

NIVELES DE SOSTENIBILIDAD DE LA MADERA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

*Sustainability levels of timber
as a building material*

POR

Humberto **ARREAZA**

Universidad de Los Andes,
Facultad de Arquitectura y
Diseño, Centro de Investigación
de la Vivienda (CINVIV). Mérida,
Venezuela.
harreaza@ula.ve

Jaume **AVELLANEDA**

Universidad Politécnica de
Cataluña, Departamento de
Construcciones Arquitectónicas
I, Barcelona, España.
jaume.avellaneda@upc.edu

pp. 100 — 111

RECIBIDO 18/11/2012
ACEPTADO 12/04/2013

RESUMEN

Tradicionalmente, la madera ha sido percibida como un material ecológico. Claro está que los árboles tienen un desempeño ambiental importante, pero surge la pregunta: ¿Hasta qué punto llega el carácter ecológico de un árbol cuando la convertimos en madera para construir? Tal transformación implica la incorporación de energía, el uso de contaminantes y de transporte. Adicionalmente, se generan abundantes residuos. Fueron investigadas las emisiones de CO₂ de una fachada de madera atribuibles al procesamiento del material para compararlas con la capacidad que tiene la madera como reservorio de dióxido de carbono. En la primera etapa, se consideraron las emisiones atribuibles al contenido de carbono en la madera y se obtuvo un valor de signo negativo hasta el momento de la construcción de la fachada, lo que significa que las emisiones de CO₂ son menores al carbono contenido en la madera. En la segunda etapa, el balance de emisiones muestra signo positivo porque las emisiones exceden la cantidad de carbono contenida en la madera, que deja de ser entonces un sumidero neto de carbono. Resalta el hecho que las emisiones en la fase de producción se deben al calor usado para el secado y para encolar y prensar la madera contrachapada y contra-laminada. En este estudio se consideró un perfil mixto de energía que incluye el uso de fuentes energéticas fósiles y alternativas. Finalmente, se plantea el escenario con el empleo exclusivo de energías alternativas y se hacen comparaciones.

PALABRAS CLAVE

Madera como material de construcción, procesamiento de la madera, fachadas de madera, emisiones de CO₂, energía incorporada.

KEY WORDS

Timber as a construction material, wood processing, timber façades, CO₂ emissions, embodied energy.

SUMMARY

Traditionally, timber has been considered an ecological material useful in sustainable construction. It is clear that trees have an environmental role, but the question is: To what extent is the ecological nature of a tree maintained when it is transformed into timber for construction? This transformation implies the incorporation of energy, the use of pollutants, and transport. Thus, waste is generated. We tracked the life cycle of a timber facade evaluating CO₂ emissions derived from processing the timber and comparing them with the content of CO₂ of the timber in its natural state. On the first stage of the study, the emissions of CO₂ believed to be normal for the content of carbon in the timber in its natural state were measured. We obtained a negative value until the timber was used for construction. This means that the emissions of CO₂ remain lower than the content of carbon in the timber. On the second stage, the values of the CO₂ emissions were positive because they exceeded the amount of carbon contained in the timber. Therefore, wood is no longer a net carbon sink. It is worth noting that higher CO₂ emissions are due to heat used to dry the lumber and to press and glue plywood and cross-laminated wood. In this study, we considered a mixed energy profile that involves the use of fossil fuels and alternative energy sources. Finally, we propose a scenario exclusively using alternative energy sources and making comparisons with the conditions considered at the beginning.

1. INTRODUCCIÓN

El ejercicio de la arquitectura y la construcción dentro del ámbito de la sostenibilidad impone al arquitecto nuevas exigencias de conocimientos y habilidades. Conocer que el impacto que puede generar el uso de un determinado material, puede tener repercusiones globales y apropiarse de la responsabilidad que ello implica, requiere de estos profesionales la incursión en áreas de conocimiento con la cuales hace algunas décadas no se pensaba que fuese necesario tener contacto alguno.

Uno de los retos que enfrentan actualmente los arquitectos, consiste en conocer en qué medida los materiales que utilizan para construir las edificaciones pueden contribuir al fenómeno del calentamiento global. Al manejar tal información, podremos hacer una selección adecuada de materiales a la hora de elaborar un proyecto.

