que la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) ha elevado la temperatura del planeta 0.85°C de 1880 a 2012 y el 75% de estos gases están constituidos por CO₂ (Güereca, Carius, Padilla, & Herrera, 2016), razón por la cual en la literatura cuando se menciona este compuesto se hace referencia a los efectos que los gases impactan al medio ambiente.

En 1992 en Rio de Janeiro, Brasil, se realiza la conferencia sobre el medio ambiente y el desarrollo conocida también como la Cumbre de la Tierra considerándose el primer antecedente importante con respecto a la protección del medio ambiente, en este evento se sientan las bases de lo que actualmente se conoce como Desarrollo Sostenible (Aguado, 2018). En 1997 se reúnen los principales países industrializados en Japón para la firma del protocolo de Kioto en donde adquieren el compromiso de disminuir un 5.2% los GEI con respecto a 1990 durante el periodo de 2008 a 2012 , sin embargo, aún no se obtienen los resultados deseados (Ortiz, 2019). Actualmente se continúan realizando reuniones a nivel global y en cada una de ellas los países participantes adquieren nuevos compromisos (De Vengochea, 2012).

Revisión de la Literatura

El USGBC (United States Green Building Council) desarrolló el sistema de certificación a nivel mundial LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) para alentar la construcción de edificios eficientes en energía y recursos que sean saludables para la vida (Buildings, 2017).



En México con el objeto de minimizar el impacto que las edificaciones causan al medio ambiente la Secretaría de Economía emite la norma NMX-AA-164-SCFI-2013: “Edificación sustentable – criterios y requerimientos ambientales mínimos”. La finalidad de esta norma consiste en emitir directrices y requerimientos mínimos para inducir la transición hacia prácticas de edificaciones sustentables que contribuyan a la protección del medio ambiente, la salud, el confort de los usuarios y la productividad de las personas.

Estos compromisos deben ser asumidos por los responsables del diseño de espacios habitables; en este orden de ideas, existen estudios que abordan este tema desde diferentes perspectivas, Chávez, Trebilcock, & Piderit (2021) estudia la relación del edificio sustentable con el usuario, Villar, Jiménez, & Larrumbide (2014) analiza el ciclo de vida de los edificios (ACV) y estudia varias alternativas de diseño de fachadas así como la importancia de los materiales, aislamiento y durabilidad; por su parte Morales (2019) analiza la importancia entre la modernidad en el diseño arquitectónico y la eficiencia energética y menciona la necesidad de que los estudiantes de arquitectura realicen proyectos eficientes tomando en cuenta el costo-beneficio, condiciones óptimas de habitabilidad y confort de manera natural en favor del medio ambiente. La envolvente de los edificios juega un papel importante en la eficiencia energética y en el mantenimiento de las condiciones de confort de los espacios habitables, en edificios existentes es posible la rehabilitación tanto de fachadas como de cubiertas para lograr ventilación natural en lugares de alto nivel de radiación solar (Balter, Ganem, & Barea, 2020).

Planteamiento del Problema

La construcción de proyectos tanto de infraestructura como de edificación generan un impacto en el medio ambiente durante todo su ciclo de vida (Acosta, 2009). Las edificaciones contienen los espacios en los que el ser humano permanece la mayor parte de su tiempo razón por la cual requiere de áreas mejor climatizados, para los arquitectos el confort en el diseño de los espacios habitables y de trabajo han sido y seguirán siendo uno de los principales objetivos a lograr. Las respuestas se deben buscar desde la arquitectura sin la utilización de equipos de climatización auxiliares (Andreoni & Ganem, 2021). La IEA (International Energy Agency), señala que la energía que consumen los edificios en el mundo para su uso representa alrededor del 30% del consumo total y produce un 30% de Dióxido de

carbono (CO₂), la calefacción o enfriamiento de los espacios representan el 50% de ese consumo según la Secretaría de Energía (SENER).

En México el 90% de la energía que se consume proviene de fuentes de energía primaria principalmente de petróleo, gas y carbón (Correa, 2018), sin contar la emisión que los materiales producen durante su proceso de fabricación. En este sentido, un estudio realizado a viviendas INFONAVIT concluye que los materiales producen durante este proceso 161.57kg/m² de CO₂ (Aceves, et al., 2019). La IEA prevé que la demanda del consumo de energía para el año 2050 aumente globalmente en un 50% impulsada por el rápido crecimiento habitacional en zonas urbanas, porcentaje que coincide con la previsión que realiza la ONU en este mismo periodo, en consecuencia, la emisión de GEI se incrementarán de manera significativa reduciendo considerablemente la calidad del aire en las ciudades (Beucker, Bergersen, & Gibon, 2016).

