

**PROPUESTA SOSTENIBLE DE AISLAMIENTO TÉRMICO Y ACÚSTICO A
PARTIR DE CELULOSA**

**JOSE DAVID RAMÍREZ NIEVES
ANDREA CAROLINA VELANDIA TORRES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

**PROPUESTA SOSTENIBLE DE AISLAMIENTO TÉRMICO Y ACÚSTICO A
PARTIR DE CELULOSA**

JOSE DAVID RAMÍREZ NIEVES

ANDREA CAROLINA VELANDIA TORRES

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director:

RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ

Ingeniero Civil, Ph.D.

Co-director:

LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ

Ingeniero Civil, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS.....	17
1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. METODOLOGÍA	18
2.1. MATERIALES Y FABRICACIÓN DE LOS PANELES	18
2.2. ENSAYO DE IMPEDANCIA ACÚSTICA.....	19
2.3. ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	23
2.4. MODELO ANALÍTICO EN AUTODESK REVIT	27
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30
3.1. IMPEDANCIA ACÚSTICA.....	30
4.2. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	31
4.3. SIMULACIÓN EN AUTODESK REVIT	33
5. CONCLUSIONES	39
CITAS	40

BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXOS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mezcla de papel periódico y ácido bórico en molde.....	19
Figura 2. Tubo de impedancia o de kundt.....	20
Figura 3. Esquema de tubo de impedancia o de kundt.....	20
Figura 4. Onda de sonido que viaja a través del tubo de kundt	22
Figura 5. Banco de conductividad térmica en estado estable.....	25
Figura 6. Esquema de aparato experimental para determinar el coeficiente de conductividad térmica de un material.....	26
Figura 7. Modelo utilizado para la simulación.....	27
Figura 8. Variables sobre las que autodesk revit hace el cálculo para conocer el consumo de energía eléctrica.....	29

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Rango de conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente.....	33
Gráfico 2. Comparación de emisiones anuales de carbono que emitiría la edificación.....	36
Gráfico 3. Comparación de combustible utilizado por la edificación.	37
Gráfico 4. Comparación de usos de la energía eléctrica de ambos modelos ..	38
Gráfico 5. Gráficas comparativas de necesidades de refrigeración de los elementos que componen la edificación	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos obtenidos del ensayo de impedancia acústica.	31
Tabla 2. Coeficientes de impedancia acústica de materiales de construcción y aislantes sonoros.	31
Tabla 3. Densidad y conductividad térmica de materiales comunes en construcción.....	32
Tabla 4. Factores involucrados en el análisis energético.	34
Tabla 5. Comparación de resultados de la simulación de consumo de energía total.....	35
Tabla 6. Comparación de la energía implementada por la edificación durante su ciclo de vida.	36
Tabla 7. Comparación de la posible cantidad de energía renovable que puede generar la edificación.....	36

ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Datos del ensayo de impedancia acústica.	48
Anexo B. Datos del ensayo de conductividad térmica.	49

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA SOSTENIBLE DE AISLAMIENTO TÉRMICO Y ACÚSTICO A PARTIR DE CELULOSA*

AUTORES: JOSE DAVID RAMÍREZ NIEVES
ANDREA CAROLINA VELANDIA TORRES**

PALABRAS CLAVE: Celulosa, paneles, sostenibilidad, ahorro energético, aislante, conductividad térmica, impedancia acústica.

DESCRIPCIÓN:

En este proyecto se evalúa un material para ser usado como aislante térmico y acústico con el fin de ser aplicado en edificaciones. Este material está hecho a partir del uso de la celulosa obtenida del papel periódico de reciclaje como materia prima principal; mezclado con ácido bórico, que brinda propiedades ignífugas y fungicidas; y agua, la cual proporciona trabajabilidad y maleabilidad a la composición para hacerla homogénea y consistente. Por medio de pruebas experimentales, en las cuales se usó el banco de conductividad térmica en estado estable y el tubo de impedancia o de Kundt, se encontró la conductividad térmica y el coeficiente de absorción del sonido de probetas fabricadas con el material en estudio, respectivamente; arrojando valores favorables para la utilización de este en edificaciones con el fin de obtener, no sólo aislamiento que permita comodidad a las personas que habitan o hacen uso de esta, sino también, ahorro energético como consecuencia del aislamiento térmico que la mezcla proporciona. Además, por medio de Building Information Modeling (BIM), específicamente con el *software* Autodesk Revit, se generó una simulación que permite analizar el impacto sobre los gastos energéticos de una edificación de una manera precisa usando el material a ser evaluado en comparación cuando el material no es utilizado. Además entran en consideración factores inscritos en el modelo utilizado para la simulación y que son relevantes para el cálculo del consumo de energía, como lo es el uso de la obra constructiva y sus redes eléctricas y de ventilación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Codirector: Luis Eduardo Zapata Orduz.

ABSTRACT

TITLE: SUSTAINABLE PROPOSAL OF THERMICAL AND ACOUSTIC ISOLATION FROM CELLULOSE*

AUTHOR: JOSE DAVID RAMÍREZ NIEVES
ANDREA CAROLINA VELANDIA TORRES**

KEYWORDS: Cellulose, panels, sustainability, energetic saving, insulation, thermic conductivity, acoustic impedance.

DESCRIPTION:

This project evaluates how a cellulose material obtained from recycled newspaper performs as a thermal and acoustic isolator when implemented in buildings. Such a material is the product of a mixture of newspaper cellulose, as raw material, boric acid, which offers fireproofing and fungicide properties, and, water, which provides workability and malleability to the composition in order to make it homogeneous and consistent. Experimental tests implementing Kundt's tube and thermal conductivity equipment in a stable state were carried out upon samples of this material in order to obtain its sound absorption coefficient and thermal conductivity, respectively. Such tests yielded favourable results for the use of this material in buildings not just for insulation that creates a comfortable temperature environment for the people inhabiting and/or making use of them, but also energy savings as consequence of the thermal isolation that is provided by the mixture. Additionally, a Building Information Modeling (BIM) analysis, implementing Autodesk Revit software, was also conducted, to generate a simulation which allows to accurately observe the proportion of impact the use of this specific material has on a building's energy expenses in contrast to when this material is not utilised. The software also takes into account factors registered in the model that are relevant for the calculation of energy consumption, such as, the use of the building's construction and its electrical and ventilation network.

* Work Degree

** Faculty of Physical-Mechanics Engineering. School of Civil Engineering. Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Codirector: Luis Eduardo Zapata Orduz.

INTRODUCCIÓN

La preservación de los recursos energéticos, la comodidad de los que habitan o hacen uso de la edificación y el impacto ambiental son los problemas clave que afronta la construcción sostenible y moderna [1], y que deberían verse como objetivos primarios a la hora de diseñar obras de infraestructura. El dominio y comprensión de la interacción entre el calor, la iluminación, la ventilación y la edificación brindan información que es útil a la hora de tener como objetivo el ahorro de energía eléctrica consumida por la obra constructiva [1]. La omisión de estos objetivos desencadenan lo que se ha evidenciado en las últimas décadas: una desmedida explotación de materias primas en nuestro planeta, lo que a su vez ha sido un factor relevante para el calentamiento global a pesar de lo que se ha abordado el tema últimamente y se hacen llamados de atención permanentemente sobre las consecuencias que esto tendrá a gran escala [2]. Es aquí donde un desarrollo sostenible cobra importancia pues éste implica el uso de los recursos naturales renovables de una manera que no los elimine, los degrade o disminuya su utilidad "renovable" para las futuras generaciones, mientras que se mantienen reservas constantes de recursos naturales como suelos, fuentes de agua y biomasa [3].