La madera ha sido seleccionada, pues se trata de un material que es percibido, casi por descontado, como material sostenible; sin embargo, la transformación de la madera desde el árbol hasta obtener un material útil para la construcción, implica la incorporación de energía, la generación de residuos, requiere en muchos casos el uso de contaminantes y además, el empleo de transporte en numerosas etapas de transformación y distribución hasta llegar a la obra. Todos estos procesos implican emisiones de CO_2 , que pueden contribuir con el calentamiento global.

El objetivo general de este trabajo, es elaborar un balance físico-energético y de emisiones de CO_2 de la madera considerando su capacidad como sumidero, procesos de transformación, transporte, generación de residuos y mantenimiento requerido por la madera utilizada, para conocer su potencial de sostenibilidad como material de construcción.

El balance físico-energético de emisiones se plantea mediante el manejo de cifras de energía incorporada a la transformación y transporte de la madera, y se traducirán tales empleos de energía a sus emisiones asociadas (componente energético), se sumarán a las emisiones producto de la degradación y combustión de residuos de la madera utilizada para construir y mantener las fachadas (componente físico). Finalmente, se compararán las

emisiones de CO_2 con el CO_2 fijado en el proceso de la fotosíntesis.

Para la realización de este estudio se efectuó una revisión de fuentes bibliográficas impresas y en formato digital, para la recopilación de la información necesaria para efectuar cálculos de emisiones de dióxido de carbono y de energía incorporada atribuibles a la madera como material de construcción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La [Fig. 1] expone el esquema de trabajo y de manejo de datos y resultados, el cual se planteó suponiendo que la fachada de madera será construida en una edificación ubicada en la región de Cataluña con madera importada de Austria o Alemania. Parte de ella recibirá su procesamiento final en Cataluña y otra parte será importada en elementos hechos a la medida (madera contralaminada). El transporte terrestre en todos sus tramos, usando camiones madereros que empleen combustible diesel y se consideró el trayecto de ida y vuelta al destino en todos los casos. El mantenimiento de la fachada se planteó bajo la estrategia de sustitución periódica de piezas, según la durabilidad prevista.

Los residuos de procesamiento de la madera se calcularon con base en los datos presentados en el cuadro 1. Se calculó la cantidad de carbono emitido por degradación y quema de residuos, así como, también el carbono en forma de CO_2 equivalente fijado en la parte aprovechada de la madera del árbol, partiendo de los datos presentados en el punto 3.3 y considerando el uso de madera conífera seca con densidad promedio de 450 kg/m^3 .

Posteriormente, se calcularon las emisiones por energía incorporada en la transformación de la madera, a partir de información acerca de los combustibles empleados en la generación de electricidad en Cataluña y en la producción de calor en los aserraderos para las labores de secado, prensado y encolado. En el caso de la madera contralaminada, se consideró el uso de resinas de resorcina con densidad de $1,2 \text{ t/m}^3$ y emisiones de $1,57 \text{ tCO}_2/\text{m}^3$ de resina (Infomadera, 2002).

En cuanto a las emisiones de CO_2 generadas por el transporte, se consideró el uso de combustible

diesel y sus emisiones cuyo promedio es de $2,66 \text{ kgCO}_2/\text{l}$ (Comisión Nacional de Energía, 2008), proponiendo trayectos en ida y vuelta y cargas aproximadas de 25 m^3 entre el bosque y el aserradero, 40 m^3 para el traslado internacional y 10 m^3 para la distribución local de madera.

Las emisiones provenientes del mantenimiento de la fachada, como obedecen a la reposición de piezas, su cálculo fue una repetición resumida de los cálculos antes descritos adaptados a las cantidades de madera destinadas al mantenimiento.

Posteriormente se realizaron los dos balances:

- **Balance físico.** Este balance implica la consideración de la totalidad del almacenamiento de carbono y las emisiones por concepto de residuos y desperdicios del corte del árbol y el aserrío de la madera, sin incluir emisiones por energía incorporada ni por transporte.
- **Balance general físico-energético.** Tuvo como insumo el balance físico al cual se agregaron todas las emisiones por concepto de energía incorporada y transporte, tanto para el caso de la madera empleada en la construcción por primera vez, como en la madera destinada al mantenimiento de la fachada.