La situación se torna cada vez más crítica y los compromisos que adquieren las naciones participantes en cada conferencia mundial del clima son mayores. En la (COP26) celebrada en Glasgow en el mes de noviembre de 2021, los países asistentes asumen el compromiso de disminuir la emisión de CO₂ un 45% para 2030 (Planelles & Álvarez, 2021). Asimismo la IEA afirma que es necesario aumentar anualmente la eficiencia energética a un ritmo tres veces mayor (El País Economía, 2021).

Es importante destacar que además de la emisión de CO₂ que emiten las edificaciones por consumo de energía durante su periodo de vida útil, los procesos de fabricación de los materiales utilizados en las construcciones emiten alrededor del 18.4% de gases de efecto invernadero (Gúereca, et al., 2016). Con respecto a lo anterior, es imperioso que los diseñadores y gerentes de proyectos asuman la responsabilidad de incluir dentro de la planeación de sus proyectos, mecanismos innovadores que ayuden a disminuir los niveles de emisión de contaminantes invirtiendo en productos, servicios y procesos con bajo nivel de emisión de carbono creando una arquitectura en equilibrio con la naturaleza, aprovechamiento de los recursos naturales y sistemas de eficiencia energética que disminuyan el impacto al medio ambiente. La concurrencia de los factores de economía, sociedad y medio ambiente permite afirmar que una edificación es sostenible (García, Armengot, & Ramírez, 2015).

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de la presente investigación propone realizar un estudio a los materiales predominantes de un proyecto para compararlos entre varios de su misma especie y a través

de un proceso de optimización, seleccionar aquellos con una baja emisión de CO₂ durante el periodo de fabricación y propiedades térmicas que mejoren la eficiencia energética como características principales en favor del medio ambiente.

METODOLOGÍA

El desarrollo de la presente investigación fue de tipo documental aplicada y correlacional y el enfoque que se utiliza es cuantitativo pues el que se mejor se adapta al tipo de investigación, de acuerdo a (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014). El presente estudio propone aplicar un proceso de optimización a los materiales utilizados en la construcción de muros para carga o divisorios por ser este concepto predominante en las edificaciones, con el fin de minimizar la emisión de CO₂ y lograr mejores características térmicas, sin embargo, es oportuno mencionar que el presente análisis será aplicable a cualquier tipo de material y proyecto.

En una primera etapa se analiza el costo por unidad de medida (m²) para seis tipos de muros, tres sencillos y tres combinados con tabiques de la región.

La segunda etapa corresponde al procedimiento para la selección del tipo de muro óptimo a través del siguiente proceso:

- Determinación de las variables de estudio
- Normalización de las variables
- Criterio de optimización y asignación de pesos
- Resultados y variaciones

Primera Etapa

Para llevar a cabo este trabajo de investigación se seleccionó la zona o municipio de Xalapa del Estado de Veracruz; México, ya que es aledaña a las zonas de fabricación de los materiales que se utilizan para la construcción de las viviendas o edificaciones. En los espacios para ventas dentro de la región, se pueden encontrar diversos materiales para construcción de muros, dentro de los cuales los más representativos son:

- **MT₁**: Tabique de barro recocido de 6×12×26 cm.
- **MT₂**: Block de concreto macizo de 12×20×40 cm.
- **MT₃**: Tabique industrializado marca Novaceramic línea tabicimbra de 12×12×23 cm..

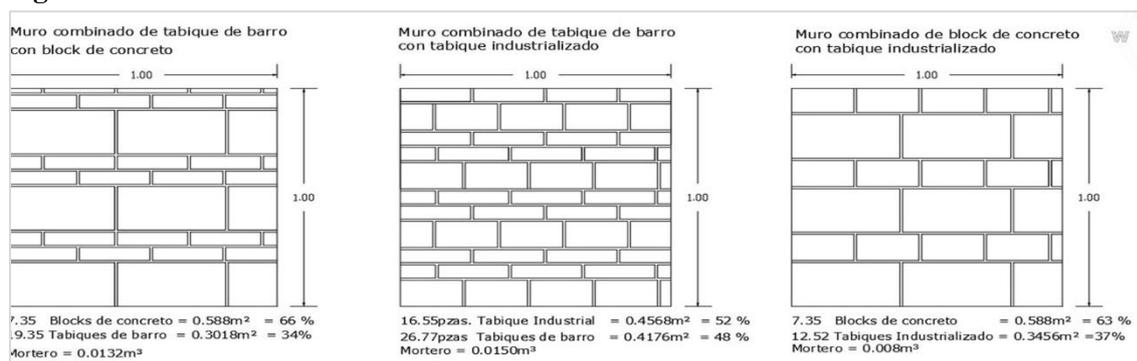
Se puede observar que entre los materiales para construcción arriba seleccionados existe una medida igual en alguno de los lados, lo que permite la combinación de materiales para la construcción de muros de un mismo grosor.