A través de proyectos mundiales, como Horizon 2020 y UN Millenium, donde se plantea que la situación que se presenta actualmente en el planeta (a excepción de algunos países) no es muy alentadora en cuanto a energía y sostenibilidad. En los últimos años, las fuentes de energía han ido decreciendo rápidamente [4] y, a pesar de que, se ha intentado fomentar el uso de materiales reciclables y de paso la reducción del consumo de energía [5], programas que no son suficiente para controlar el uso indebido de los recursos y altas emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Problema, que según estudios, ha sido causado en su mayoría por las actividades realizadas por el ser humano [6].

De lo anterior, es importante resaltar el 50 % en volumen de las materias primas explotadas en el planeta son destinadas al sector de la construcción [7], lo cual causa que se modifiquen paisajes por completo y se puede indicar que es una industria insostenible, ya que solo un poco más del 45% de los materiales que quedan de una demolición son destinados a la reutilización [7]. Por otra parte, se deberían establecer medidas más estrictas en las políticas de construcción concernientes a la responsabilidad con el medio ambiente, que regulen la extracción de los materiales y la afectación de los lugares donde se va a realizar el levantamiento de la estructura.

Además, el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en el planeta son otros asuntos que van de la mano con la explotación de materias primas y competen, o al menos deberían competir, al sector de la construcción. El petróleo ha sido, durante las últimas décadas, una fuente de energía que ha impulsado cientos de industrias, sin embargo, lo ha hecho de una manera insostenible y que en un periodo relativamente corto ha causado gran daño y grandes cantidades de emisiones de CO₂ a la atmósfera, además de afectar fuentes de agua por medio de los desechos que son generados a causa de su explotación [8]. Respecto a esta problemática se ha firmado el Protocolo de Kyoto (que a pesar de ser pactado inicialmente hasta el año 2012 se acordó una prórroga hasta el año 2020), el cual busca controlar y reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ de los países [2], dentro de los cuales Colombia está incluido. Lamentablemente algunos países no han cumplido con lo que se había acordado, y otros se han retirado al no tener ganancias económicas suficientes para ellos al controlar estos factores del calentamiento global.

Esto lleva a plantear muchas dudas acerca de qué tan sostenible puede llegar a ser una u otra solución ante el caótico estado y desmedida explotación de materiales. Cabe resaltar que en Colombia el consumo de energía viene creciendo a razón de 4% por año según el reporte presentado por el Ministerio

de Minas y Energía [9], y además el consumo energético residencial fue del 21,2 % en el año 2009, en el cual también se menciona que los equipos de refrigeración (aires acondicionados) y calentadores de agua son los que más gastan energía. Por lo que también es necesario tener en cuenta estas proyecciones para buscar fuentes alternativas o, como lo es el objetivo de este proyecto, probar un método para la reducción del consumo de energía eléctrica.

Este documento presenta; no la solución a estos problemas, ya que son de una gran magnitud; sino lo que podría ser un pequeño aporte para reducir el gasto de energía en las residencias, y ciñéndose al concepto de sostenibilidad; que considera las consecuencias ambientales de las prácticas constructivas para eliminar o minimizar a largo plazo el daño y agotamiento de los recursos de nuestro planeta [10], da un motivo por el cual se deba reciclar y reutilizar la mayor cantidad de recursos posibles. Para este proyecto, el papel periódico es la materia prima principal que va a ser utilizada para fabricar los paneles de celulosa que se adherirán a paredes y/o cubiertas. Estos paneles serán probados térmica y acústicamente, donde el principal objetivo será obtener, como consecuencia, la disminución del uso de equipos refrigerantes (aires acondicionados, ventiladores), calentadores, y además una baja transmisión del sonido a través de las paredes. Los hogares eficientes respecto al uso de la energía se diseñan de manera que puedan minimizar la pérdida de calor, en invierno, y la ganancia de calor, en verano [11]. Y luego de ser caracterizado el material, será incluido en un modelo de una residencia por medio del *software* Autodesk Revit para saber cuánta energía ahorraría porcentualmente. El fin último de este proyecto es la caracterización de los paneles de celulosa como aislantes térmicos y acústicos, y observar la influencia de la conductividad térmica en el consumo energético de la edificación.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Plantear una alternativa sostenible a partir de paneles de celulosa como aislante térmico y acústico que brinde comodidad y ahorro energético en edificaciones residenciales.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar el gasto de energía teórico sobre modelos con y sin paneles de celulosa utilizando software Autodesk Revit.
- Determinar el coeficiente de disipación de ruido del panel a base celulosa.
- Determinar la conductividad térmica del panel a base celulosa.

2. METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES Y FABRICACIÓN DE LOS PANELES

El procedimiento para la fabricación de las muestras se inició con la recolección de papel periódico dentro del *Alma Mater* de la Universidad Industrial de Santander y la adquisición del ácido bórico; que son dos de los tres elementos necesarios para realizar la mezcla, el tercero es el agua. Posteriormente el papel periódico fue dejado en un recipiente con agua durante dos días con el objetivo de que fuese más fácil su trituración con ayuda de una licuadora. El material absorbe el agua y le otorga la consistencia necesaria al momento de moldear los paneles. La proporción utilizada de papel, agua y ácido bórico fue de 4:1:1. La proporción de agua fue escogida con el objetivo de que se alcanzara la trabajabilidad y maleabilidad necesaria; mientras que para la proporción de ácido bórico se procuró que la mezcla no fuera combustible; ya que el ácido bórico le proporciona a la composición propiedades ignífugas que evita que este combustione fácilmente [12] y es un ácido comercialmente disponible, compatible ambientalmente, muy económico y fácil de manejar. [13]

Una vez pesadas las cantidades necesarias se mezclan los materiales hasta tener un material homogéneo que luego es vertido en formaletas de madera, o de cualquier otro material (según la facilidad de adquisición) que son dejadas al aire libre durante dos meses, para este caso, tiempo en el cual la mezcla quedó completamente seca y lista para ser usada en los ensayos a realizar (Figura 1). Podría ser necesaria una mayor o menor cantidad de tiempo dependiendo de la ciudad donde sean ubicados los paneles al aire libre y la temporada climática; ya que, por ejemplo, durante los dos meses que los paneles fueron ubicados al aire libre se presentaron lluvias frecuentemente.

Es pertinente mencionar que materiales hechos a partir de materias primas biológicas pueden ser susceptibles a ser hábitat de poblaciones tipo fungi u hongos [14]. Por lo que, seguramente, se deben tener medidas cautelares que eviten que esto represente una amenaza a las personas que habitan o hacen uso de la edificación. Para evitar estos posibles problemas es utilizado el ácido bórico, que actúa como fungicida, insecticida y además, hace que el material resultante no se inflame fácilmente [15], por lo que proporciona un margen de seguridad en caso de incendio.

Figura 1. Mezcla de papel periódico y ácido bórico en molde.



2.2. ENSAYO DE IMPEDANCIA ACÚSTICA

En construcciones residenciales o de cualquier otro tipo, durante su uso se generan ruidos que en ocasiones pueden ser molestos para las demás personas que se encuentran allí. Últimamente se ha evidenciado que en la ciudad de Bucaramanga, y es el mismo caso de muchas otras ciudades, se está incrementando la densidad poblacional por medio de edificaciones de uso habitacional.