Los balances se realizaron siguiendo el esquema de un balance financiero contemplando en columnas paralelas los ingresos, egresos y saldos que se denominaron almacén, emisión y balance respecti-

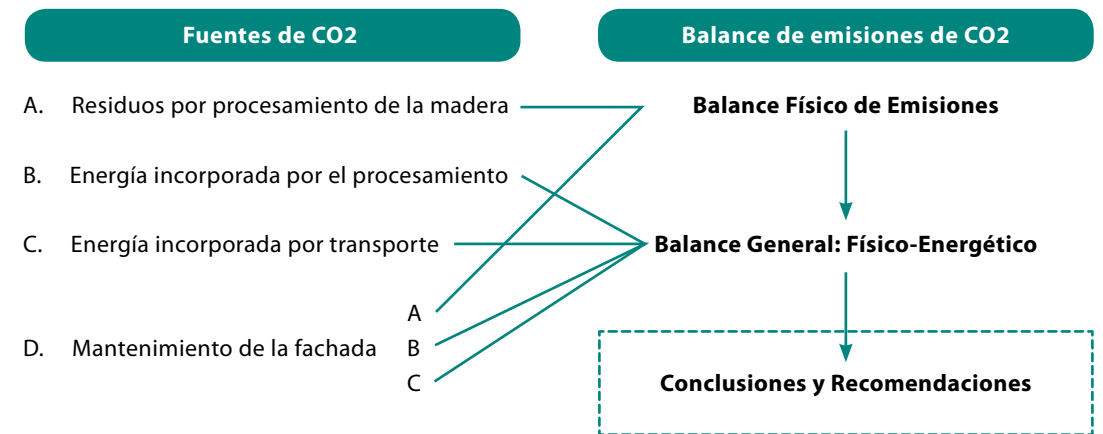
vamente. La peculiaridad de estos balances es que los ingresos ocurren todos en un solo momento, en el árbol vivo, y los egresos pueden ocurrir en numerosas ocasiones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. LA MADERA Y EL CICLO DEL CARBONO

El carbono se acumula en los bosques mediante el proceso de fotosíntesis efectuado por las plantas, en el cual es absorbido el dióxido de carbono atmosférico (CO_2) y es fijado quedando almacenado; tanto, en la biomasa viva (madera), como en la muerta (hojarasca, restos de madera y materia orgánica del suelo), siendo modificada mediante la acción de organismos descomponedores liberando el carbono de la biomasa que reaccionará con el oxígeno del aire y se convertirá en CO_2 . La madera es entonces un sumidero de carbono, pero también un potencial emisor de CO_2 , debido a su condición de material orgánico perecedero.

Por cada kg de carbono fijado en la madera, el árbol tomará del aire $3,67 \text{ kg}$ de CO_2 , fijará el carbono a la biomasa y emitirá el oxígeno, debido a esto, cada kg de madera seca (12% de humedad) requerirá tomar de la atmósfera un promedio de $1,63 \text{ kg}$ de



[Fig. 1]
Esquema metodológico para el abordaje del trabajo.
FUENTE: elaboración propia.

CO₂ (Carazo, 2008), y por lo tanto, al degradarse un kg de madera, podrá ser emitida a la atmósfera la misma cantidad de CO₂ que había sido fijado.

3.2. PROCESAMIENTO DE LA MADERA

Desde que se corta el árbol hasta que se construye el edificio, la madera es sometida a numerosos procesos industriales con el fin de transformarla y hacerla útil para la construcción. Todos estos procesos requieren de la utilización de maquinaria especializada. Paralelamente al uso de las máquinas se generan residuos que en ocasiones pueden ser reciclados. Cada tipo de madera que se produce, requiere de un conjunto específico de procesos y por ende de maquinarias y según sea mayor el aprovechamiento que se obtenga del fuste del árbol, menores serán los residuos generados en el proceso. El [Cuadro 1] expone la aproximación de cantidades que se aprovechan y que se desechan o reciclan.

El propósito de contemplar la transformación de la madera en este estudio, es poder apreciar la relación entre el aprovechamiento de la madera y la generación de residuos; pues buena parte de los residuos de la madera, terminarán degradándose o siendo quemados y en consecuencia generando emisiones de CO₂.