Para llevar a cabo el análisis se plantean los siguientes tipos de muro de construcción: tres con los materiales mencionados anteriormente y tres muros utilizando combinaciones de estos mismos materiales; los seis tipos de muro se detallan a continuación:

- **M₁**: Muro de tabique de barro recocido, para este muro se considera el 100% de material MT₁.
- **M₂**: Muro de block macizo de concreto, para este muro se considera el 100% de material MT₂.
- **M₃**: Muro de tabique industrializado, para este muro se considera el 100% de material MT₃.
- **M₄**: Muro combinado de tabique de barro recocido y block macizo de concreto, para este muro se utiliza 34% de MT₁ + 66% de MT₂.
- **M₅**: Muro combinado de tabique de barro recocido y tabique industrializado, para este muro se utiliza 48% de MT₁ + 52% de MT₃.
- **M₆**: Muro combinado de tabique industrializado con block de concreto, para este muro se utiliza 37% de MT₃ + 63% de MT₂.

En la Figura 1 se muestra en forma esquemática el análisis de la cantidad de insumos por m² de los muros M₄, M₅, M₆. Construidos de acuerdo a las descripciones anteriores.

Figura 1: Detalle de muros combinados



Fuente: Elaboración de los autores

Para la elaboración de muros se requiere la utilización de otros insumos los cuales se mencionan en la Tabla 1, en la primera columna (ID) se asigna una nomenclatura para identificar el tipo de insumo y en

la segunda sus especificaciones, en las siguientes columnas se detallan las cantidades necesarias por unidad de medida (m²).

En la Tabla 2 se muestra el precio por insumo para cada tipo de muro, este dato se obtiene multiplicando el precio del insumo por la cantidad obtenida de la Tabla 1, al final de cada columna se muestra el precio por m² para cada tipo de muro.

Tabla 1: Cantidades de insumos por m² de muro

ID	Insumo	Unidad	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
i	Agua de la red	m ³	0.17	0.20	0.16	0.18	0.16	0.19
ii	Tabique de barro	pieza	60.00	-	-	19.35	26.77	-
iii	Block macizo concreto	pieza	-	12.00	-	7.35	-	7.35
iv	Tabique industrial	pieza	-	-	30.80	-	16.55	12.52
v	Andamio	pieza	0.10	0.04	0.13	0.08	0.12	0.09
vi	Armex	ml	-	2.50	-	-	-	-
vii	Mortero 1/3	m ³	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
viii	Mano de obra	jornal	0.14	0.08	0.13	0.12	0.13	0.10

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 2. Precio por unidad de medida(m²) por tipo de muro

ID	Precio/\$	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
i	22.00	3.74	4.40	3.52	3.96	3.52	4.18
ii	3.50	210.00	-	-	67.73	93.70	-
iii	8.80	-	105.60	-	64.88	-	64.88
iv	7.00	-	-	215.60	-	115.85	87.64
v	26.07	2.61	1.04	3.39	2.09	3.13	2.35
vi	34.57	-	86.43	-	-	-	-
vii	1,854.30	55.63	18.54	37.09	24.11	27.81	14.83
viii	1,274.36	178.41	101.95	165.67	152.92	165.67	127.44
Precio		\$450.39	\$317.96	\$425.26	\$315.48	\$409.67	\$301.12

Fuente: Elaboración de los autores

Segunda Etapa

Determinación de las variables de estudio

El procedimiento que se presenta a continuación tiene como objetivo seleccionar dentro de los tipos de muros de la Tabla 2, el óptimo tomando en cuenta el precio, resistencia térmica y emisión de CO₂ para el criterio de optimización.

En la Tabla 3 se muestran las propiedades de los materiales MT₁, MT₂, MT₃ que se utilizan en la construcción de muros y serán considerados como variables para el estudio de optimización. Las

propiedades de estos materiales son obtenidas de diversos estudios reportados en la literatura, (Espinosa, et al., 2017) analizan el desempeño energético en tres sistemas de muros, de este estudio se obtiene la resistencia térmica para el material MT₁; las propiedades del block de concreto MT₂ se obtienen de la ficha técnica proporcionada por la fábrica (Industrial Bloquera, 2021); (Gúereca, et al., 2016) en un estudio realizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM sobre la evaluación de la huella de carbono para doce sistemas constructivos analiza la emisión de CO₂ del tabique de barro recocido e industrializado identificado en este estudio como MT₁ y MT₃ respectivamente así como la resistencia térmica de este último; (Aceves, et al., 2019) analiza los factores de emisión de CO₂ para diferentes tipos de materiales entre los que incluye el block de concreto de varias medidas identificado en esta trabajo como MT₂.

Tabla 3: Propiedades de tabiques.