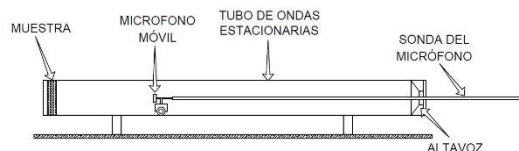
A través del tubo de impedancia o de Kundt (Figura 2) se puede determinar el coeficiente de absorción del material a implementar como aislante termo-acústico. En el interior del tubo se encuentra un micrófono que capta la onda

producida por el parlante (Figura 3) que a su vez está conectado con el generador de frecuencia y arroja una gráfica con ayuda del osciloscopio de la cual se toman las amplitudes máximas y mínimas que se forman a lo largo del tubo; con el desplazamiento del micrófono se capta la amplitud de la onda en diferentes puntos y con la ayuda de un flexómetro en el exterior se ubica espacialmente el micrófono en el interior, con lo que se busca una onda estacionaria correspondiente a cada frecuencia. Hay que tener en consideración que el comportamiento de los paneles puede cambiar en un pequeño porcentaje, ya que la forma de la edificación y la geometría de los espacios también inciden en el comportamiento acústico [16].

Figura 2. Tubo de impedancia o de Kundt.



Figura 3. Esquema de tubo de impedancia o de Kundt.



Fuente: RUSSELL Daniel (2002) Absorption Coefficient and Impedance. Science and Mathematics Department, Kettering University, Flint, MI, 48504. [Adaptado por los Autores].

A partir de los datos tomados, mostrados en el laboratorio (Anexo A), se calcula el coeficiente y el índice de absorción del material, los cuales lo caracterizan acústicamente.

Teóricamente, la energía total que choca contra una pared, una parte se refleja, otra parte, es absorbida en la propia pared y la otra parte, transmitida al espacio detrás de la pared [17]. Dividiendo estos, los fragmentos de energía son:

El coeficiente de reflexión de energía $|r|^2$

El coeficiente de absorción α

El coeficiente de transmisión de energía $|t|^2$

Y aplicando conservación de energía se tiene:

$$|r|^2 + \alpha + |t|^2 = 1 \quad (1)$$

Ya que la onda de sonido viaja al interior de un tubo de Kundt, se considera despreciable el coeficiente de transmisión de energía en comparación al coeficiente de reflexión, quedando la ecuación de la siguiente forma:

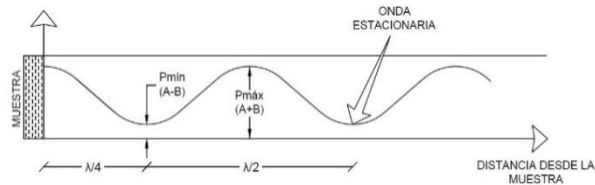
$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2)$$

Si la fuente sonora opera a bajas frecuencias tal que la longitud de onda sea mayor que 1.707 veces el diámetro del tubo, sólo las ondas planas pueden viajar por el tubo. En la vecindad de la fuente estas ondas planas se perturban si la fuente sonora genera las ondas no planas. Lo mismo se cumple para el vecindario de la muestra [17].

Una muestra no homogénea puede reflejar la onda plana entrante como un reflejo distorsionado. A alguna distancia de la muestra la onda reflejada será de nuevo plana, si la longitud de onda es bastante grande. Por consiguiente todos

los tubos de resonancia que usan las ondas planas sólo pueden ser usados a las frecuencias menores de $C_0/1.7 D$, donde C_0 es la velocidad del sonido en el espacio libre [17]. Debido a que el tubo utilizado para el ensayo es de 4" de diámetro, la frecuencia máxima que puede ser empleada para generar una onda plana debe ser de 2000 Hz. Además de procurar no exceder esta frecuencia, se debe verificar que la onda genere un antinodo cada $\lambda/2$ lo que es igual a $C_0/2f$; para corroborar que se trate de una onda armónica simple.

Figura 4. Onda de sonido que viaja a través del Tubo de Kundt.



Fuente: RUSSELL Daniel (2002) *Absorption Coefficient and Impedance*. Science and Mathematics Department, Kettering University, Flint, MI, 48504. [Adaptado por los Autores].

La amplitud en un antinodo de presión (máxima presión) es $(A+B)$, y la amplitud en un nodo de presión mínima presión) es $(A-B)$, las cuales se muestran en la figura 1. No es posible medir A o B directamente pero se puede medir $(A+B)$ y $(A-B)$, esto se logra al resonar la onda en el tubo, formándose de esta manera ondas estacionarias. Se puede definir la relación de presión máxima a presión mínima como SWR (standing wave ratio), mediante la ecuación 5 [18],

$$SWR = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{i}n}}; \quad SWR = \frac{A+B}{A-B} \quad (3)$$

El coeficiente de reflexión del sonido requiere de B/A para ser conocido, por lo tanto debe modificarse la ecuación (3) quedando de la siguiente manera:

$$|r| = \frac{A}{B} = \frac{SWR-1}{SWR+1} \quad (4)$$

Teniendo $|r|$ es posible determinar α reemplazando el resultado en la ecuación (2). La energía reflejada es proporcional al cuadrado de las relaciones de amplitud de las ondas, por lo tanto, el coeficiente de absorción del sonido (α) de la muestra a una frecuencia dada esta dado por la ecuación 5. [17]

$$\alpha = 1 - |r|^2 = \left[\frac{SWR-1}{SWR+1} \right]^2 \quad (5)$$

Los valores cercanos a 1 indican que el material se comporta como aislante acústico; mientras que los valores cercanos a cero indican que el sonido es mayormente reflejado o transmitido por el material. Para la prueba se tomó una muestra de 10.8 cm de diámetro, que es el mismo diámetro del tubo utilizado para construir el equipo experimental. La probeta implementada en el ensayo fue de 1.5 cm de espesor.

2.3. ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En la actualidad la transferencia térmica tiene un gran alcance en todos los problemas relacionados con la energía, cubriendo un amplio espectro que varía no sólo desde el objetivo de la climatización de edificios sino que también abarca los problemas complejos que aparecen relacionados con las plantas termoeléctricas de potencia [19]. Una de las modalidades de la transferencia de calor es la Conducción, la cual se fundamenta bajo la descripción matemática de Fourier (1822) (Ecuación 6) que considera aspectos cómo el gradiente de temperaturas y la conductividad térmica “K” que depende del material [20].

A la hora de probar un material que se quiera usar como aislante térmico en edificaciones para propiciar un ahorro significativo de energía, es importante realizar un análisis donde se muestre el comportamiento del material frente al paso del calor, ya que todos los materiales conducen calor de manera diferente

[11]. Mediante el coeficiente de conductividad térmica se puede conocer la medida en que un material conduce el calor, por lo tanto, entre menor sea este valor, el paso de calor a través del material también será menor [11].

Por medio del Banco de conductividad térmica en estado estable (Figura 5) creado por los estudiantes universitarios Torres E., Palacio E., Fuentes J, Rodríguez L, Araque O, Ramírez S y Jaimes W, como proyecto final de la materia Sistemas Térmicos I de la Escuela de Ingeniería Mecánica se busca obtener la conductividad térmica de una muestra del material en estudio. La muestra de 0.18 m de diámetro con un espesor de 0.015 m es calentada por una de sus caras por medio de un calentador de resistencia eléctrica con una potencia de 10W dentro del aparato cilíndrico que contiene fibra de vidrio en su interior (Figura 6) con el fin de evitar al máximo las pérdidas de calor que se puedan presentar en las zonas laterales, por lo que se asume una conducción unidimensional de calor, es decir todo el calor generado por el calentador será conducido a través de la muestra. Por medio de seis termocuplas (Figura 5) puestas a lado y lado de la muestra se pueden leer las temperaturas a las que se somete la muestra en el proceso transitorio inicial para finalmente llegar a leer temperaturas del material (Anexo B) cuando éstas ya no cambian con el tiempo, a lo que se llama estado estacionario de la transferencia de calor [19], del cual se toman los datos requeridos en la Ecuación 7 y así calcular la conductividad térmica (Ecuación 8) propia del material por medio de la ecuación de Fourier [20].