3.3. ENERGÍA INCORPORADA

Se entiende por energía incorporada, la cantidad de energía de diverso origen y calidad, que es necesario emplear para elaborar un producto. El término pretende hacer ver que dicho producto “lleva dentro de sí”, una determinada cantidad de energía y por lo tanto las consecuencias del uso de tal energía son atribuibles al producto. La energía incorporada está estrechamente relacionada con las emisiones de CO₂, por lo tanto y para poder realizar los cálculos pertinentes en este trabajo, es necesario conocer en qué cantidades y proporciones se incorpora la energía a la producción y transformación de madera. Con este fin, incorporamos el esquema siguiente en el cual se puede observar la cantidad de energía empleada en la producción de un metro cúbico de madera aserrada y las proporciones de su empleo [Fig. 2].

3.4. DURABILIDAD DE LA MADERA

Generalmente, la durabilidad de la madera ha dependido de sustancias químicas, que pueden alargar notablemente la vida útil de cualquier elemento de dicho material expuesto a condiciones de intemperie. Sin embargo, tal tipo de sustancias generan problemas tales como, toxicidad de las fachadas, dificultades para el reciclaje de la madera y alto nivel de energía incorporada con las consecuentes emisiones de gases de efecto invernadero.

En virtud de lo anterior, se propone una forma de mantenimiento para las fachadas de madera basado en dos estrategias complementarias: **1.** Uso de recubrimientos y conservantes orgánicos y biodegradables, no tóxicos ni contaminantes y de baja energía incorporada; **2.** La reposición periódica de partes deterioradas, debido a la menor efectividad de las sustancias orgánicas en comparación con las químicas convencionales, pero que permiten el reciclaje de la madera desincorporada de la fachada, sin peligro de contaminación ni toxicidad. Esto último, implica costos de mantenimiento en el tiempo por reposición de piezas en el tiempo a los propietarios de las edificaciones.

[Cuadro 1] Aprovechamiento de la madera de un árbol. FUENTE: FAO, 1992.

Productos del árbol	Proporción (%)
Dejado en el bosque	
Copa, ramas y follaje	23,0
Tocón (excluyendo raíces)	10,0
Aserrín	5,0
Aserrío	
Virutas, costeros y recortes	17,0
Aserrín y menudos	7,5
Pérdidas varias	4,0
Corteza	5,5
Madera aserrada	28,0
Total	100,0

[Cuadro 2] Durabilidad de la madera según su exposición en la fachada. FUENTE: O'CONNOR, 2002.

Elemento	Vulnerabilidad	Período de reposición
Recubrimiento de fachada	muy alta	c/20 años
Soporte del recubrimiento	alta	c/40 años

El [Cuadro 2] presenta la propuesta de mantenimiento por reposición de partes contempla los siguientes períodos y las siguientes superficies de reposición, dependiendo del tipo de elemento de madera y su vulnerabilidad frente a los agentes atmosféricos (O'Connor, 2002).

Unidas a las estrategias expuestas, la durabilidad de las fachadas de madera estará complementada con correctas estrategias de diseño y construcción, que consideren las previsiones necesarias para evitar que la madera de las fachadas sufra humedecimientos o secamientos excesivos que favorezcan su deterioro o el ataque de agentes xilófagos.

3.5. EMISIONES DE CO₂ POR CORTE Y ASERRÍO

Para calcular la cantidad de CO₂ fijado en una madera estructural seca, con humedad del 12% y con densidad de 450 kg/m³, y así determinar el potencial de emisiones que esa madera puede tener en caso de ser quemada o degradada, partiremos de los datos contenidos en el [Cuadro 3].

La fijación de CO₂ en toneladas por tonelada de árbol viene del [Cuadro 3] y la fijación por volumen de árbol es el cociente entre la fijación de CO₂ por tonelada entre el volumen de una tonelada, el cual a su vez, es el cociente del peso entre la densidad