ID	Propiedades	MT ₁	MT ₂	MT ₃
A	Emisión CO ₂ por pieza	1.34	0.60	0.31
B	Resistencia térmica	0.36	0.50	0.84
C	Precio por unidad	3.50	8.80	7.00

Fuente: Elaboración de los autores

La resistencia térmica determina la propiedad de aislamiento de un material, es decir, la capacidad de oponerse a un flujo de calor y se expresa en m²K/W (metro cuadrado kelvin por vatio). Por otra parte, se tiene que la conductividad térmica es la capacidad que tiene un material para conducir el calor, observe que es el inverso de la resistencia térmica dado por W/m²K, por lo que esta variable se considera mediante la resistencia térmica, con respecto al dióxido de carbono (CO₂) este representa el 75% de emisión de gases de efecto invernadero y las unidades para este estudio se consideran en kg/pieza de tabique.

En la Tabla 4 se identifican las variables que intervienen en este estudio para cada tipo de muro. Los datos de la columna A se obtienen multiplicando el número de piezas de tabique de acuerdo al tipo de muro por la cantidad de CO₂ de acuerdo a las Tablas 1 y 3, de la misma forma se obtienen los datos de la resistencia térmica de la columna B y en la columna C el precio de cada tipo de muro contenidos en la Tabla 2.

Tabla 4: Variable por tipo de muro.

Muro	Variables		
	A	B	C
M ₁	80.400	0.360	450.39
M ₂	7.248	0.504	317.96
M ₃	9.610	0.841	425.26
M ₄	30.368	0.455	315.48
M ₅	41.035	0.610	409.67
M ₆	8.346	0.629	301.12

Fuente: Elaboración de los autores

Normalización de las variables

Dado que los datos contenidos en la Tabla 4 tienen diferentes unidades y escalas, no es posible realizar una comparación directa y generar una función de costo que sea equitativa al momento de evaluar. De acuerdo a lo anterior, es recomendable normalizar y adimensionar los datos para que el peso que tenga cada propiedad del material dependa de la importancia dada de acuerdo al estudio en cuestión. La normalización y adimensionamiento se obtiene tomando cada uno de los datos de la columna y dividiéndolo entre el máximo valor de esa misma columna. Por ejemplo, consideremos la columna A y llamemos A_i al valor i -ésimo de la columna A, es decir, el valor de la emisión CO₂ para el material M_i . Entonces tendremos que el valor normalizado correspondiente \hat{A}_i estará dado por la ecuación (1):

$$\hat{A}_i = \frac{A_i}{A_{max}}, i, \dots, 6 \quad \dots \dots \dots (1)$$

Donde A_{max} es el valor máximo de la columna A. Observe que con la nueva asignación los valores que toma la variable normalizada y adimensional solo puede estar entre cero y la unidad, incluyéndolos así, \hat{A}_i entre [0,1]. De la misma forma que se definió \hat{A}_i se definen \hat{B}_i y \hat{C}_i .

En el caso particular de la resistencia térmica, esta es importante para mantener las condiciones de confort en los espacios, y este confort se logra cuando el material tiene una mayor resistencia térmica. Así en el presente estudio interesa minimizar la emisión de CO₂ y el precio (variables A y C), pero maximizar la resistencia térmica (variable B). La elección de buscar un máximo o un mínimo depende del planteamiento del problema y de las variables empleadas. Entonces, de acuerdo a lo descrito

anteriormente, se tiene que aplicar un criterio para maximizar los datos de la columna $\hat{\mathbf{B}}$, no así en los datos de las columnas $\hat{\mathbf{A}}$ y $\hat{\mathbf{C}}$ donde conviene minimizar sus valores.

Para optimizar una función de costo se puede considerar minimizar o maximizar dicha función para encontrar el óptimo. En este estudio el objetivo de optimización será minimizar las variables antes mencionadas de acuerdo a un cierto criterio y por ese motivo se requiere cambiar el valor normalizado de la columna $\hat{\mathbf{B}}$ restándolo a la unidad como se muestra en la ecuación (2):

$$\hat{\mathbf{T}} = (1 - \hat{\mathbf{B}}) \dots\dots\dots (2)$$

donde $\hat{\mathbf{T}}$ es la nueva variable a minimizar.

Observe que con esta nueva transformación el valor que era máximo en la variable normalizada $\hat{\mathbf{B}}$ ahora será mínimo en $\hat{\mathbf{T}}$ y viceversa. También note que $\hat{\mathbf{T}}$ tomará valores entre cero y uno incluyéndolos. En la Tabla 5 se presentan los datos de las variables normalizadas adimensionales obtenidas a partir de los cálculos descritos en esta sección.

Tabla 5: Variables normalizadas adimensionales.