Figura 5. Banco de conductividad térmica en estado estable.



$$Q = -k * A * \frac{T - T_{R1}}{L} \quad (6)$$

$$T = T_1 - \frac{(T_2 - T_3)^2 + (T_4 - T_5)^2}{4 * (T_2 + T_3 + T_4 + T_5 - 4 * T_1)} \quad (7)$$

T_i = Temp. sensada en la termocoupla i .

k = Conductividad térmica ($W/m * k$).

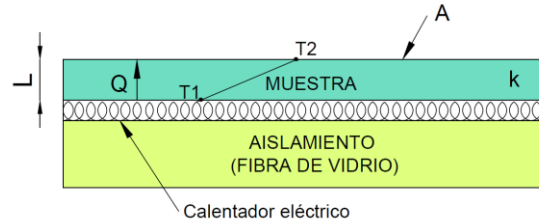
A = Área efectiva de transferencia de calor.

Diámetro en cm.

T_{R1} = Temperatura de la resistencia 1.

L = Espesor de la probeta

Figura 6. Esquema de aparato experimental para determinar el coeficiente de conductividad térmica de un material.



Fuente: CENGEL Yunus, GHAJAR Afshin. *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw Hill. Cuarta Edición. 2011. [Adaptado por los Autores]

Por medio de la ecuación de Fourier se encuentra entonces K:

$$k = -\frac{Q * L}{A * (T - T_{R1})} \text{ [w/m K]} \quad (8)$$

Dónde:

A = Área normal o perpendicular a la transferencia o dirección de transferencia (0.101 m^2).

Q = Potencia eléctrica consumida por el calentador de resistencia que se convierte en calor (10 W).

L = Espesor de la muestra (0.015m)

Con éste análisis de transferencia de calor se supone el material trabajado como homogéneo e isotrópico; es decir que tiene propiedades uniformes en todas las direcciones. Se supone además el material con parámetros físicos constantes, con equilibrio mecánico, es decir cómo un material indeformable y además que el calor se encuentra distribuido uniformemente [19].

2.4. MODELO ANALÍTICO EN AUTODESK REVIT

Luego de caracterizar previamente el material con los resultados obtenidos por medio del ensayo de conductividad térmica, y otras propiedades halladas del material, como su densidad y calor específico; se analizará, finalmente, si el material satisface la necesidad de reducir el consumo de energía eléctrica en la edificación donde sea aplicado. Para llevar este análisis a cabo, se utilizará el *software* Autodesk Revit (Figura 7), en el cual, uno de sus complementos es dedicado al análisis de consumo de energía de las estructuras modeladas en este y permite obtener, entre varios resultados, el consumo anual de energía eléctrica como el más relevante para este caso. Para llevar a cabo el procesamiento de datos, Autodesk Revit tiene en cuenta la norma ASHRAE 62 [21], que es la que controla la calidad de la ventilación y del aire en espacios interiores en Estados Unidos.

Figura 7. Modelo utilizado para la simulación.



Fuente: Autodesk Revit 2014. Licencia: Propiedad de Grupo de Investigación Geomática, Universidad Industrial de Santander.

Con los problemas que se afrontan energéticamente; como es el caso del petróleo, en el cual las economías de los países exportadores de este producto se están viendo afectados por los bajos precios del crudo y se analizan otras

fuentes de energía alternativas [22]; el uso de este tipo de programas, con los cuales se conocen, aproximadamente, los datos de consumo de energía eléctrica en el momento en que se diseña y no posterior a la construcción, se hace posible un acercamiento a la sostenibilidad. Los avances tecnológicos y técnicas constructivas alrededor de la eficiencia energética se han convertido en una necesidad para lograr el menor impacto posible en el planeta [23]. Herramientas, como Autodesk Revit, permiten el manejo de variables que afectan este dato de consumo; lo que permite experimentación a bajo costo sin arriesgar el capital, y a la vez son experimentos que se pueden reproducir, y por otro lado, permite la comparación y modificación de variables [24].

Los factores que se tienen en cuenta en el *software* para determinar el consumo son: la ciudad donde está ubicada la edificación (clima, precipitaciones), el tipo de uso de la edificación (vivienda, fábrica, empresa, locales comerciales u otra), las instalaciones eléctricas y redes de ventilación de contenga el modelo y las propiedades térmicas de los materiales que hayan sido utilizados para crear el modelo (Figura 8). Para este análisis será usado uno de los modelos ejemplo que trae el programa por defecto, ya que dispone de todos los detalles requeridos para tener un resultado de mayor precisión. El uso de la edificación es de oficinas, además, el modelo cuenta con redes eléctricas y de ventilación; las paredes de mampostería, que son los elementos que más interesan a la simulación, son de ladrillo cocido frisado con mortero, y la localización escogida fue la ciudad de Bucaramanga.

Figura 8. Variables sobre las que Autodesk Revit hace el cálculo para conocer el consumo de energía eléctrica.

Parameter	Value
Common ^	
Building Type	Office
Location	Bucaramanga, Colombia
Ground Plane	Level 1
Detailed Model ^	
Export Category	Rooms
Export Complexity	Simple with Shading Surfaces
Include Thermal Properties	<input checked="" type="checkbox"/>
Project Phase	New Construction
Sliver Space Tolerance	304.8
Energy Model ^	
Analytical Space Resolution	457.2
Analytical Surface Resolution	304.8
Core Offset	3657.6
Divide Perimeter Zones	<input checked="" type="checkbox"/>
Conceptual Constructions	Edit...
Target Percentage Glazing	40%
Target Sill Height	762.0
Glazing is Shaded	<input type="checkbox"/>
Shade Depth	609.6
Target Percentage Skylights	0%

Fuente: Autodesk Revit 2014.

Para saber si el material cumple la función esperada, se hará el análisis inicialmente sin la aplicación de los paneles de celulosa en las paredes, y luego se hará agregándole los paneles a los muros. Lo esperado es que reduzca el consumo de energía empleado por la edificación. Además se observarán las cargas de temperatura al interior de la edificación, ya que se espera un ambiente más cómodo térmicamente que es el que permitirá el ahorro de energía.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. IMPEDANCIA ACÚSTICA

En el ensayo realizado, se intentó obtener las ondas características resultantes más precisas respecto a las que se generarían teóricamente, por lo cual algunos datos que no hacen parte de las amplitudes máximas o mínimas de cada frecuencia (se encuentran en un punto intermedio de la onda) no se tuvieron en cuenta al momento de hacer los cálculos pertinentes para conocer el coeficiente de impedancia acústica del material empleado. Es pertinente mencionar que uno de los factores que afectaron el ensayo fue la sensibilidad presentada por el tubo de Kundt, ya que con leves movimientos del micrófono, la amplitud mostrada variaba en ocasiones, por lo que se tuvo la precaución de verificar la similitud de las longitudes de onda teóricas y las experimentales como se mencionó anteriormente.