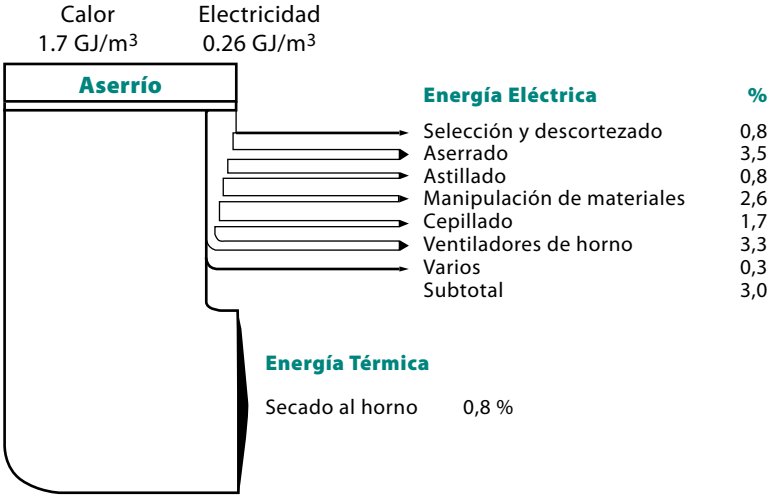
Peso	Densidad	Volumen	Fijación	Fijación
Kg	Kg/m ³	m ³	tCO ₂ eq/t (árbol)	tCO ₂ /m ³ (árbol)
1000	450	2,22	1,434	0,645

[Cuadro 3] Fijación de CO₂ en la madera.

considerada. A partir de estos datos, se puede construir el [Cuadro 4] de contenidos equivalentes de CO₂ en los diferentes productos y subproductos obtenidos del aserrado del árbol para la obtención de madera estructural.

Se considera que para la obtención de madera de los elementos de sujeción y de la capa exterior de la fachada se aserrará la madera del árbol en elementos más pequeños que en una madera estructural, por lo que se aprovechará más madera y se generarán menos residuos. En el caso de la madera contralaminada, serán aún menores las secciones de corte e igualmente, menores los residuos (Kolb, 2008).

Se considera que para obtener madera de uso estructural, se aprovecha 28 % de la madera del árbol, en el caso de los elementos de sujeción, se aprovecha hasta un 38 % y en el caso de la madera contralaminada hasta un 49,5 % de la madera del árbol; por lo que, siguiendo el esquema de cálculos



[Fig. 2] Energía usada para producir 1 m³ de madera. FUENTE: FAO, 1992.

[Cuadro 4]
Fijación de CO₂ por volumen y peso de madera.

Etapa	Volumen obtenido de 1 m³ de árbol		Fijación	Fijación de CO₂ eq	Destino	Cociente m³:ton	CO₂ Fijación
	%	m³	kgCO₂/m³(árbol)	kgCO₂/m³(árbol)			kgCO₂eq/ton(árbol)
Dejado en el bosque							
Copas, ramas follaje	23	0,23	645,48	148,46	Degradación	2,22	329,91
Tocón excluyendo raíces	10	0,1	645,48	64,55	Degradación	2,22	143,44
Aserrín de tala	5	0,05	645,48	32,27	Degradación	2,22	71,72
Aserrío							
Virutas, costeros, recortes	17	0,17	645,48	109,73	Reciclaje	2,22	243,85
Aserrín y menudos	7,5	0,08	645,48	48,41	Reciclaje	2,22	107,58
Pérdidas varias	4	0,04	645,48	25,82	Quema	2,22	57,38
Corteza	5,5	0,06	645,48	35,50	Quema	2,22	78,89
Madera aserrada	28	0,28	645,48	180,73	Construcción	2,22	401,63
Totales	100	1		645,48			1.434,4

en el [Cuadro 5], obtenemos los siguientes datos de “sumidero” y emisiones de CO₂ en los dos tipos de madera presentes en la fachada estudiada, comparados con la madera estructural.

Las emisiones consideradas en el [Cuadro 5], corresponden al procesamiento de un metro cúbico de árbol, del cual se obtiene una cantidad de madera y otra cantidad de material reciclado que pueden ser por ejemplo, tableros aglomerados. Cada uno de los dos tipos de productos contienen un stock de CO₂ equivalente, pero para saber las emisiones correspondientes a la madera que utilizaremos en la fachada, es necesario repartir las emisiones totales en cada caso entre los productos obtenidos, dependiendo del porcentaje que representa cada uno y determinar la cantidad correspondiente por m³ de madera utilizada. Ese resultado se refleja en los [Cuadro 6,7].

3.6. EMISIONES DE CO₂ POR ENERGÍA INCORPORADA

A continuación se considera la incorporación de energía en el procesamiento de la madera. La energía eléctrica es la utilizada principalmente en las

maquinarias para procesar la madera tales como, sierras, canteadoras, lijadoras, etcétera. La energía térmica se utiliza en procesos de secado al horno, encolado y prensado de productos de madera; se considera que en el caso de las maderas laminadas y contralaminadas, el efecto ambiental y energético del uso de colas está incluido en la energía. Se considera un empleo de 13 % de energía eléctrica y 87 % de energía térmica (FAO, 1992).