Muro	Variables		
	$\hat{\mathbf{A}}$	$\hat{\mathbf{T}}$	$\hat{\mathbf{C}}$
M ₁	1.000	0.572	1.000
M ₂	0.090	0.401	0.706
M ₃	0.120	0.000	0.944
M ₄	0.378	0.459	0.700
M ₅	0.510	0.275	0.910
M ₆	0.104	0.252	0.669

Fuente: Elaboración de los autores

Criterio de optimización y asignación de pesos

El criterio de optimización que se considerará en este trabajo será de acuerdo a la ecuación (3):

$$J = \sum_{i=1}^N a_i v_i \dots\dots\dots (3)$$

Donde a_i es el peso asignado a cada variable v_i para $i = 1, \dots, N$. Al criterio antes dado se le conoce como una combinación lineal. Observe que la ecuación anterior puede considerar el número de variables

que el análisis requiera, por lo que esta metodología puede ser aplicada a otros sectores y aplicaciones. En este caso, la ecuación (3) queda reflejada en la ecuación (4):

$$J = a_1 \hat{A} + a_2 \hat{T} + a_3 \hat{C} \dots\dots\dots (4)$$

Lo siguiente a realizar será asignar los valores que tendrán los pesos a_i , $i = 1, 2, 3$. En este punto debe ser claro que el resultado será diferente en función de dichos pesos y, por lo tanto, la asignación de pesos debe realizarse con fundamentos para que el resultado no este polarizado. Para los pesos se usarán valores entre cero y uno, donde valores cercanos a cero indican una baja o nula importancia mientras que valores cercanos a la unidad indicarán una alta importancia o prioridad.

Se inicia con la asignación de peso para a_1 , la cual está asociada a \hat{A} (emisión de CO₂). Esta asignación es de suma importancia debido a que, como se menciona en la cumbre del clima (COP21) celebrada en París en 2015, es urgente reducir las emisiones de CO₂ del 40% al 70% para el año 2050 con el propósito de disminuir el sobrecalentamiento global, ante esta situación es necesario mantener el cambio de temperatura por debajo de 1.5° para el año 2100 en comparación con los niveles preindustriales (Fernández, 2016). De acuerdo con lo anterior, es importante seleccionar los materiales que ofrezcan mayor resistencia térmica y menor emisión de CO₂. Tomando en cuenta los datos anteriores, se considera en este estudio darle el mayor peso a la variable “emisión de CO₂” con la finalidad de contribuir en la disminución de este compuesto, por lo tanto, el peso asignado a la variable \hat{A} será de $a_1 = 1$.

La siguiente asignación de peso es para a_2 , la cual está asociada a \hat{T} (conductividad térmica que es inverso a la resistencia térmica). Para este caso es oportuno resaltar la importancia que representa la resistencia térmica de los materiales al reducir el ingreso de calor (Heard & Villaroel, 2013), la capacidad del aislamiento térmico es una propiedad que tiene un mayor impacto sobre la eficiencia energética al mantener un balance adecuado de temperatura en los espacios habitables de manera natural, de esta manera se coadyuva en la reducción de emisión de CO₂ durante el periodo de vida útil de las edificaciones, por esta razón el peso asignado a la variable \hat{T} será de $a_2 = 0.8$.

Finalmente, la variable precio en el corto plazo es considerada como la más importante, sin embargo, durante el periodo de vida útil la disminución de consumo energético mediante la utilización de

materiales térmicos y la implementación de fuentes de energía renovable genera mayores ahorros además de disminuir la emisión de gases contaminantes (Canteros, Vera, & Natalini, 2018), por lo antes citado, el criterio de peso considerado a la variable \hat{C} será de $a_3 = 0.7$.

Para visualizar y comprender mejor la distribución de pesos se calcula el porcentaje que cada peso aporta a la función de costo. Para calcular dicho porcentaje se aplica la ecuación (5):

$$\hat{a}_i = \frac{100 a_i}{a_1 + a_2 + a_3} \%, i = 1,2,3, \dots \dots \dots (5)$$

Al aplicar la fórmula 5 se obtienen los resultados siguientes:

$$\hat{a}_1 = 1.00 \times 1.00 / 2.50 = 40\%$$

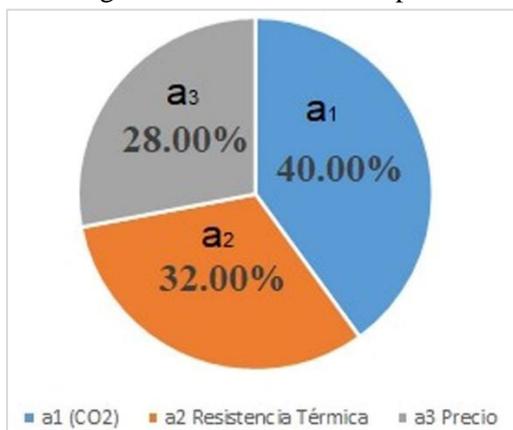
$$\hat{a}_2 = 0.80 \times 1.00 / 2.50 = 32\%$$

$$\hat{a}_3 = 0.70 \times 1.00 / 2.50 = 28\%$$

En la Figura 2 se muestra un gráfico los porcentajes resultantes a partir de los pesos asignados.