Los datos que han sido utilizados para realizar el cálculo se encuentran en la Tabla 1, y también los resultados arrojados por las ecuaciones 3 y 5 explicadas en la descripción de la práctica. *Alpha* (α) es el resultado final de la práctica e indica la cantidad de sonido que absorbe en relación a 1, que es el sonido total emitido.

Comparados estos resultados con coeficientes de impedancia acústica de materiales comunes en la construcción y aislamiento [25], que se muestran en la Tabla 2, se observa que tiene un mejor desempeño aislando el sonido que materiales comunes en las obras constructivas, como lo son el hormigón y el ladrillo. Además, se encuentra dentro del rango de materiales implementados para llevar a cabo esta función

Tabla 1. Datos obtenidos del ensayo de impedancia acústica.

Frecuencia (Hz)	Pmáx (mv)	Pmín (mv)	SWR	SWR + 1	SWR - 1	r	α
500	53	20	2.650	3.650	1.650	0.452	0.796
750	60	43	1.395	2.395	0.395	0.165	0.973
1000	15	8	1.875	2.875	0.875	0.304	0.907
1500	14	6.5	2.154	3.154	1.154	0.366	0.866
2000	11	2.4	4.583	5.583	3.583	0.642	0.588

Tabla 2. Coeficientes de impedancia acústica de materiales de construcción y aislantes sonoros.

Nombre del material	Bandas de frecuencia [Hz]			
	250	500	1000	2000
Grava, suelo flojo y húmedo	0.60	0.65	0.70	0.75
Bloques de hormigón	0.45	0.30	0.25	0.40
Hormigón de espuma acústica [3 cm]	-	0.39	0.42	0.42
Muro de ladrillo a la vista	0.025	0.032	0.042	0.05
Corcho en general	0.27	0.72	0.79	0.76
Corcho aglomerado	0.28	0.85	0.82	0.78
Fibra de vidrio [5 cm]	0.63	0.78	0.87	0.83
Fibra de vidrio [10 cm]	0.96	0.96	0.90	0.84

Desde una perspectiva acústica el material se comporta de una excelente manera para aislar los sonidos provenientes de un lugar contiguo, por lo que sí puede brindar comodidad en sitios donde se presentan sonidos que pueden llegar a ser molestos.

4.2. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Posterior a la obtención de datos de las temperaturas captadas por las termocuplas en ambos lados de la probeta, se calcula el coeficiente de

conductividad térmica del material con las ecuaciones anteriormente citadas; como resultado se obtiene:

$$k = 0.1105 [W/m K]$$

En los anexos se muestran los cálculos detallados que fueron hechos para llegar a este resultado.

En comparación con los materiales de construcción más comunes en la industria, como lo son el hormigón armado, los morteros y los ladrillos de mampostería (Tabla 3); no queda duda de que el material a base de celulosa conduce mucho menos calor que estos, por lo que se espera a que la temperatura al interior de la edificación se vea afectada en menor medida por la temperatura exterior si son aplicados los paneles de celulosa para recubrir los muros de mampostería.

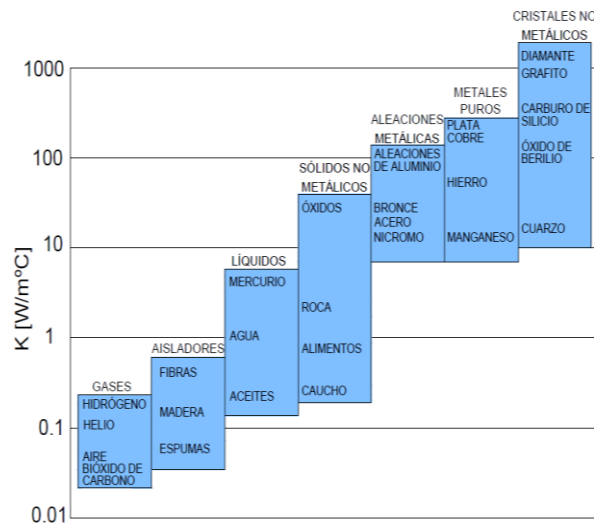
Tabla 3. Densidad y conductividad térmica de materiales comunes en construcción.

MATERIAL	ρ Kg/m ³	K w/m.k
Hormigón armado	2400	2.3
Mortero de cemento	1800	1.2
Ladrillo hueco	630	0.33

Fuente: Catálogo de Elementos Constructivos del CTE. Ministerio de Vivienda de España. 2014.

Los paneles de celulosa podrían considerarse como aislantes, ya que se encuentran en el rango bajo de coeficientes conductividad térmica con valores cercanos a los de la madera (Figura 9), pero sostiene su favorabilidad al ser un material principalmente reciclable que coopera con la sostenibilidad.

Gráfico 1. Rango de conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente.



Fuente: CENGEL Yunus, GHAJAR Afshin. *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw Hill. Cuarta Edición. 2011. [Adaptado por los Autores].

El análisis hasta este punto muestra una gran viabilidad de la implementación de los paneles de celulosa como aislante térmico y acústico, ya que cuantitativamente demuestra un comportamiento de las propiedades térmicas y acústicas que brindarían beneficios en estos dos aspectos.

4.3. SIMULACIÓN EN AUTODESK REVIT

El modelo analítico de energía creado a partir de elementos de construcción arroja resultados como: Los factores de rendimiento de construcción donde se muestra la ubicación del proyecto (Bucaramanga, Colombia) y la estación meteorológica virtual (940888), la cual Autodesk proporciona, situada como máximo a 14 km de una ubicación de proyecto, la cual permite conectar la estación meteorológica con cualquier computador. También se muestran las temperaturas exteriores máxima y mínima que se pueden presentar en la ciudad, junto con el área de piso que es el área de suelo bruta del modelo y el

área del muro exterior. Además es posible ver el promedio de vatios de electricidad de iluminación por área de espacio interior con aire acondicionado en todo el edificio y el valor de densidad de ocupación por defecto basado en el estándar ASHRAE 62 de ventilación y calidad de aire interno aceptable [20], la proporción de área cubierta por ventanas con relación al área de muro bruta, el costo eléctrico expresado en dólares por kilovatio-hora (kWh) y el costo del combustible expresado en dólares por unidad térmica basado en el promedio nacional del país a donde pertenezca la ciudad escogida para el análisis.

Tabla 4. Factores involucrados en el análisis energético.

Factores de rendimiento de construcción		
	<i>Modelo con panel de celulosa</i>	<i>Modelo sin panel de celulosa</i>
Ubicación	Bucaramanga, Colombia	Bucaramanga, Colombia
Estación Meteorológica	940888	940888
Temperatura Exterior	Max; 28° C/Mín; 13° C	Max; 28° C/Mín; 13° C
Área común de piso	3.436 m ²	3.523 m ²
Área de muro exterior	2.294 m ²	2.291 m ²
Potencia de iluminación media	9.69 W/m ²	9.69
Personas	100 personas	103 personas
Proporción de ventanas en exterior	0.27	0.27
Costo eléctrico	\$0.13/kWh	\$0.13/kWh
Costo de combustible	\$1.18/Térmicas	\$1.18/Térmicas

Fuente: Autodesk Revit 2014.

Con los resultados de la *Intensidad de uso de energía* se puede ver la medida del uso de electricidad anual por área de piso y la medida del uso de combustible anual por área de piso y finalmente se tiene la suma de los anteriores, obteniendo el total. Para los resultados obtenidos en el modelo con el uso de los paneles de celulosa se tiene una intensidad total de uso de energía menor al modelo sin la aplicación del panel de celulosa en un 2,8%. Ver Tabla 5.