Se consideró un uso de combustibles para la generación de energía eléctrica y térmica según datos proporcionados por la Comisión Nacional de Energía de España (2008) y The Engineering Toolbox (2005), los cuales se muestran en los [Cuadro 8,9]. Además, según lo mostrado en la figura 1, se emplearon en los cálculos consumos de 0,26 GJ/m³ (energía eléctrica) y 1,7 GJ/m³ (energía térmica), en el caso de elementos de montantes y capa externa de la fachada y en el caso de madera contralaminada se reportaron consumos de 0,675 GJ/m³ (energía eléctrica) y 3,825 GJ/m³ (energía térmica) (FAO, 1992).

Por su parte los cálculos efectuados produjeron los datos de emisiones por m³ de material y por m² de fachada mostrados en el [Cuadro 10].

[Cuadro 5]
Emisiones CO₂ y sumidero según el tipo de madera.

Tipo de madera	Sumidero madera	Sumidero reciclaje	Emisiones
	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq	kgCO ₂ eq
Madera estructural	180,73	158,14	307,6
Montantes	245,28	106,5	293,7
Madera contralaminada	319,5	35,5	290,46

[Cuadro 6]
Emisiones por residuos de corte y aserrado.

Tipo de madera	Proporción del producto obtenido	Cuota de emisiones	Volumen obtenido del árbol	Emisiones por volumen de madera
	%	kgCO ₂ eq	(m ³)	kgCO ₂ eq/m ³
Montantes y capa exterior	69,73	204,78	0,38	538,89
Madera contra-laminada	90	261,41	0,495	528,10

[Cuadro 7]
Emisiones por residuos de corte y aserrado.

Elemento	Emisiones por volumen de madera	Volumen/ área	Emisiones por área de fachada
	kgCO ₂ /m ³	m ³ /m ²	kgCO ₂ /m ²
Capa exterior	538,89	0.05	26.94
Montantes	538,89	0.005	2.69
Madera contra-laminada	528,10	0.1	52.81

[Cuadro 8]
Energía eléctrica incorporada.

Fuente energética (Tipo)	participación %	emisión CO ₂ kg CO ₂ /GJ
Fuel-Gas	3,2	535,00
Renovables	27,7	0,00
Carbón	22,5	261,10
Nuclear	16,8	0,00
Biomasa	8,2	79,760
Ciclo combi.	20,7	95,90
Otras	0,9	N.D.
	100,0	

[Cuadro 9]
Energía térmica incorporada.

Fuente energética (Tipo)	participación %	emisión CO ₂ kg CO ₂ /GJ
Gasóleo	6,0	66,72
Gas	80,0	63,94
Carbón	6,0	261,10
Biomasa	8,0	79,760
	100,0	

[Cuadro 10]
Emisiones por energía incorporada al procesamiento de la madera.

Elemento	Emisiones por energía eléctrica	Emisiones por energía térmica	Emisiones total por elemento	vol. /m² fachada	Emisiones por área de fachada
	kg CO ₂ /m³	kg CO ₂ /m³	kg CO ₂ /m³	m³/m²	kg CO ₂ /m²
Capa externa	26,59	131,24	157,83	0,05	7,89
montantes	26,59	131,24	157,83	0,005	0,79
Contralaminada	69,02	295,30	364,32	0,1	36,43

3.7.
EMISIONES POR TRANSPORTE Y MANTENIMIENTO

Se definió Cataluña, como destino de la madera que tendrá origen en alguno de los países centroeuropeos de mayor potencial productivo forestal. El transporte internacional (trayecto 2), se realiza principalmente por vía terrestre en camiones que utilizan combustible diesel y que cargan volúmenes de producto de alrededor de 40 m³ de madera.

En el caso de elementos aserrados de medianas dimensiones (capa externa y montantes), se considera el transporte desde el bosque al lugar del primer procesamiento (trayecto 1) y desde un lugar de segundo procesamiento o almacenamiento hasta la obra (trayecto 3). En el caso de madera contralaminada, por tratarse de elementos prefabricados a medida según las especificaciones de cada obra, no existirá el trayecto 3 pues de la planta de origen (Alemania, por ejemplo) se transportan directamente a la obra por vía terrestre.