Figura 2:

Peso asignado a los criterios de optimización en porcentaje. Fuente: Elaboración de los autores



Resultados y variaciones

Con la función de costo J y los pesos asignados que se obtuvieron en la sección anterior, se puede lograr de manera individual el valor de la función de costo J_i para el material i-ésimo como se muestra en la ecuación (6).

$$J_i = a_1 \hat{A}_i + a_2 \hat{T}_i + a_3 \hat{C}_i \dots \dots \dots (6)$$

donde $i=1, \dots, 6$

Aplicando los valores de la ecuación (6) se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 6 conforme al criterio de optimización propuesto.

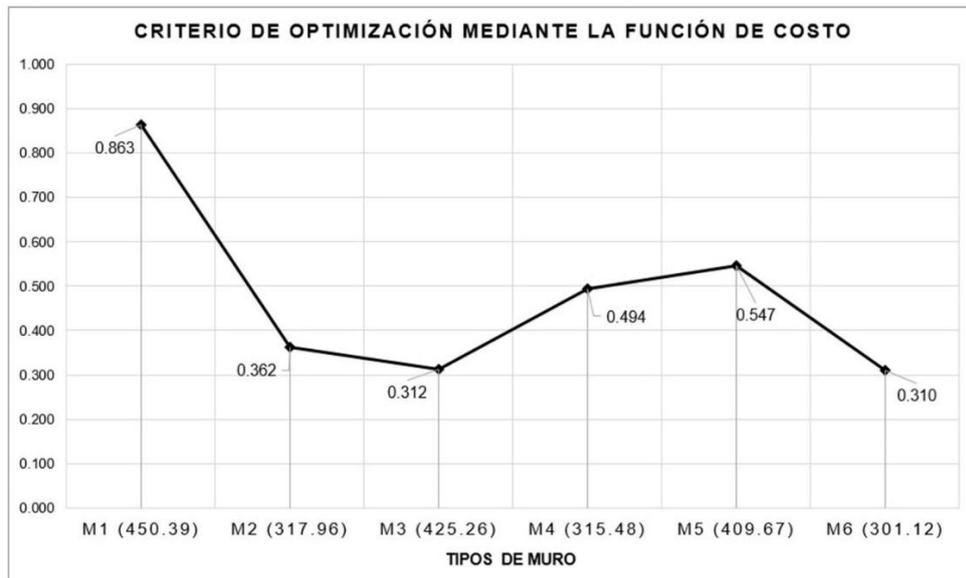
Tabla 6: Resultado del estudio de optimización. Fuente: Elaboración de los autores

Función de costo	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
J_i	0.863	0.362	0.312	0.494	0.547	0.310

Los valores que se obtienen en la Tabla 6 indican que el material M6 (muro combinado de tabique industrializado con block de concreto) presenta la mejor opción de acuerdo al criterio propuesto dado en (1). En el gráfico de la Figura 3 se muestran los datos de la tabla 6 y junto al material se incluye el precio del mismo.

Figura 3:

Representación gráfica del resultado del criterio de optimización. Fuente: Elaboración de los autores



A continuación, se aplican variaciones a los pesos asignados con la finalidad de analizar el comportamiento de la función de costo y conocer la robustez de la elección. Se define V_p^i como la variación del p% al peso a_1 y del -p% al peso a_2 al material i-ésimo. Observe que $V_0^i = J_i$. Así, por ejemplo V_{-3}^i será una disminución del 3% al peso a_1 y un incremento del 3% al peso a_2 . En todos los casos a_3 se mantiene constante. Los resultados obtenidos ante estas variaciones se muestran en la Tabla 7 resaltado los valores mínimos resultantes.