En los siguientes resultados se muestra la estimación de la cantidad de electricidad y combustible que el modelo analizado puede utilizar durante un periodo de 30 años. En la Tabla 6 se observa que la simulación con celulosa presenta un menor uso de electricidad y combustible teniendo así un costo más bajo de energía en un porcentaje de 45,8%.

Además de los resultados en gastos energéticos del modelo, el programa brinda la posible cantidad de energía renovable que puede llegar a generar la edificación con la utilización de paneles fotovoltaicos con tres niveles de eficiencia y el potencial uso de turbinas para la generación de energía eólica. Donde el cálculo utiliza velocidad de viento de arranque y de corte de 9,7 y 72,4 kilómetros por hora respectivamente, especificadas en las coordenadas de datos climáticos de la zona. Esto con el fin de generar una simulación de diseño más sostenible. Las emisiones de carbono anuales se puede apreciar de manera gráfica que el uso de energía es menor para el caso del eliminar del proyecto mediante el uso de energía renovable (signo negativo) son también mayores para éste caso que para el modelo sin la aplicación de los páneces. (Figura 10)

Tabla 5. Comparación de resultados de la simulación de consumo de energía total.

Intensidad de uso de energía	Modelo con panel de celulosa	Modelo sin panel de celulosa
	EUI de electricidad	127 kWh/ m ² /año
EUI de combustible	30 MJ/ m ² /año	17 MJ/ m ² /año
EUI Total	487 MJ/ m ² /año	501 MJ/ m ² /año

Fuente: Autodesk Revit 2014

Tabla 6. Comparación de la energía implementada por la edificación durante su ciclo de vida.

Costo/Uso de energía de ciclo de vida	Modelo con panel de celulosa	Modelo sin panel de celulosa
	Uso de electricidad de ciclo de vida	9,731,964 kWh
Uso de combustible de ciclo de vida	2,278,234 MJ	1,369,838 MJ
Costo de energía de ciclo de vida	\$ 563,815	\$ 609.64

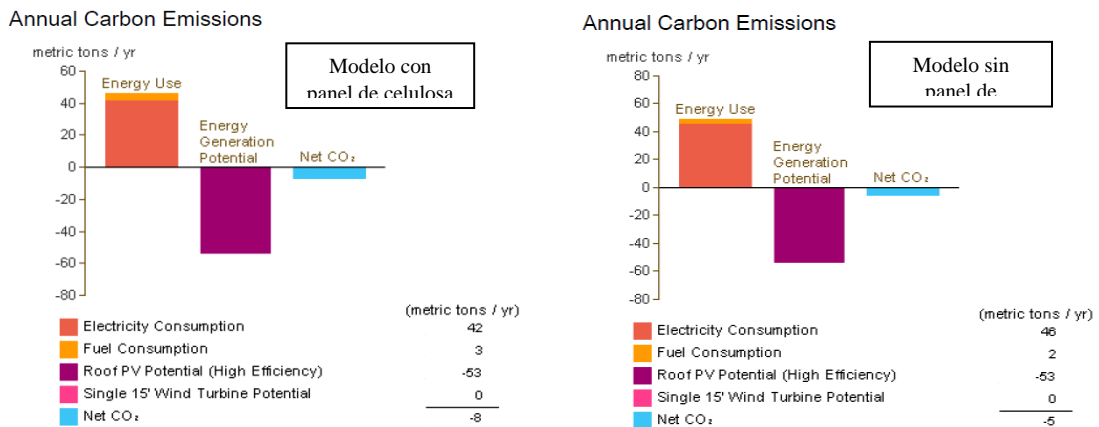
Fuente:Autodesk Revit 2014

Tabla 7. Comparación de la posible cantidad de energía renovable que puede generar la edificación.

Potencial de energía renovable	Modelo con panel de celulosa	Modelo sin panel de celulosa
Sistema fotovoltaico montado en cubierta (eficiencia med	136.019 kWh/año	136.72 kWh/año
Sistema fotovoltaico montado en cubierta (baja eficiencia	272.038 kWh/año	273.441 kWh/año
Sistema fotovoltaico montado en cubierta (alta eficiencia)	408.058 kWh/año	410.161 kWh/año
Potencial de turbina eólica de 4.5 m	379 kWh/año	379 kWh/año

Fuente: Autodesk Revit 2014

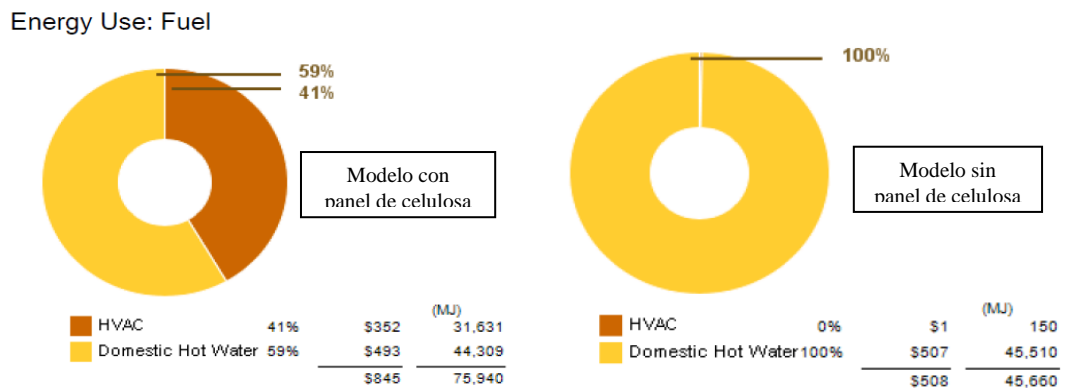
Gráfico 2. Comparación de emisiones anuales de carbono que emitiría la edificación.



Fuente: Autodesk Revit 2014.

El siguiente diagrama muestra el porcentaje total de combustible, costos y unidades térmicas para cada uso (Figura 11). La identificación del uso específico que requiere más combustible permite desarrollar estrategias para reducir el consumo energético global del proyecto.

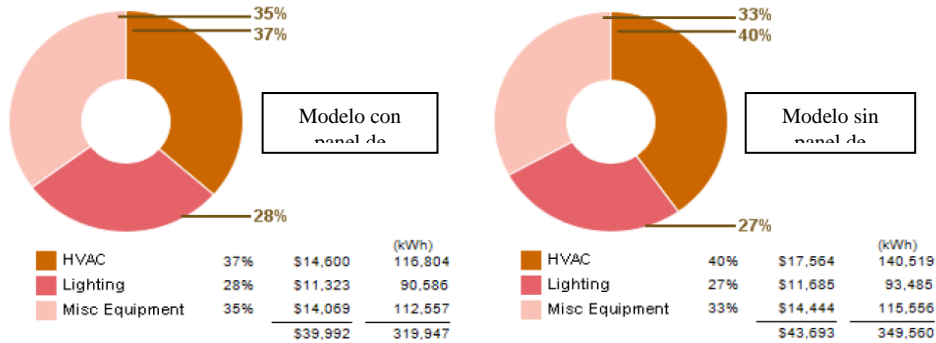
Gráfico 3. Comparación de combustible utilizado por la edificación.



Fuente: Autodesk Revit 2014.