Se plantean consumos de combustible diesel de 0.34 l/km para los trayectos 1 y 2 y de 0.27 l/km para el trayecto 3, la longitud de los trayectos es de 100, 3800 y 250 km respectivamente. En todos los casos, las distancias de los trayectos se consideran duplicadas, pues el camión hará el recorrido con carga desde el origen al destino (ida) y vacío desde el destino hasta el origen (vuelta). Las emisiones del diesel se consideran de 2.66 kgCO₂/l (The Engineering Toolbox, 2005). Los resultados de los cálculos se muestran en el [Cuadro 11].

Los cálculos de emisiones provenientes del mantenimiento incluyeron emisiones por concepto

de residuos de silvicultura y procesamiento; por concepto de energía incorporada y por transporte, siguiendo las mismas pautas consideradas para la construcción por primera vez. En el cálculo de emisiones se consideró toda la vida útil de la edificación, la cual se calcula en aproximadamente 40 años (O'Connor, 2002)

Las partes de madera consideradas para el mantenimiento por reposición fueron las lamas de recubrimiento por ser las más expuestas y vulnerables, y en segundo lugar los rastreles [Cuadro 12]. La madera contralaminada, por constituir la estructura de la fachada y por presentar protección química que le confiere mayor resistencia a los agentes de deterioro, no será sustituida en toda la vida útil.

3.8.
BALANCE FÍSICO DE EMISIONES

El balance físico de emisiones fue calculado según lo expuesto en la metodología. Primero se calculó el CO₂ almacenado en cada elemento de la fachada y por área de fachada para luego hacer el balance con datos basados en los cálculos de emisiones anteriormente presentados. El [Cuadro 13], muestra el almacenamiento y el [Cuadro 14], muestra el balance físico.

3.9.
BALANCE GENERAL FÍSICO-ENERGÉTICO DE EMISIONES

El balance general físico-energético, fue realizado según lo descrito en la metodología antes señalada. Sus resultados son los que se muestran en el [Cuadro 15].

[Cuadro 11]
Emisiones por transporte de cada uno de los productos.

Elemento	Emisión unitaria	Volumen/ superficie	Emisión por superficie
	kgCO ₂ /m³	m³/m²	kgCO ₂ /m²
Capa externa	107.22	0.05	5.36
Montantes	107.22	0.005	0.54
Contralaminado	89.53	0.1	8.95
Total			14.85

[Cuadro 12]
Emisiones por mantenimiento.

Elemento	Emisión por volumen de madera	Volumen/ superficie	Reposición	Emisión por superficie de fachada
	kgCO ₂ /m³	m³/m²	(veces)	kgCO ₂ /m²
residuos capa externa	538,89	0.05	2	53,89
Residuos montantes	538,89	0.005	1	2,69
Energía capa externa	157,83	0.05	2	15,87
Energía montantes	157,83	0.005	1	0,79
Transporte capa externa	107,22	0.05	2	10,72
Transporte montantes	107,22	0.005	1	0,54

[Cuadro 13]
CO₂ almacenado en elementos de la fachada.

Elemento	CO ₂ almacenado por volumen de madera	Volumen/ superficie	CO ₂ almacenado por superficie de fachada
	kgCO ₂ /m³	m³/m²	kgCO ₂ /m²
Capa externa	-645,5	0,05	-32,28
Montantes	-645,5	0,005	-3,23
Contralaminada	-645,5	0,1	-64,55

[Cuadro 14]
Balance físico de emisiones.

Concepto	CO ₂ almacenado	Emisión	Balance
	kgCO ₂ eq/m²	kgCO ₂ eq/m²	kgCO ₂ eq/m²
Hasta el momento de la construcción			
Residuos lamas	-32.28	26.94	-5.33
Residuos rastreles	-3.23	2.69	-0.53
Residuos contralaminada	-64.55	52.81	-11.74
Mantenimiento			
Residuos lamas	-64.55	53.89	-10.66
Residuos rastreles	-3.23	2.69	-0.53

[Cuadro 15]
Balance general físico-energético
de emisiones.