Tabla 7: Resultado de las variaciones de criterio. Fuente: Elaboración de los autores

Muro	J_i	$V_{1(+1\%)}$	$V_{2(-1\%)}$	$V_{3(+3\%)}$	$V_{4(-3\%)}$	$V_{5(+5\%)}$	$V_{6(-5\%)}$
M_1	0.863	0.867	0.859	0.876	0.850	0.884	0.842
M_2	0.362	0.359	0.365	0.353	0.371	0.346	0.377
M_3	0.312	0.313	0.311	0.316	0.309	0.318	0.306
M_4	0.494	0.493	0.495	0.492	0.497	0.490	0.498
M_5	0.547	0.549	0.544	0.554	0.540	0.558	0.535
M_6	0.310	0.308	0.311	0.305	0.314	0.302	0.317

Los resultados de la Tabla 7 muestran que cuando el peso del criterio a_1 se aumenta el valor del M_2 , M_4 y M_6 disminuye y aumenta el valor de M_1 y M_3 y M_5 ; cuando el peso del criterio a_1 disminuye el valor del M_1 , M_3 y M_5 disminuye y aumenta el valor de M_2 , M_4 y M_6 . También se observa que los muros con contenido de tabique de barro recocido no resultan la mejor opción de acuerdo al criterio de optimización aquí discutido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se obtienen aplicando la función de costo de acuerdo al criterio de optimización propuesto coadyuvan en la lucha contra el cambio climático al seleccionar materiales con mayor termicidad y menor emisión de CO_2 durante su proceso de fabricación sin comprometer completamente el precio del material. Las características térmicas de los materiales mantienen los espacios habitables en condiciones de confort disminuyendo el consumo energético durante su vida útil y por lo mismo su costo. Si bien es cierto que en el presente estudio se le asigna un menor criterio de peso a la variable precio, la razón radica en que se considera que el aumento de la eficiencia energética durante el periodo de uso de los espacios compensa la inversión inicial del precio de los materiales. Esto desde luego queda pendiente de probar en estudios posteriores. Así, para este estudio el mejor material para el criterio dado en (1) es el material M_6 : muro combinado de tabique industrializado con block de concreto (37% de MT_3 + 63% de MT_2).

CONCLUSIÓN

De acuerdo a la investigación realizada en el presente estudio, dos aspectos resultan importantes a tomar en cuenta cuando se eligen los materiales que se utilizarán en el diseño de espacios habitables; por un lado, aquellos que durante su proceso de fabricación emitan menor emisión de gases de efecto

invernadero y por el otro, aquellos con mejores características térmicas que propicien el mantenimiento de los espacios habitables en condiciones de salud y confort de los usuarios. En este sentido, resulta importante que en la planeación de los proyectos los diseñadores incorporen mecanismos innovadores que cumplan estas condiciones para lograr aumentar la productividad de los usuarios, disminuir el consumo de energía y crear una arquitectura en equilibrio con la naturaleza.

Los resultados que se obtienen en el presente estudio aplicado a muros de carga satisfacen las condiciones mencionadas en el párrafo anterior y cumplen con el objetivo final, que consiste en seleccionar de entre los materiales propuestos aquel que represente un valor mínimo bajo un criterio, manteniendo las mejores características térmicas, menor emisión de CO₂ y un menor precio. Finalmente, para analizar el comportamiento de la función de costo y conocer la robustez de la elección, se aplican variaciones a los pesos asignados, demostrándose que la variable a_3 se mantiene constante; asimismo, se observa que los muros con contenido de tabique de barro recocido no resultan la mejor opción de acuerdo al criterio de optimización aquí discutido. Queda pendiente por comprobar que la variable costo vaya disminuyendo al mejorar la eficiencia energética. Es pertinente hacer mencionar que el presente estudio es aplicable a cualquiera de los materiales utilizados en las obras de edificación y adaptable a cualquier número de variables involucradas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aceves, H., López, O., Mercado, S. M., & Contreras, C. A. (2019). Emisiones de GEI en KG-CO₂/M² generados por una vivienda tipo INFONAVIT. *Interdisciplinary Congress of Renewable Energies. Industrial Maintenance, Mechatronics and Information Technology* (pág. 13). México: Ecorfan. Obtenido de https://www.ecorfan.org/booklets/Booklets_CIERMMI_2019/06-%C3%81rea%20Ingenier%C3%ADa%20y%20Tecnolog%C3%ADa/CIER-235%20LISTO/CIER-235.pdf
- Acosta, D. (2009). Arquitectura y construcción sostenibles: conceptos, problemas y estrategias. *Revista de Arquitectura*, 20. Obtenido de <https://doi.org/10.18389/dearq4.2009.02>