Uso de energía: Electricidad. Este diagrama muestra el uso de electricidad estimado para usos principales, incluida la climatización, la iluminación y los equipos (Incluye ordenadores, ascensores y aparatos eléctricos diversos). Para cada uso, el diagrama muestra el porcentaje total de electricidad, costos y kilovatio-horas. La identificación del uso específico que requiere más electricidad permite desarrollar estrategias para reducir el consumo energético global del proyecto.

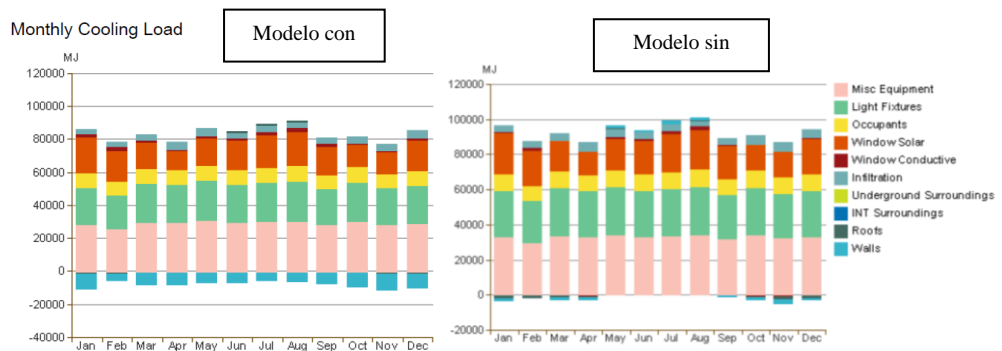
Gráfico 4. Comparación de usos de la energía eléctrica de ambos modelos.



Fuente: Autodesk Revit 2014

La gráfica de *carga de refrigeración mensual*, representa las demandas de refrigeración cuya representación se da en la gráfica de manera positiva y los valores negativos contrarrestan la necesidad de refrigeración que cómo se ve en la Figura 13, para el modelo con la adaptación de los paneles, los muros tienen un mayor valor que el modelo sin paneles de celulosa.

Gráfico 5. Gráficas comparativas de necesidades de refrigeración de los elementos que componen la edificación.



Fuente: Autodesk Revit 2014.

5. CONCLUSIONES

Los paneles de celulosa, a través de los ensayos, han demostrado tener propiedades físicas que aíslan térmica y acústicamente de una manera satisfactoria; que permite el paso del calor y de las ondas acústicas en un porcentaje muy bajo, respectivamente, lo que permite una sensación de comodidad en lo que respecta a la temperatura interior de la habitación donde sea implementada la celulosa.

A pesar de que existen materiales con una conductividad térmica un poco más baja que la de los paneles de celulosa, estos últimos tienen la ventaja de ser amigables con el ambiente por tratarse de una materia reciclada; lo que cooperará con la sostenibilidad.

En cuanto al consumo energético, se reduce en un 3% la energía total consumida por la edificación cuando se implementan los paneles de celulosa; lo que podría ser un ahorro significativo si es implementado a gran escala. Viéndolo de otra forma, por cada 10.000 COP se ahorran 300 COP en la energía eléctrica consumida; valor que no causa mucho efecto en el presupuesto de una persona, pero sí lo haría a nivel municipal o departamental. Además, uno de los resultados que arroja la simulación indica que las paredes, donde están ubicados los paneles de celulosa, son las que menor energía requieren para ser refrigeradas, por lo que evita que los equipos refrigerantes hagan un mayor esfuerzo por aclimatar los espacios.

Por otra parte, se deben hacer estudios para caracterizar los paneles químicamente, además de investigar si son posibles causantes de alergia o irritaciones en la piel que pudieran afectar la integridad de los habitantes o usuarios de la edificación.

CITAS

- [1] CITHERLET, Stéphane. Towards the Holistic Assessment of Building Performance Based on an Integrated Simulation Approach, PhD Tesis. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology (EPFL). 2001. 251 p.
- [2] NACIONES UNIDAS. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1998.
- [3] QUESADA MATEO, Carlos. Estrategia de conservación para el desarrollo sostenible de costa rica, ecodes. Mirenem. San Jose, 1990. 24 p.
- [4] PACHECO-TORGAL F, LABRINCHA J.A. The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. En: Construction and Building Materials. Marzo 2013. Vol 40. p. 729-737.
- [5] PACHECO-TORGAL F. Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. En: Construction and Building Materials. Enero 2014. Vol 51. p. 151-162.
- [6] HOUGHTON J, DING Y, GRIGGS D, NOGUER M, VAN DER LINDEN P, DAI X, MASKELL K, JOHNSON C. Climate change 2001: The scientific basis. Contribución de la Universidad de Cambridge al tercer reporte de evaluación al Panel Intergubernamental de Cambio Climático. p. 3 – 6.

[7] ITEWI Mahmaud, Green building construction thermal isolation materials. En: American Journal of Enviromental Sciences. 2011. vol. 7. no 2. p. 161-165.

[8] COHEN Bernard, The Nuclear Energy Option. Pittsburgh: Plenum Press. 1990. 338 p.

[9] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética. Informe Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia. Bogotá D.C, 2013. 51 p.

[10] EATON D, JONES S, PENNINGTON D, ROBERTI D, CHANDLER R, A Technical Manual for Material Choices in Sustainable Construction. California Environmental Protection Agency. 2005. 5 p.

[11] CENGEL Yunus, GHAJAR Afshin. Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones. McGraw Hill, 2011. 945 p.

[12] SAIDAMINOV M, MAKSIMOVA N, KUZNETSOV N, SOROKINA N, AVDEEV V, Fire Protection Performance of Oxidized Graphite Modified with Boric Acid. Moscow State University. En: Inorganic Materials. 2012. vol. 48. no 3. p 258-262.

[13] AMIN ROSTAMI,* JAMAL AKRADI AND FIROZ AHMAD-JANGI. Boric Acid as Cost-Effective and Recyclable Catalyst for Trimethylsilyl Protection and Deprotection of Alcohols and Phenols. Department of Chemistry. Faculty of Science. University of Kurdistan. En: Journal of the Brazilian Chemical Society. 2010, vol 21, no 8, p. 1587-1592.

[14] STERFLINGER Katja, ETTENAUER Jorg, PIÑAR Guadalupe, Bio-susceptibility of materials and thermal insulation systems used for historical buildings. European Geosciences Union General Assembly, EGU, Division Energy, Resources & the Environment, ERE. En: Energy Procedia 40, 2013, vol 40, p. 499 – 506.

[15] HARVEY, S, Antiseptics and Disinfectants; Fungicides; Ectoparasiticides. En: Goodman and Gillman's: The Pharmacological Basis of Therapeutics. 1980. Vol. 6, p. 971.

[16] SAARINEN, Ari. Sound insulation of facade and the evaluation of the tolerances of standard pren 12354-3. En: VTT Building Technology. Espoo, Finland. 2000. Vol 3, p. 12-18.

[17] CASTAÑEDA Jaime, GONZÁLEZ Álvaro. Medición de coeficiente de absorción del sonido. En: Revista Scientia et Technica Año X. Agosto, 2004. vol. 25. p. 101-106.

[18] RUSSELL, Daniel. Absorption Coefficient and Impedance. Kettering, England: Kettering University. Science and Mathematics Department. 2002. 6 p.

[19] TORRELLA ALCARAZ E, PINZAZO OJER J, CABELLO LÓPEZ R, Transmisión de Calor. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Termodinámica Aplicada. 2002. 75 p.

[20] LEE John Francis, SEARS Francis Weston, Thermodynamics: An introducing text for engineering students. Cambridge: Addison-Wesley. Second Edition. 1964. 622 p.