Concepto		Almacenamiento	Emisiones	Balance
		kgCO ₂ eq/m ²	kgCO ₂ eq/m ²	kgCO ₂ eq/m ²
Hasta la construcción	Residuos capa exterior	-32,28	26,94	-5,33
	Residuos de montantes	-3,23	2,69	-0,53
	Residuos de contralaminada	-64,55	52,81	-11,74
	Energía capa exterior	0	7,89	7,89
	Energía en montantes	0	0,79	0,79
	Energía en contralaminada	0	34,84	34,84
	Resinas en contralaminada	0	1,57	1,57
	Transporte capa exterior	0	5,36	5,36
	Transporte montantes	0	0,54	0,54
	Transporte contralaminada	0	8,95	8,95
Maintenance	Residuos capa exterior	-64,55	53,89	-10,66
	Residuos de montantes	-3,23	2,69	-0,53
	Energía capa exterior	0	15,78	15,78
	Energía en montantes	0	0,79	0,79
	Transporte capa exterior	0	10,72	10,72
	Transporte montantes	0	0,54	0,54
TOTAL BALANCE:				58,97
SUMATORIA DE EMISIONES POR ENERGÍA				60,09
BALANCE SI EL 100% DE LA ENERGÍA FUESE RENOVABLE				-1,12

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el balance físico de emisiones (atribuible al carbono contenido en la madera), se puede observar un valor de signo negativo hasta el momento de la construcción, lo cual significa que las emisiones de CO₂ fueron menores a la cantidad de carbono almacenado en el cuerpo físico de la madera. Hasta esta etapa, la madera puede ser considerada un sumidero neto de carbono.

Se puede observar que el mayor monto de emisiones de CO₂ en el balance físico, son causadas por los residuos provenientes del corte del árbol y el procesamiento de la madera; de los cuales, los primeros son menos controlables que los segundos pues se deben a las porciones del árbol que no son útiles para la industria forestal. Si se pudiese disminuir la cantidad de residuos no utilizados en la elaboración de derivados de madera, de manera que no se

degraden o se quemen, el balance físico de emisiones podría alcanzar un valor absoluto superior al obtenido.

El balance físico-energético de emisiones posee un valor con signo positivo, debido a que el valor de las emisiones de CO₂ en esta etapa es superior a la capacidad de almacenamiento de carbono de la madera utilizada en la construcción de la fachada; la cual, deja de ser entonces un sumidero neto de carbono. Sin embargo, si se sustituye toda la energía incorporada por energía 100% renovable, el balance puede llegar a tener un signo negativo, pero con un valor absoluto muy bajo.

Para que la fachada estudiada pueda llegar a ser un sumidero neto de carbono, además de energía 100% renovable, sería necesaria una significativa reducción de la cantidad de residuos provenientes del procesamiento de la madera.

La fijación de carbono en la madera es de capacidad limitada, porque se debe a procesos fisiológicos naturales del árbol que son difíciles de controlar por el ser humano. La posibilidad de generar emisiones es muy amplia y debería ser más controlada.

Es necesario revisar el procesamiento de la madera para generar mecanismos que minimicen los residuos producidos y trabajar con fuentes energéticas no emisoras de carbono. Pensar que el uso de la madera es sostenible por naturaleza, puede convertirse en su principal debilidad.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARAZO, A. 2012. Cifras básicas de la relación madera-fijación de carbono-CO₂ atmosférico. En línea: <http://www.revistamontes.net/descargaLibre.aspx?id=4222> [Consultado: 21/09/2012]

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA, ESPAÑA. *Sistemas de origen y etiquetado de electricidad 2007*. En línea: <http://gdo.cne.es/CNE/GarantiasEtiquetadoElectricidad2007.pdf> [Consultado: 18/10/2012]

FAO. Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales. En línea: <http://www.fao.org/docrep/t0269s/T0269S06.htm> [Consultado: 25/10/2012]

INFOMADERA. *Ventajas ecológicas de la madera como materia prima*. En línea: <http://infomadera.net/images/15885.pdf> [Consultado: 14/11/2012]

KOLB, J. 2008. *Systems in Timber Engineering*. Birkhauser. Basel. Chicago. USA. 259 p.

O'CONNOR, J. *Survey on actual service lives for north american buildings*. En línea: http://www.cwc.ca/NR/rdonlyres/67D4613-BF5D-4573-BD43C430B0B72C08/0/Service_Life_E.pdf [Consultado: 26/11/2012]

THE ENGINEERING TOLL BOX. *Carbon dioxide Emission Combustion fuels*. En línea: http://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html [Consultado: 01/10/2012].