- Aguado, A. (2018). Desarrollo sostenible: 30 años de evolución desde el informe Brundtland. (*Tesis Doctoral*). Universidad de Sevilla. Departamento de Derecho Administrativo, Sevilla, España. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11441/81489>
- Andreoni, S., & Ganem, K. (Diciembre de 2021). El rol activo del usuario en la búsqueda de confort térmico de viviendas en clima templado árido. *Habitat Sustentable*, 11(2), 08-21. doi: <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.02.01>
- Balter, J., Ganem, C., & Barea, G. (Diciembre de 2020). Mejoras en el desempeño energético de edificios de verano mediante la integración de envolventes ventiladas en fachadas norte y cubiertas. el caso de Mendoza Argentina. *Hábitat Sustentable*, 10(2). doi: <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.07>
- Beucker, S., Bergersen, J., & Gibon, T. (2016). Building Energy Management Systems. (Y. University, Ed.) *Journal of Industrial Ecology*, 20(2), 223-233. doi:10.1111/jiec.12378
- Buildings, The European Portal For Energy Efficiency In. (07 de diciembre de 2017). *Build Up*. Recuperado el 11 de abril de 2019, de Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED): <http://www.buildup.eu/es/explore/links/liderazgo-en-energia-y-diseno-ambiental-lead>
- Canteros, M. L., Vera, L. H., & Natalini, B. (Agosto de 2018). Evaluación de metodologías en el etiquetado de eficiencia energética en edificios. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica: Claves para el desarrollo*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11336/130818>
- Chávez, F., Trebilcock, M., & Piderit, M. B. (14 de Diciembre de 2021). Diseño de edificios de oficinas sustentables para promover ocupantes sustentables. *Hábitat Sustentable*, 11(2), 34-45. doi: <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.02> .
- Correa, G. (Diciembre de 2018). Medio ambiente y generación. *PORTES, Revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico*, 12(24), 145-161. Obtenido de <http://www.portesasiapacifico.com.mx/revistas/epocaiii/numero24/7.pdf>
- De Vengochea, A. (2012). Las Cumbres de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. *Fundación Friedrich Ebert Stiftung*. Obtenido de <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/la-energiayclima/09155.pdf>

- El País Economía. (18 de Mayo de 2021). *Cinco días*. Recuperado el 2022 de Febrero de 22, de https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/05/18/companias/1621323424_264049.html
- Espinosa, G., Cordero, D., Alejandra, R., & Roux, R. (Enero-junio de 2017). Análisis de aislamiento para el desarrollo de la vivienda social. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 12(21). Obtenido de <https://legadodearquitecturaydiseno.uaemex.mx/article/view/9378>
- Fernández, R. (2016). El acuerdo de París y el cambio transformacional. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*(132), 101-114. Obtenido de https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/68160/el-acuerdo-de-paris-y-elcambio-transformacionalf_5a0173891723dd48bb098d96.pdf?sequence=1
- García, F., Armengot, J., & Ramírez, G. (Enero de 2015). El análisis del coste del ciclo de vida como herramienta para la evaluación económica de la edificación sostenible. Estado de la Cuestión. *Informes de la Construcción*, 67(537), 67, 1-8. doi.: <https://doi.org/10.3989/ic.12.119>.
- Güereca, L. P., Carius, C., Padilla, A., & Herrera, H. D. (2016). *Evaluación de la Huella de Carbono con enfoque de análisis de Ciclo de Vida para 12 Sistemas Constructivos*. México: Instituto de Ingeniería UNAM. Obtenido de https://www.novaceramic.com.mx/pdf/emisiones_co2.pdf
- Heard, C., & Villaroel, S. (13 de 09 de 2013). Evaluación económica de la resistencia térmica de la vivienda de interés social en las ciudades tropicales de México. *Acta Universitaria*, 23(4), 17-29. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2013.458>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill. Obtenido de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Industrial Bloquera. (10 de Noviembre de 2021). *industrialbloquera.com.mx*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2021, de <https://www.industrialbloquera.com.mx/productos/blocks-de-concreto/block-liso-macizo-de-concreto-12x20x40>
- Morales, J. D. (2019). *Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética* (Primera ed.). México: Libros UNAM. Obtenido de <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/2995>



- Ortiz, K. H. (23 de Junio de 2019). Sustentabilidad global: Principios y acuerdos internacionales. *Revista de ciencias sociales (Ve)*, XXV(4). Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/280/28062322006/28062322006.pdf>
- Planelles, M., & Álvarez, C. (14 de Noviembre de 2021). Balance de la cumbre de Glasgow. *El País*, págs. 1-9. Recuperado el 15 de Noviembre de 2021, de https://mail.yahoo.com/d/folders/1/messages/AInGW7UdxQTBYZEKhQbtcdJ95gQ?guce_referrer=aHR0cHM6Ly9sb2dpbi55YWhvby5jb20v&guce_referrer_sig=AQAAALANOnk1GcuUXYjdKmvqXPB2QNzbEK1ADmfyP5kf7UUMLWdnpPhVPHfuS-Yl_58KDUQcjVRLSor9K412Tk-d7qYGS5JDgVdNyUWAJSV797od2XQTjl
- Villar, R., Jiménez, R., & Larrumbide, E. (Julio-Septiembre de 2014). Impacto energético y emisiones de CO2 del edificio con soluciones alternativas de fachada. *Informes de la Construcción*, 66(535). doi:doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.085>