[21] AMERICAN SOCIETY OF HEATING. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality., Refrigerating and Air – Conditioning Engineers, INC. ASHRAE 62 STANDARD. United States. 2004. 13 p.

[22] LIVIUS-STELIAN B, RALUCA C, IRINA-TEODORA T, Oil Price and its influence on European energy policy. Economics Degree Project. Bucharest: University of Bucharest. Department of Statistics and Econometrics. 2012. 9 p.

[23] GHATTAS R, GREGORY J, OLIVETTI E, GREENE S. Life Cycle Assessment for Residential Buildings: A Literature Review and Gap Analysis. Engineering Degree Project. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. Marzo 12, 2013. 21 p.

[24] Autodesk Ecotect Analysis [online]. 2010. Autodesk. Disponible en Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación Geomática. Bucaramanga (Santander).

[25] RECUERO, Manuel. Ingeniería Acústica. Madrid: Paraninfo, 1999. 696 p.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY OF HEATING. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality., Refrigerating and Air – Conditioning Engineers, INC. ASHRAE 62 STANDARD. United States. 2004. 13 p.

AMIN ROSTAMI,* JAMAL AKRADI AND FIROZ AHMAD-JANGI. Boric Acid as Cost-Effective and Recyclable Catalyst for Trimethylsilyl Protection and Deprotection of Alcohols and Phenols. Department of Chemistry. Faculty of Science. University of Kurdistan. En: Journal of the Brazilian Chemical Society. 2010, vol 21, no 8, p. 1587-1592.

Autodesk Ecotect Analysis [online]. 2010. Autodesk. Disponible en Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación Geomática. Bucaramanga (Santander).

CASTAÑEDA Jaime, GONZÁLEZ Álvaro. Medición de coeficiente de absorción del sonido. En: Revista Scientia et Technica Año X. Agosto, 2004. vol. 25. p. 101-106.

CENGEL Yunus, GHAJAR Afshin. Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones. McGraw Hill, 2011. 945 p.

CITHERLET, Stéphane. Towards the Holistic Assessment of Building Performance Based on an Integrated Simulation Approach, PhD Tesis. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology (EPFL). 2001. 251 p.

COHEN Bernard, The Nuclear Energy Option. Pittsburgh: Plenum Press. 1990. 338 p.

EATON D, JONES S, PENNINGTON D, ROBERTI D, CHANDLER R, A Technical Manual for Material Choices in Sustainable Construction. California Environmental Protection Agency. 2005. 5 p.

GHATTAS R, GREGORY J, OLIVETTI E, GREENE S. Life Cycle Assessment for Residential Buildings: A Literature Review and Gap Analysis. Engineering Degree Project. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. Marzo 12, 2013. 21 p.

HARVEY, S, Antiseptics and Disinfectants; Fungicides; Ectoparasiticides. En: Goodman and Gillman's: The Pharmacological Basis of Therapeutics. 1980. Vol. 6, p. 971.

HOUGHTON J, DING Y, GRIGGS D, NOGUER M, VAN DER LINDEN P, DAI X, MASKELL K, JOHNSON C. Climate change 2001: The scientific basis. Contribución de la Universidad de Cambridge al tercer reporte de evaluación al Panel Intergubernamental de Cambio Climático. p. 3 – 6.

ITEWI Mahmaud, Green building construction thermal isolation materials. En: American Journal of Enviromental Sciences. 2011. vol. 7. no 2. p. 161-165.

LEE John Francis, SEARS Francis Weston, Thermodynamics: An introducing text for engineering students. Cambridge: Addison-Wesley. Second Edition. 1964. 622 p.

LIVIUS-STELIAN B, RALUCA C, IRINA-TEODORA T, Oil Price and its influence on European energy policy. Economics Degree Project. Bucharest: University of Bucharest. Department of Statistics and Econometrics. 2012. 9 p.

NACIONES UNIDAS. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1998.

PACHECO-TORGAL F. Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. En: Construction and Building Materials. Enero 2014. Vol 51. p. 151-162.

PACHECO-TORGAL F, LABRINCHA J.A. The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. En: Construction and Building Materials. Marzo 2013, Vol 40, p. 729-737.

QUESADA MATEO, Carlos. Estrategia de conservación para el desarrollo sostenible de costa rica, ecodes. Mirenem. San Jose, 1990. 24 p.

RECUERO, Manuel. Ingeniería Acústica. Madrid: Paraninfo, 1999. 696 p.

SAARINEN, Ari. Sound insulation of facade and the evaluation of the tolerances of standard pren 12354-3. En: VTT Building Technology. Espoo, Finland. 2000. Vol 3, p. 12-18.

SAIDAMINOV M, MAKSIMOVA N, KUZNETSOV N, SOROKINA N, AVDEEV V, Fire Protection Performance of Oxidized Graphite Modified with Boric Acid. Moscow State University. En: Inorganic Materials. 2012. vol. 48. no 3. p 258-262.

STERFLINGER Katja, ETTENAUER Jorg, PIÑAR Guadalupe, Bio-susceptibility of materials and thermal insulation systems used for historical buildings. European Geosciences Union General Assembly, EGU, Division Energy, Resources & the Environment, ERE. En: Energy Procedia 40, 2013, vol 40, p. 499 – 506.

TORRELLA ALCARAZ E, PINZAZO OJER J, CABELLO LÓPEZ R, Transmisión de Calor. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Termodinámica Aplicada. 2002. 75 p.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética. Informe Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia. Bogotá D.C, 2013. 51 p.

ANEXOS

Anexo A. Datos del ensayo de impedancia acústica.

Datos tomados en el laboratorio del ensayo de impedancia acústica por medio del tubo de Kundt.

Frecuencia (Hz)	Distancia (cm)	Amplitud (mv)
200	0	10
	4.7	12.5
	16	16.5
	27.5	12.5
	41.6	16.5
	58.3	12.5
	69.25	25
	80.05	12.5
	93.4	18
500	0	37
	1.4	53
	10.06	26
	18.1	20
	50.04	45
	60.02	53
	96.1	53
750	0	47
	5.6	59
	8.15	60.5
	20.05	44
	31	60
	44.8	43
	50.01	60
	54	60
	68.2	44
	80.4	59
88.6	40	
99.1	62	

Frecuencia (Hz)	Distancia (cm)	Amplitud (mv)
1000	0	14
	7.15	8
	13.45	12.5
	16.49	15
	25.15	8.5
	34	15
	40.2	15
	61.65	7.5
	69.8	15
	1500	0
1.55		6.8
7.7		10
21.6		6.2
25.01		11
31.4		6.5
40.65		14
44.7		6
51.3		14
79.7		6.5
2000	0	8
	3.99	11
	17.8	11
	19.6	12
	24.9	2.3
	31.1	10.8
	47.25	11
	52.7	2.4
	57.4	11
	70.9	11
73.1	11.2	
80.4	2.4	
90.5	11	
98.8	11	

Anexo B. Datos del ensayo de conductividad térmica.

Datos de las temperaturas en grados Celsius censadas en las termocouplas del ensayo del Banco de conductividad eléctrica en estado estable, temperatura de la resistencia 1.

T1	45.673 °C
T2	45.175 °C
T3	41.906 °C
T4	44.645 °C
T5	44.521 °C
TR1	99.463 °C

T	46.08812
---	----------

Potencia de la resistencia eléctrica, área y espesor de la muestra para los cálculos de K.

Q	10	w
A	0.0254469	m ²
Espesor	0.015	m